

## Waldbodenzustandsbericht für Sachsen-Anhalt Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)

J. Evers, I. Dammann, U. Paar, W. Schmidt, B. Ahrends, B. Scheler, N. König,  
E. Schönfelder, M. Schmidt, A. Hafner, J. Eichhorn





J. Evers, I. Dammann, U. Paar, W. Schmidt, B. Ahrends, B. Scheler,  
N. König, E. Schönfelder, M. Schmidt, A. Hafner, J. Eichhorn  
Waldbodenzustandsbericht für Sachsen-Anhalt

Dieses Werk ist lizenziert unter einer  
[Creative Commons](#)  
[Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen](#)  
[4.0 International Lizenz](#).



erschieden als Band 20 der Reihe  
„Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt“  
in den Universitätsdrucken im Universitätsverlag Göttingen 2022

---

J. Evers, I. Dammann, U. Paar,  
W. Schmidt, B. Ahrends, B. Scheler,  
N. König, E. Schönfelder, M. Schmidt,  
A. Hafner, J. Eichhorn

## Waldbodenzustandsbericht für Sachsen-Anhalt

Ergebnisse der zweiten  
Bodenzustandserhebung im Wald  
(BZE II)

Beiträge aus der  
Nordwestdeutschen  
Forstlichen Versuchsanstalt  
Band 20

Universitätsverlag Göttingen  
2022

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Global Forest Decimal Classification: 114.1; 114.2; 114.3; 114.4; 114.7; 160.201; 182.47/48

Herausgeber der Reihe:  
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)  
Grätzelstr. 2, D-37079 Göttingen  
Tel.: +49 (0)551-69401-0, Fax: +49 (0)551-69401-160  
E-Mail: [zentrale@nw-fva.de](mailto:zentrale@nw-fva.de)  
[www.nw-fva.de](http://www.nw-fva.de)

Schriftleitung der Reihe: Dr. Thomas Böckmann, Prof. Dr. Carola Paul,  
Prof. Dr. Holger Militz

Redaktion der Reihe: Inge Kehr, Ulrike Gaertner

### Zitervorschlag:

Evers, J.; Dammann, I.; Paar, U.; Schmidt, W.; Ahrends, B.; Scheler, B.; König, N.; Schönfelder, E.; Schmidt, M.; Hafner, A.; Eichhorn, J. 2022: Waldbodenzustandsbericht für Sachsen-Anhalt – Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Beiträge aus der NW-FVA, Band 20, 450 S.

Dieses Buch ist auch als freie Onlineversion über die Website der NW-FVA, des Verlags sowie über den Göttinger Universitätskatalog (GUK) bei der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen (<http://www.sub.uni-goettingen.de>) erreichbar.

Es gelten die Lizenzbestimmungen der Onlineversion.

Lektorat: Dietmar und Saskia von Steen

Satz: Alice von Berg

Englische Zusammenfassung: Dr. Oliver van Straaten

Covergestaltung: Etta Starick

Titelfoto: W. Schmidt: Gley-Braunerde aus unverlehmtem Sand in der Kletzer Heide



© 2022 Universitätsverlag Göttingen

<http://univerlag.uni-goettingen.de>

ISBN: 978-3-86395-549-6

DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2022-2005>

ISSN: 1865-6994

eISSN: 2512-594X

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Vorwort</b> (Johannes Eichhorn)  | <b>IX</b> |
| <b>Zusammenfassung</b>  | <b>1</b>  |
| <b>Abstract</b>   | <b>7</b>  |
| <b>1 Überblick: Bewertung und Diskussion der bodenkundlichen Ergebnisse</b> (Jan Evers, Uwe Paar) | <b>13</b> |
| 1.1 Vorbemerkungen und Rahmenbedingungen  | 13        |
| 1.1.1 Ländlicher Versorgungswald und Waldboden  | 14        |
| 1.1.2 Säureeintrag und Waldboden  | 15        |
| 1.1.3 Veränderungen des Stickstoffhaushaltes und Waldboden  | 16        |
| 1.1.4 Klimaveränderungen und Waldboden  | 16        |
| 1.2 Repräsentativität der Bodenzustandserhebungen   | 17        |
| 1.3 Geologie, Boden und Bodenentwicklung  | 18        |
| 1.4 Substratgruppen   | 21        |
| 1.5 Bodentypen  | 21        |
| 1.6 Trockenrohdichten und Grobbodenanteile  | 22        |
| 1.7 Austauschkapazität  | 23        |
| 1.8 Status und Veränderung der Bodenversauerung   | 23        |
| 1.8.1 Kationen-Anteile an der Austauschkapazität  | 25        |
| 1.8.2 Basensättigung  | 25        |
| 1.8.3 Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat   | 27        |
| 1.8.4 Pufferbereiche  | 28        |
| 1.8.5 Bewertung   | 30        |
| 1.9 Hauptergebnisse für die Substratgruppen   | 31        |
| 1.9.1 Unverlehmter Sand (51 % der Waldböden nach BZE II in Sachsen-Anhalt)                        | 31        |
| 1.9.2 Schwach verlehmtte Sande (7 % der Waldböden nach BZE II in Sachsen-Anhalt)                  | 33        |
| 1.9.3 Verlehmte Sande (5 % der Waldböden nach BZE II in Sachsen-Anhalt)                           | 34        |
| 1.9.4 Lösslehm (11 % der Waldböden nach BZE II in Sachsen-Anhalt)                                 | 34        |
| 1.9.5 Tonschiefer (9 % der Waldböden nach BZE II in Sachsen-Anhalt)                               | 35        |
| 1.9.6 Substratgruppen mit geringen Anteilen an der BZE II   | 36        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 1.10     | Humusformen  | 37        |
| 1.11     | Kohlenstoff - Status und Veränderung in den Waldböden  | 38        |
| 1.12     | Stickstoff – Status und Veränderung in den Waldböden   | 42        |
| <b>2</b> | <b>Kurzportraits der BZE-Punkte („Steckbriefe“)</b>  |           |
|          | (Jan Evers, Andreas Hafner, Uwe Paar)  | <b>47</b> |
| <b>3</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>71</b> |
| 3.1      | Allgemeine Einführung zum Thema Boden (Uwe Paar, Jan Evers)  | 71        |
| 3.1.1    | Bodenbildung   | 71        |
| 3.1.2    | Funktionen der Böden   | 72        |
| 3.1.3    | Gefährdungen   | 73        |
| 3.2      | Geologische und bodenkundliche Verhältnisse in sachsen-anhaltischen Wäldern (Wolfgang Schmidt, Jan Evers, Uwe Paar)  | 76        |
| 3.2.1    | Geologie Sachsen-Anhalts   | 76        |
| 3.2.2    | Bodenbildung der geologischen Formationen  | 79        |
|          | 3.2.2.1 <i>Holozäne Bodenbildung</i>   | 79        |
|          | 3.2.2.2 <i>Pleistozäne Sedimente</i>   | 80        |
|          | 3.2.2.3 <i>Tertiär</i>   | 81        |
|          | 3.2.2.4 <i>Kreide und Jura</i>   | 81        |
|          | 3.2.2.5 <i>Trias</i>   | 81        |
|          | 3.2.2.6 <i>Perm</i>  | 82        |
|          | 3.2.2.7 <i>Karbon</i>  | 82        |
|          | 3.2.2.8 <i>Devon und Silur</i>   | 83        |
| 3.2.3    | Prozesse der Bodenbildung  | 84        |
| 3.2.4    | Zusammenfassung  | 86        |
| 3.3      | Forstliches Umweltmonitoring an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) (Johannes Eichhorn, Uwe Paar, Henning Meesenburg, Jan Evers, Birte Scheler, Nils König) | 88        |
| 3.3.1    | Aufgaben   | 88        |
| 3.3.2    | Konzept  | 89        |
| 3.4      | Befunde des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings zur Bewertung und Einordnung der Ergebnisse der BZE (Birte Scheler, Henning Meesenburg)                                       | 95        |
| 3.4.1    | Stoffeintrag – Belastungssituation der Wälder  | 95        |
| 3.4.2    | Chemische Zusammensetzung des Wasserflusses durch die Waldökosysteme   | 99        |
| 3.4.3    | Ernährungssituation  | 101       |
| 3.4.4    | Schlussfolgerung und Ausblick  | 103       |



|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>4</b> | <b>Aufgaben und Ziele der Bodenzustandserhebungen</b>   | <b>105</b> |
|          | (Uwe Paar, Jan Evers)   |            |
| <b>5</b> | <b>Methoden</b> (Jan Evers, Uwe Paar, Inge Dammann, Marcus Schmidt)   | <b>107</b> |
| 5.1      | Allgemeine Einführung   | 107        |
| 5.2      | Merkmalsgruppen   | 108        |
| 5.3      | Untersuchungsdesign und -module am BZE II-Punkt   | 108        |
| 5.3.1    | Beprobung und Analyse des Auflagehumus und des Mineralbodens  | 109        |
| 5.3.2    | Blatt- und Nadelernährung   | 110        |
| 5.3.3    | Vegetationsaufnahmen  | 112        |
| 5.3.4    | Waldwachstumskundliche Aufnahmen  | 113        |
| <b>6</b> | <b>Ergebnisse der Bodenuntersuchungen</b>   | <b>115</b> |
| 6.1      | Repräsentativität des Erhebungsnetzes (Jan Evers, Martin Buresch, Swen Hentschel)                                   | 115        |
| 6.1.1    | Vergleich BZE II und BÜK 1000   | 115        |
| 6.1.2    | Vergleich BZE II und Standortskartierung  | 117        |
| 6.2      | Bodenmorphologische Kenngrößen (Jan Evers, Uwe Paar, Jörg Weymar)   | 120        |
| 6.2.1    | Substratgruppen   | 120        |
| 6.2.2    | Bodentypen  | 123        |
|          | <i>6.2.2.1 Bodentypen nach Substratgruppen</i>  | <i>127</i> |
| 6.2.3    | Humusformen   | 127        |
|          | <i>6.2.3.1 Verteilungen der Humusformen</i>   | <i>127</i> |
|          | <i>6.2.3.2 Trockenmasse im Auflagehumus</i>   | <i>132</i> |
| 6.3      | Bodenphysikalische Kenngrößen (Jan Evers, Uwe Paar)   | 135        |
| 6.3.1    | Trockenrohdichten des Feinbodens  | 135        |
| 6.3.2    | Grobbodenanteile  | 136        |
| 6.3.3    | Feinbodenvorrat   | 137        |
| 6.3.4    | Nutzbare Feldkapazität  | 138        |
| 6.4      | Bodenmorphologische und bodenphysikalische Kenngrößen im Ländervergleich Nordwestdeutschlands (Jan Evers, Uwe Paar) | 140        |
| 6.5      | Bodenchemische Kenngrößen im Waldboden Sachsen-Anhalts (Jan Evers, Uwe Paar, Egbert Schönfelder)                    | 148        |
| 6.5.1    | Austauschkapazität  | 149        |
|          | <i>6.5.1.1 Austauschkapazität in den Substratgruppen</i>  | <i>152</i> |
|          | <i>6.5.1.2 Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität</i>  | <i>159</i> |
| 6.5.2    | Basensättigung  | 160        |
|          | <i>6.5.2.1 Basensättigung nach Substratgruppen</i>  | <i>162</i> |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 6.5.3    | Vorräte austauschbarer Calcium-, Magnesium- und Kaliumkationen                               | 170        |
|          | 6.5.3.1 <i>Calcium</i>   | 170        |
|          | 6.5.3.2 <i>Magnesium</i>   | 175        |
|          | 6.5.3.3 <i>Kalium</i>  | 182        |
| 6.5.4    | Vorräte austauschbarer Protonen, Eisen, Mangan und Aluminium                                 | 190        |
| 6.5.5    | pH-Werte und Pufferbereiche  | 193        |
|          | 6.5.5.1 <i>pH(H<sub>2</sub>O)</i>  | 195        |
|          | 6.5.5.2 <i>pH(KCl)</i>   | 201        |
| 6.5.6    | Kohlenstoff  | 203        |
|          | 6.5.6.1 <i>Kohlenstoffvorräte nach Substratgruppen</i>                                       | 207        |
|          | 6.5.6.2 <i>Kohlenstoffvorräte und Bestand</i>  | 209        |
| 6.5.7    | Stickstoff   | 211        |
|          | 6.5.7.1 <i>Stickstoffvorräte nach Substratgruppen</i>  | 214        |
|          | 6.5.7.2 <i>Stickstoffvorräte und Bestand</i>   | 218        |
| 6.5.8    | C/N-Verhältnisse   | 219        |
|          | 6.5.8.1 <i>C/N-Verhältnisse nach Substratgruppen</i>   | 221        |
|          | 6.5.8.2 <i>C/N-Verhältnisse nach Bestandestypen</i>  | 222        |
| <b>7</b> | <b>Flugasche, Düngung, Waldkalkung und Bodenbearbeitung</b>                                  |            |
|          | (Jan Evers, Bernd Ahrends)   | <b>223</b> |
| <b>8</b> | <b>Waldernährung</b> (Inge Dammann, Egbert Schönfelder, Ulrike Talkner, Jan Evers, Uwe Paar) | <b>243</b> |
| 8.1      | Einleitung   | 243        |
| 8.2      | Material und Methoden  | 244        |
| 8.3      | Ergebnisse   | 250        |
| 8.3.1    | Kiefer   | 250        |
|          | 8.3.1.1 <i>Ernährungsstatus 2007</i>   | 250        |
|          | 8.3.1.2 <i>Flugascheeinfluss</i>   | 253        |
|          | 8.3.1.3 <i>Ernährungssituation in den Waldregionen</i>                                       | 254        |
|          | 8.3.1.4 <i>Zeitliche Veränderungen</i>   | 256        |
| 8.3.2    | Eiche  | 260        |
|          | 8.3.2.1 <i>Ernährungsstatus 2007</i>   | 260        |
|          | 8.3.2.2 <i>Ernährungssituation in den Waldregionen</i>                                       | 262        |
| 8.3.3    | Fichte   | 264        |
|          | 8.3.3.1 <i>Ernährungsstatus 2007</i>   | 264        |
|          | 8.3.3.2 <i>Ernährungssituation in den Waldregionen</i>                                       | 266        |
|          | 8.3.3.3 <i>Vergleich 1. und 3. Nadeljabrgang 2007</i>  | 267        |
|          | 8.3.3.4 <i>Zeitliche Veränderungen</i>   | 268        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 8.3.4     | Buche   | 271        |
|           | 8.3.4.1 <i>Ernährungsstatus 2007</i>  | 271        |
|           | 8.3.4.2 <i>Ernährungssituation in den Waldregionen</i>  | 274        |
| 8.4       | Einflussfaktoren auf die Ernährungssituation  | 274        |
| 8.5       | Diskussion und Bewertung der Ernährungssituation  | 279        |
| 8.5.1     | Stickstoffeutrophierung und Bodenversauerung  | 279        |
|           | 8.5.1.1 <i>Stickstoffeutrophierung</i>  | 279        |
|           | 8.5.1.2 <i>Bodenversauerung</i>   | 280        |
| 8.5.2     | Phosphorernährung   | 284        |
| 8.5.3     | Bodenschutzkalkung  | 286        |
| 8.5.4     | Vollbaumnutzung   | 289        |
| 8.6       | Zusammenfassung   | 291        |
| <b>9</b>  | <b>Vegetation</b> (Marcus Schmidt, Egbert Schönfelder, Uwe Paar, Jan Evers)   | <b>293</b> |
| 9.1       | Einführung  | 293        |
| 9.2       | Methodik  | 293        |
|           | 9.2.1 Datenerhebung   | 293        |
|           | 9.2.2 Datenauswertung   | 294        |
|           | 9.2.3 Darstellung und Anwendung der Ergebnisse  | 294        |
| 9.3       | Ergebnisse und Diskussion   | 297        |
|           | 9.3.1 pH(H <sub>2</sub> O)  | 297        |
|           | 9.3.2 Basensättigung  | 301        |
|           | 9.3.3 C/N-Verhältnis  | 305        |
|           | 9.3.4 Basische Kationen (Ca, Mg, K)   | 307        |
|           | 9.3.4.1 <i>Calcium</i>  | 307        |
|           | 9.3.4.2 <i>Magnesium</i>  | 311        |
|           | 9.3.4.3 <i>Kalium</i>   | 313        |
|           | 9.3.5 Ansprache der Nährstoffversorgung mithilfe von Indikatorarten   | 316        |
| <b>10</b> | <b>Hauptergebnisse und Folgerungen für die forstliche Praxis</b>  | <b>319</b> |
|           | (Jan Evers, Inge Dammann, Bernd Ahrends, Uwe Paar)  |            |
| 10.1      | Wie repräsentativ sind die Bodenzustandserhebungen? Sind die Ergebnisse für die wichtigsten Bodensubstrate in den Wäldern aussagekräftig? | 319        |
| 10.2      | Welche Waldböden können unterschieden werden?   | 320        |
|           | 10.2.1 Geologie, Boden und Bodenentwicklung   | 320        |
|           | 10.2.2 Substratgruppen  | 321        |
|           | 10.2.3 Bodentypen   | 322        |
|           | 10.2.4 Auflagehumus   | 322        |
|           | 10.2.5 Trockenrohdichten und Skelettanteile   | 323        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 10.3      | Wie sauer sind die Waldböden? Versauern sie trotz geringerer luftbürtiger Säurebelastungen weiter?   | 324        |
| 10.3.1    | Bewertung  | 327        |
| 10.4      | Wie entwickeln sich die Stickstoffvorräte in Waldböden?  | 327        |
| 10.5      | Tragen Waldböden als Kohlenstoffsенke zum Klimaschutz bei?   | 329        |
| 10.6      | Auf welchen Standorten ist Trockenstress bei Waldbäumen zu erwarten?   | 329        |
| 10.7      | Welche Folgerungen ergeben sich für die Energieholznutzung in Wäldern?   | 330        |
| 10.8      | Welche Folgerungen ergeben sich aus den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung II für die Standortskartierung?  | 331        |
| 10.9      | Wer nutzt die Informationen der Bodenzustandserhebung (BZE als Informationsplattform)? Braucht die forstliche Umweltbeobachtung (Monitoring) eine Bodenzustandserhebung? | 332        |
| 10.9.1    | Informationen aus der Bodenzustandserhebung als Teil des Forstlichen Umweltmonitorings   | 332        |
| 10.9.2    | Nationale/Internationale Partner   | 332        |
| 10.9.3    | Gesellschaft, Politik und Verwaltung   | 333        |
| 10.9.4    | Forstliche Betriebe verschiedener Waldbesitzarten  | 333        |
| 10.9.5    | Wissenschaft   | 334        |
| <b>11</b> | <b>Qualitätssicherung (Nils König)</b>   | <b>335</b> |
| 11.1      | Probenvorbereitung und -analyse  | 335        |
| 11.2      | Methodendokumentation und Qualitätssicherung in den beteiligten Laboren  | 373        |
| 11.2.1    | Umweltlabor der Nordwestdeutschen (früher: Niedersächsischen) Forstlichen Versuchsanstalt Göttingen  | 373        |
| 11.2.2    | Landesanstalt für Forstplanung Brandenburg, Labor Eberswalde   | 374        |
| 11.2.3    | Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL), Standort Kassel (und Vorläufer-Einrichtungen)  | 374        |
| 11.2.4    | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover  | 376        |
| 11.3      | Bundesweites BZE II-Qualitätssicherungsprogramm  | 377        |
| 11.4      | Bedeutung methodisch bedingter Streuungen und Fehlerquellen  | 384        |
| 11.4.1    | Probleme der Probennahme   | 384        |
| 11.4.1.1  | <i>Vergleichbarkeit von Beprobungen der Profilgrube und Satelliten-Borungen</i>  | 384        |
| 11.4.1.2  | <i>Räumliche Variabilität chemischer und physikalischer Kenngrößen</i>   | 384        |
| 11.4.1.3  | <i>Nullpunktdefinition</i>   | 395        |
| 11.4.1.4  | <i>Verschleppung</i>   | 397        |
| 11.4.1.5  | <i>Veränderung der Trockenrobdichte in oberen Bodenschichten („Soufflé-Effekt“)</i>  | 397        |

---

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 11.4.2    | Probleme der Probenanalyse  | 397        |
| 11.4.2.1  | <i>Abschätzung der Streuung chemischer Parameter durch kontinuierliches Mitmessen von Kontrollstandards</i> | 397        |
| 11.4.2.2  | <i>Eingeschränkte Repräsentativität von Teilproben</i>  | 399        |
| <b>12</b> | <b>Aspekte des BZE-Datenmanagements (Andreas Hafner, Jan Evers)</b>   | <b>401</b> |
| 12.1      | Anforderungen   | 401        |
| 12.1.1    | Integration der Merkmalsgruppen   | 401        |
| 12.1.2    | Integration der Datenbestände der Bundesländer  | 402        |
| 12.1.3    | Integration von BZE I und II  | 403        |
| 12.1.4    | Integration von Methodeninformation   | 403        |
| 12.1.5    | Externe Fachinhalte   | 404        |
| 12.2      | Umsetzung   | 405        |
| 12.2.1    | Identifizierung von Informations-Kategorien   | 406        |
| 12.2.2    | Integration der Fach-Arbeitsanleitung   | 406        |
| 12.2.3    | Projektübergreifende Listen mit projektspezifischen Kodierungen   | 407        |
| 12.2.4    | Differenzierung von Fehlwerten  | 408        |
| 12.2.5    | Methodendokumentation der Laboranalytik   | 408        |
| 12.2.6    | Anwendungsprogrammierung  | 409        |
| 12.3      | Praktische Erfahrungen  | 412        |
| 12.4      | Fazit   | 414        |
|           | <b>Literatur</b>  | <b>417</b> |
|           | <b>Glossar und Abkürzungen</b>  | <b>433</b> |
|           | <b>Danksagung</b>   | <b>437</b> |
|           | <b>Autor*innen</b>  | <b>439</b> |



## Vorwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

1966, vor gut 50 Jahren, begann das Solling-Projekt. Das Vorhaben ist untrennbar mit dem Namen von Prof. Dr. Bernhard Ulrich verbunden. Das Solling-Projekt leistete Pionierarbeit auf dem Gebiet der terrestrischen Waldökosystemforschung in Deutschland. Mit dem dafür erarbeiteten Konzept der Bodeninventuren wurde der Grundstein gelegt für die Bodenzustandserhebungen im Wald (BZE) des Bundes und der Bundesländer.

Heute zählen die Messnetze der Forstlichen Umweltkontrolle in Sachsen-Anhalt, Niedersachsen, Hessen und Schleswig-Holstein zum Verantwortungsbereich der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) in Göttingen.

Die BZE arbeitet integrativ. Auf den Beobachtungspunkten werden auch Informationen zum Wasserhaushalt, zur Waldernährung, zum Baumwachstum, zum Waldzustand und zur Bodenvegetation sowie zu biotischen Störungen erhoben. Die BZE wird damit zu einer raum- und zeitbezogenen Darstellung der Entwicklung von Waldökosystemen in Sachsen-Anhalt.

Gegenüber den bisher erschienenen Monografien zu den Waldböden in Hessen und Niedersachsen entstehen in Sachsen-Anhalt wesentliche neue Fragen. So behandelt der Bericht insbesondere die Thematik von Flugasche-Einträgen vorwiegend aus der Braunkohle-Verbrennung. Weiterhin geht der Bericht der Frage nach, wie sich regional hohe Calcium-Einträge auf die Säurebelastung der Waldböden auswirken sowie unter welchen Bedingungen auch heute noch Kalkungs-Empfehlungen relevant sind. Nicht zuletzt sind die Themenbereiche Kohlenstoff und Stickstoff zu nennen. Ergeben sich auch hier Unterschiede zu den Ergebnissen aus den benachbarten Bundesländern? Die Bodenzustandserhebung leistet darüber hinaus eine wesentliche Datengrundlage zur Kohlenstoff Berichterstattung der Europäischen Union.

Sachsen-Anhalt verfügt über eine vollflächige Standortskartierung. Inwieweit können die BZE und hier insbesondere die angewandten chemischen Analyseverfahren eine ergänzende Information für die Standortskartierung darstellen?

Schon heute ist ein großes Interesse an der Beantwortung dieser Fragen erkennbar.

Ein besonderes Augenmerk des Berichts liegt auf Folgerungen für die forstliche Praxis, allen voran Folgerungen für Baumartenwahl im Klimawandel.

Der Bericht über die Waldböden in Sachsen-Anhalt bestätigt das Konzept der Bodenzustandserhebung in den Bundesländern. Es ist deshalb wichtig, die Bodenzustandserhebung als ein periodisch zu wiederholendes Konzept zu verstehen. Anhand der wiederkehrenden Inventuren kann die zeitliche Dynamik von Umwelteinflüssen und die Reaktionsweise der Waldböden beschrieben werden.

Ab 2022 erfolgt eine erneute Beprobung für die neue Bodenzustandserhebung III in Sachsen-Anhalt.

An der Erarbeitung dieses Berichts haben Fachleute aus Wissenschaft und Praxis aus verschiedenen Fachbereichen zusammengearbeitet. Zu nennen sind beispielsweise die Disziplinen Bodenkunde, Forstwissenschaft, Hydrologie, Klimatologie, Geografie, Standortkunde, Chemie, Vegetationskunde, Waldschutz sowie Datenmanagement und Informationstechnologie. Allen, die an der Erarbeitung des Berichts mitgewirkt haben, sei herzlich gedankt.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre des Bodenzustandsberichtes II für den Wald des Bundeslandes Sachsen-Anhalts.



Prof. Dr. Johannes Eichhorn

Abteilungsleiter Forstliche Umweltkontrolle 2006-2021, NW-FVA



# **Waldbodenzustandsbericht für Sachsen-Anhalt – Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)**

Forest soil status report for Saxony-Anhalt – Results of  
the second Forest Soil Inventory (BZE II)

## **Zusammenfassung**

Als Bestandteil des Naturhaushalts in Wäldern spielen Waldböden aufgrund ihrer biologischen und chemischen Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften eine zentrale Rolle als Speicher- und Transformationsmedium gegenüber Umwelteinflüssen. Bodendaten sind deshalb ein zentrales Element des Forstlichen Umweltmonitorings. Die erste Bodenzustandserhebung (BZE I) wurde in Sachsen-Anhalt in der Zeit zwischen 1992 und 1994 durchgeführt. Die Wiederholungsinventur (BZE II) fand schwerpunktmäßig in den Jahren 2006 bis 2008 statt. Beide Erhebungen basieren auf einem systematischen repräsentativen Rasternetz mit insgesamt 78 Aufnahmepunkten.

Bei der BZE II wurden folgende Merkmalsgruppen erfasst: Forstliche Daten und allgemeine Angaben (Punktdaten, raumbezogene Daten, Daten zur Aufnahmesituation und Angaben zu bodenverändernden Ereignissen), Boden (Profilbeschreibung, Bodenchemie inkl. Schwermetalle und Organika sowie Bodenphysik, jeweils getrennt nach Mineralboden und Humusauflage), Nadel-/Blatternäherung, Bestandesdaten, Vitalität (Waldzustandserhebung) und Bodenvegetation. Die Erhebungen und Probenahmen erfolgten nach der bundesweiten Arbeitsanleitung für die BZE II (WELLBROCK et al. 2006). Das umfangreiche Datenmanagement richtete

sich an der Integrierbarkeit der grundlegenden Informations-Kategorien (inhaltliche Merkmalsgruppen wie Erhebungen zum Bestand, Boden, Bodenvegetation sowie Ergebnisse der Laboranalytik; zeitliche Aspekte wie BZE I vs. BZE II; länderübergreifende Betrachtungen; Methoden-Dokumentation zu Beprobungs- und Analyseverfahren) und an der Implementierung zentraler, einheitlicher und übergreifender Verarbeitungs- und Auswertungsfunktionen aus.

Voraussetzung für die Ermittlung zeitlicher Veränderungen bei Folgeinventuren ist grundsätzlich die Anwendung gleicher Erhebungsprinzipien – hier insbesondere Erhebungsraster, Stichprobenkonzept und Methoden. Bei der konzeptionellen Ausgestaltung der BZE II wurden daher möglichst viele methodische Vorgaben aus der BZE I übernommen.

Für länderübergreifende Vergleiche war es weiterhin von Bedeutung, unterschiedliche Definitionen der Standortselemente der Partnerländer der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) zu vereinheitlichen. Dazu wurde durch eine Expertengruppe, bestehend aus Bodenkundlern und erfahrenen Standortskartierern, jedem der BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen eine Substratgruppe zugeordnet. Die Generierung der länderübergreifenden Substratgruppen erfolgte nach den Merkmalen Ausgangssubstrat (Ausgangsgestein), Lagerung (Substrat-Lagerung), Bodenart, Bodenmorphologie und Bodenphysik. Die Substratgruppen sind als operationale Regionalisierungseinheiten anzusehen, d. h. über die Ergebnisse für die Substratgruppen können die Befunde in Größenordnungen in die Standortskartierung und damit in die Fläche übertragen werden. Insgesamt wurden 16 Substratgruppen für Nordwestdeutschland unterschieden. Von den 13 im sachsen-anhaltischen BZE II-Kollektiv ausgeschiedenen Substratgruppen ist der unverlehnte Sand mit 51 % die am häufigsten vorkommende Substratgruppe.

Die prozentuale Verteilung der Substratgruppen innerhalb der BZE II entspricht der Verteilung der wichtigsten Bodeneinheiten im Wald nach den Legenden-einheiten der Bodenübersichtskarte „BÜK 1000 N“ (BGR 2007) recht gut. Auch die Verteilung der Nährstoffgruppen nach der forstlichen Standortskartierung in den Wäldern Sachsen-Anhalts zeigt ein ähnliches Muster wie die BZE II. Die BZE-Stichprobe bildet damit die mittleren Verhältnisse des Waldes in Sachsen-Anhalt insgesamt sehr gut ab. Mit den zusätzlichen Informationen zur Nährstoffversorgung aus der Laboranalyse kann die Trophieeinschätzung an den BZE II-Punkten insgesamt feiner differenziert werden als in der Standortskartierung. So ist die prozentuale Belegung vor allem der eutrophen, aber auch der schwach mesotrophen Nährstoffversorgungs-klassen zu Lasten der mesotrophen und gut mesotrophen Klasse in der BZE II deutlich höher im Vergleich zur Standortskartierung.

24 % der Waldböden in Sachsen-Anhalt weisen zum Zeitpunkt der BZE II Mull als dominierende Humusform auf, was eine rasche Streuzersetzung und gute Humus-Bodendurchmischung durch Bodenwühler anzeigt. Dieser Anteil hat sich im Vergleich zur BZE I deutlich erhöht, zum Zeitpunkt der BZE I betrug dieser Anteil nur 8 %. Der Anteil von BZE-Punkten mit Rohhumus-Humusformen dagegen, der

eine stark reduzierte Streuzersetzung und Einarbeitung in den Mineralboden kennzeichnet, hat sich von 28 % in der BZE I auf 3 % in der BZE II verringert. Damit ist insgesamt eine qualitative Verbesserung der Humusformen in den Waldböden Sachsen-Anhalts festzustellen. Die im Auflagehumus gespeicherte Trockenmasse hat sich jedoch gegenüber der BZE I deutlich erhöht.

### Bodenchemie

Die Analyse der Stoffeinträge in Sachsen-Anhalts Wäldern zeigt eine extrem hohe Belastung der Waldökosysteme durch anthropogen bedingte Stoffeinträge bis Anfang/Mitte der 1990er Jahre. Neben sehr hohen Säureeinträgen sind auch regional sehr unterschiedlich Flugascheeinträge niedergegangen und veränderten die chemische Zusammensetzung der Waldböden erheblich. Die BZE I-Ergebnisse 1992–1994 zeigen für die Mehrzahl der Standorte eine deutliche Versauerung im oberen Mineralboden, eine geringe Ausstattung mit basischen Kationen und hohe Anteile von Aluminium am Austauscherkomplex (FORSTLICHE LANDESANSTALT SACHSEN-ANHALT 1998). Weiterhin waren schon in der BZE I relativ hohe Nährstoffvorräte in der Auflage gespeichert und damit nicht unmittelbar pflanzenverfügbar, Nährstoffkreisläufe damit entkoppelt.

Trotz der im Intensiven Umweltmonitoring Sachsen-Anhalts seitdem beobachteten Abnahme der Stoffeinträge werden die Critical Loads für Säure- und für Stickstoffeinträge nach wie vor an einer Vielzahl von Standorten überschritten. Die Phosphor- und Magnesiumernährung der beobachteten Waldbestände im intensiven Monitoring ist meist defizitär. Rückläufige Trends sind auf den Kiefernflächen u.a. bei Calcium festzustellen. Die deutliche stärkere Abnahme beim Schwefeleintrag im Vergleich zum Stickstoffeintrag hat dazu geführt, dass auf den Versuchsflächen in Sachsen-Anhalt heute mehr als 80 % des Gesamtsäureeintrags durch anorganische Stickstoffeinträge verursacht wird. Dies kann zu Bodenversauerung, Nährelementverlusten mit dem Sickerwasser, Änderungen des Wuchs- und Konkurrenzverhaltens von Waldbäumen, Waldbodenvegetation und Bodenorganismen führen. Eine weitere Reduktion des Stickstoffeintrags ist deshalb auch unter dem Gesichtspunkt Säurebelastung dringend geboten. Waldkalkungen bieten sich daher als Option zur Stabilisierung des Bodenzustandes sowie der Calcium- und Magnesiumernährung an.

Aufgrund der standörtlichen Vielfalt, die von basenreichen Lehmen bis hin zu überwiegend nährstoffarmen Sandstandorten reicht, weisen die bodenchemischen Parameter weite Spannen auf. Für die BZE II-Punkte in Sachsen-Anhalt ergeben sich im Mittel für die effektive Austauschkapazität noch mittel-hohe, für die Basensättigung mittlere, die Calciumvorräte hohe und die Magnesiumvorräte mittel-hohe Bewertungsbereiche. Die Kaliumvorräte befinden sich im mittleren Bereich. Die Böden sind überwiegend dem Austauscher-Pufferbereich zuzuordnen. Die Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte liegen im mittleren Bewertungsbereich. Im Ländervergleich ist die mittlere Nährstoffversorgung der Waldstandorte in Sachsen-Anhalt etwas besser als in Niedersachsen, aber ungünstiger als in Hessen.

Relevante signifikante Veränderungen in der BZE II zur BZE I für Calcium, Magnesium und Kalium konnten nur für Magnesium (-32 %) beim unverlehmten Sand belegt werden. Die Veränderungen beim Kalium sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf fehlerhafte Analysen in der BZE I zurückzuführen.

Durch die Einteilung der Böden in Substratgruppen werden Muster deutlich, die zeigen, wie die bodenchemische Situation je nach Standortseinheit variiert. So befinden sich die Böden aus Granit, Grauwacke und Quarzit unterhalb einer Basensättigung von 20 % und damit lediglich im geringen Bewertungsbereich, wogegen Böden aus Lehm, Zechstein und Lösslehm mit Werten über 60 % Basensättigung in hohe Bewertungsbereiche fallen. Der unverlehmte Sand in Sachsen-Anhalt liegt bei durchschnittlich 26 % Basensättigung im gering-mittleren Bewertungsbereich.

Die bodenchemischen Parameter und deren Dynamik werden in Sachsen-Anhalt stark durch die atmosphärischen Einträge von Flugaschen überlagert. Neben dem Osten des Landes (Landkreise Anhalt-Bitterfeld und Wittenberg) sind die BZE-Punkte im Raum um Bitterfeld besonders betroffen. Hier liegen die Calciumvorräte und die Basensättigung deutlich über den Vergleichswerten des unverlehnten Sandes in Niedersachsen. Weiterhin auffällig für diese Region sind hohe Magnesium-, Kalium-, Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte im Auflagehumus und Mineralboden. Zwischen der BZE I und BZE II wurden Zunahmen der Calcium- und Magnesiumvorräte vor allem im Raum Bitterfeld, für Kalium, Kohlenstoff und Stickstoff auch im Osten und am höchsten im Raum Bitterfeld festgestellt. Diese Einflüsse sind überprägt durch Bodenbearbeitungen wie z. B. mit Streifenpflug, die überall im Osten und häufig auch im Norden des Landes in Wäldern durchgeführt wurden. Auch hier konnten in der BZE höhere Kohlen- und Stickstoffvorräte sowie Zunahmen von der BZE I zur BZE II festgestellt werden. Damit zeigt sich, dass viele Standorte in historisch industriell geprägten Regionen durch sehr hohe anthropogene Stoffanreicherungen gekennzeichnet sind, die teilweise deutlich über dem Niveau naturnaher Systeme liegen dürften. Diese Basenmenge bildet zwar einen Nährstoffpool und Reservoir gegenüber einer weiteren Bodenversauerung, ist aber auch sensitiv gegenüber Auswaschung mit dem Sickerwasser und bei den sonst natürlich als relativ saure Waldstandorte anzusehenden Ökosystemen als starke, tiefwirkende anthropogene Veränderung anzusehen. Es zeigt sich deutlich, wie unterschiedlich je nach Historie bei gleichem Substrat Bodenzustände im Waldboden sein können und wie wichtig bodenchemische Messwerte für die Beurteilung von Beständen und ihren Stoffkreisläufen sind.

Sachsen-anhaltische Waldböden stellen eine bedeutende Kohlenstoffsенке dar. Der mittlere Kohlenstoffvorrat von 130 t pro Hektar im Waldboden (inkl. organisch geprägter Standorte) zeugt von dieser langfristigen Nettospeicherung. Der Auflagehumus hat dabei einen Anteil von rund 20 %. Sehr hohe Kohlenstoffvorräte sind in organisch geprägten Böden gespeichert; hier ist mit Vorräten zwischen 200 und 600 t Kohlenstoff je Hektar zu rechnen. Im Zeitraum zwischen 1993 (BZE I) und 2007 (BZE II) haben die Kohlenstoffvorräte in den Waldböden Sachsen-Anhalts

um insgesamt 20,8 t je Hektar zugenommen (+25 %), dies entspricht einer jährlichen Rate von 1,5 t je Hektar (ohne Moorstandorte, Extreme und methodisch nicht vergleichbaren Werten). In Gebieten mit Flugascheeinfluss und dem Einfluss von Bodenbearbeitung waren die Zunahmen höher.

Bei einem mittleren luftgetragenen Gesamteintrag an anorganischem Stickstoff zwischen 10–16 kg pro Hektar und Jahr für Sachsen-Anhalts Waldbestände in der Zeit von 1993–2007 haben sich die Stickstoffvorräte auf Profilebene im gleichen Zeitraum signifikant erhöht. Im Auflagehumus und Mineralboden bis 30 cm ergab sich eine Zunahme um 1 t je Hektar, was einer Zunahme bezogen auf die BZE I um 16 % und einer jährlichen Zunahme von 70 kg je Jahr und Hektar entspricht. Wie auch beim Kohlenstoff waren diese Zunahmen unter Flugasche und bei Bodenbearbeitung höher.

### Waldernährung

Eine Analyse der Ernährungssituation für Kiefer, Eiche, Fichte und Buche erfolgte an 67 BZE II-Punkten. Ausreichend hohe Nährstoffgehalte und deren harmonische Zusammensetzung sind Voraussetzung für die Vitalität, Stabilität und für das Wachstum von Waldbeständen. Der Ernährungszustand der Waldbäume lässt sich anhand der Nährelementgehalte und -verhältnisse in Nadeln und Blättern charakterisieren.

Hauptbaumart in Sachsen-Anhalt ist die Kiefer. Die Kiefern im BZE-Kollektiv sind 2007 an 26 von 44 Stichprobenpunkten gut (mindestens im Normalbereich) mit den Hauptnährstoffen Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium und Schwefel versorgt und ausgewogen ernährt. An 16 Kiefernpunkten werden latenter Mangel an einem oder mehreren Hauptnährelementen und/oder unausgewogene Stickstoffquotienten vorgefunden. Überwiegend ist dies auf latenten Magnesiummangel und unharmonische N/Mg-Quotienten zurückzuführen. Mangelernährung ist bei der Kiefer selten (2 BZE-Punkte). Unterschiede in der Ernährungssituation der Kiefer zwischen den Substratgruppen zeigen sich für die Magnesiumversorgung.

Eichen, Fichten und Buchen sind mit nur geringer Stichprobenanzahl (10–13) im BZE-Kollektiv vertreten.

Die Ernährungssituation der Eiche ist deutlich angespannter als die der Kiefer. Die Versorgung der Eichen mit den Hauptnährelementen ist 2007 nur an 3 von 13 BZE-Eichenpunkten gut und ausgewogen. Phosphordefizite sind bei der Eiche häufig, zusätzlich tritt (latenter) Magnesiummangel auf. An einem Punkt wird die Mangelgrenze unterschritten.

Nur 2 der 10 BZE-Fichtenpunkte sind ohne (latenten) Mangel an Hauptnährstoffen und weisen ausgewogene Elementverhältnisse auf. Vor allem unausgewogene N/K-Quotienten sind hierfür ausschlaggebend.

Bei der Buche sind besonders häufig Ernährungsdefizite festgestellt worden. An keinem BZE-Punkt wird eine gute und ausgewogene Ernährung festgestellt. Mangeler-nährung zeigt sich dagegen an 4 der 11 Buchenpunkte. Ein Großteil der Buchenbestände weist (latenten) Phosphormangel auf. Zusätzlich besteht eine angespannte Ernährungssituation für Kalium und Magnesium. Analog hierzu sind unausgewogene Stickstoffquotienten weit verbreitet.

Im Vergleich zur BZE I (1992) sind die die Stickstoff- und Calciumgehalte in den Kiefernadeln 2007 angestiegen. Die Magnesium-, Schwefel-, Eisen-, Mangan- und Zinkgehalte haben abgenommen.

Insgesamt bildet die landesweite Inventur 2007 die Veränderungen der anthropogenen Stoffeinträge in Sachsen-Anhalt sehr gut ab. Die Maßnahmen zur Luftreinhaltung haben zu einer deutlichen Absenkung der Schwefelgehalte in den Nadeln geführt. Die Überversorgung aller vier Baumarten mit Stickstoff ist ein Beleg für den immer noch hohen Einfluss anthropogener Stickstoffeinträge in die Wälder.

### Bodenvegetation

Der direkte Vergleich der BZE II-Vegetationsdaten mit den erhobenen bodenchemischen Kenngrößen ermöglichte Analysen zu den Zusammenhängen zwischen der Pflanzenartenzusammensetzung der Waldbestände und dem Bodenzustand (pH(H<sub>2</sub>O)), der Basensättigung und dem C/N-Verhältnis sowie zu den austauschbaren Vorräten der basischen Kationen Calcium, Magnesium und Kalium aus der effektiven Kationenaustauschkapazität, jeweils bezogen auf den mineralischen Oberboden (0–5 cm Bodentiefe). Auf der Grundlage dieser Ergebnisse konnten Zeigerarten identifiziert werden, die operationale Hilfestellungen für die Trophieabschätzung von Waldstandorten in Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Bremen bieten.

### Standortskartierung

Bodenchemische Analysen sind von besonderer Wichtigkeit für eine differenzierte Standortdiagnostik. Sie können die Nährstoffeinschätzung der Standortskartierung präzisieren, um das standörtliche Potenzial einzelner Standorte besser abschätzen zu können. Dadurch lassen sich forstliche Maßnahmen (u. a. Baumartenwahl, Waldkalkungen und Vollbaumnutzungen) näher am Standortspotenzial orientieren und nachhaltiger ausrichten.

Die Themenschwerpunkte Schwermetalle, Organika und Bestandeswachstum werden in gesonderten Veröffentlichungen publiziert.

**Stichworte:** Bodenzustandserhebung, Flugasche, Substratgruppen, Waldernährung, Waldvegetation, Kohlenstoff

## Abstract

Soils provide a multifaceted and vital role in forest ecosystem function, as they sequester vast amounts of carbon, supply nutrients and water to trees and vegetation, provide a physical support for vegetation, and act as a chemical and biological filter that can help offset different anthropogenic influences. Monitoring the state of forest soils in regular and systematic soil inventories are critical to understanding how forests are changing over time, and also to assess the sustainability of different environmental services soils provide. As part of the German forest soil inventory program (called the Bodenzustandserhebung “BZE”), sampling activities have been carried out twice in Saxony-Anhalt. The first forest soil survey (BZE I) was conducted in 1992 and 1994 and the second (BZE II) was conducted between 2006 and 2008. Both inventories were established on the same systematic 8 x 8 km grid and consisted of a total of 78 sampling plots. At each plot, samples were taken at the same depth increments, namely from the forest floor and from the mineral soil at 0–5, 5–10, 10–30, 30–60 and 60–90 cm depth increments. In the BZE II data on the following characteristics were collected: (1) forest stand information (species compositions, age distributions), (2) soil chemical and physical parameters (for both the forest floor layer and mineral soil) including soil profile descriptions, soil chemistry including heavy metals and organics), (3) foliar nutrient status (from sun-lit leaves), forest stand information (tree density and biomass), tree vitality (based on a forest condition survey) (4) forest floor vegetation and (5) other general site information (such as coordinates, elevation, aspect, slope and information on soil changing events). The inventory and sample collection followed the methods described in the national field survey guide for the BZE II (Wellbrock et al. 2006). Collected and measured data from both BZE I and BZE II were integrated into a comprehensive database (called ECO). In the framework of this standardised dataset, changes in soil properties and forest parameters could be quantified between the BZE I and BZE II. This is possible because the same basic monitoring principles were used in both forest soil inventories. Namely the same locations were resampled, as well as the same field and laboratory methods applied. In designing the BZE II, most of the methodical specifications were adopted from the BZE I.

To compare results between the forest site mapping systems of the federal states it was important to standardise the different site element definitions of the four Northwest German Forest Research Institute (NW-FVA) partner states (Saxony-Anhalt, Lower Saxony, Schleswig-Holstein and Hesse). Through a panel of experts, consisting of soil scientists and experienced soil characteristics each of the BZE plots in the four states were assigned to a substrate group. The generation of substrate groups common to all the federal states was based on the following characteristics: initial substrate (geology), stratification (substrate stratification), soil texture, soil morphology and soil physical properties. The substrate groups can be considered as representative operational regionalising units suitable for upscaling. In total, 16 sub-

strate groups were identified for northwest Germany, of which 13 are found in Saxony-Anhalt. Here, pure sand was the most frequent substrate group present accounting for 51 % of the plots (40 of the 78 plots).

Overall, the BZE II plots were quite representative of the forests and soil conditions found across Saxony-Anhalt. First, the substrate group classifications where BZE II sampling locations were located corresponded well with the distribution of the most important soil types found in Saxony-Anhalt based on the comparison with the national soil map “BÜK 1000 N”; BGR 2007. Next, the distribution of six soil trophic levels (from rich to poor) on the forestry site maps for the forests in Saxony-Anhalt show correspondingly similar patterns to those of BZE II measurements concerning the nutrient status of the soil. With the additional information on nutrient status gathered from laboratory analyses, the estimation of trophic levels differentiate more finely at the BZE II sample plots than on site maps. For this reason, the percentage of sites with “eutrophic” and “weak mesotrophic” nutrient regimes increased and both “good mesotrophic” and “mesotrophic” classes decreased in the BZE II, in comparison with the forest site maps. At the time of the BZE II, 24 % of the forest soils in Saxony-Anhalt had “mull” as the dominant humus form, which indicates rapid litter decomposition and good humus-soil mixing and bioturbation. This proportion increased significantly since BZE I, where “mull” soils were only found at 8 % of the sites. Correspondingly, the proportion of BZE points with “raw” humus (where litter decomposition is severely constrained) decreased from 28 % in BZE I to 3 % in BZE II. Thus, an overall qualitative improvement of the humus forms in the forest soils of Saxony-Anhalt can be observed. However, the dry organic matter stored in the humus has clearly increased compared to the BZE I.

### Soil chemistry

During the early to mid-1990s atmospheric deposition of different anthropogenic pollutants was very high on Saxony-Anhalt forests. In addition to acid deposition, also fly-ash deposition from brown coal power plants directly affected the chemical composition of forest soils. The BZE I results from 1990–1991 show evidence that a large majority of the sites had experienced varying degrees of acidification in the upper mineral soil. Additionally, soils often had a relatively low effective cation exchange capacity, where a high proportion of aluminium occupied the exchange complexes (FORSTLICHE LANDESANSTALT SACHSEN-ANHALT 1998). During this time considerable quantities of nutrients accumulated in the forest floor layer and accordingly are not available to plants, which effectively meant that nutrient cycling rates were constrained.

Despite decreases in atmospheric deposition in Saxony-Anhalt since the 1990s, critical loads of acidic compounds and nitrogen inputs remained significant at a large number of BZE sites. At these plots, evidence of phosphorus and magnesium deficiencies in forest stands was recorded. Moreover, soil calcium decreases were rec-



ordered in many pine forest sites. The comparatively strong declines in sulphur deposition compared to nitrogen inputs means that 80 % of the total acid inputs are derived from inorganic nitrogen inputs. These depositions have led to further increases in soil acidification, nutrient leaching losses, changes in tree growth, and changes in competition between trees, shrubs, herbs and soil organisms. A further reduction of N inputs is urgently required to ameliorate future soil acidification. To counteract acidification processes, forest liming recognized as an important tool to mitigate further acidification and stabilize soil calcium and magnesium nutrition.

Given the broad range of soils found in Saxony-Anhalt (which range from base-rich loams to nutrient-poor sands) the nutritional status and other chemical parameters correspondingly varied widely. On average, across the BZE II plots, the effective cation exchange capacity ranged from medium to high, with medium base saturation levels, generally high calcium stocks, medium to high magnesium stocks and medium potassium stocks. The soils are predominantly in the exchange-buffer range and there were medium levels of carbon and nitrogen stocks. In terms of soil nutrient status, the forest soils in Saxony-Anhalt were somewhat better than those in Lower-Saxony, but slightly worse than soils in Hesse.

When BZE II results were compared with the first forest soil inventory (BZE I), we found that there were significant changes in calcium, magnesium and potassium stocks over time, whereby decreases in magnesium stocks were only evident at pure sand sites (-32 % loss). Next, the increases in potassium stocks are likely artefacts due to possible erroneous laboratory analyses done in the BZE I.

The substrate group classifications were characterised by clear differences in soil chemistry. For instance, soils on granite, greywacke, quartzite and pure sand had low base saturation (~20 %), while loam soils and sites on Upper Permian had comparatively high base saturation (~60 %).

The atmogetic inputs of fly ash have strongly affected soil chemical parameters in the eastern part Saxony-Anhalt, particularly in the Anhalt-Bitterfeld and Wittenberg districts. In this area, both calcium stocks and base saturation are considerably higher than comparative values of pure sand sites found in Lower Saxony. Furthermore, magnesium, potassium, carbon and nitrogen stocks in both the forest floor and mineral soil are conspicuously high for this region. Moreover, both calcium and magnesium stocks increased throughout the Bitterfeld area in the period between the two forest soil surveys (BZE I and II). Likewise, potassium, carbon and nitrogen also increased in the east part of the state and were highest in the area around Bitterfeld. Interestingly, these influences are more pronounced at sites which had been tilled (strip ploughing) in the past, a practice that was carried out throughout much of eastern Germany and in some areas to the north of the country. The resulting changes in soil parameters from fly ash deposition show how industrial regions in Saxony-Anhalt are characterised by high accumulations of anthropogenically produced compounds. Although the addition of base cations may contribute positively to the forest soil nutrient pool and mitigate against further soil acidification, it will

however have increased base cation leaching losses. In the case of naturally acidic ecosystems, these depositions will likely have caused significant changes in both soil and ecosystem dynamics.

Results from the BZE II show that Saxony-Anhalt forest soils sequester significant amounts of carbon, storing on average 130 tons of carbon per hectare (incl. organic soils) in the top 90 cm of soil, where 20 % of the carbon is concentrated in the forest floor layer. Organic soils store between 200 and 600 t of carbon per hectare. In the period between 1993 (BZE I) and 2007 (BZE II), the carbon stocks increased by 20,8 t per hectare (an increase of 25 %), corresponding to an increase of 1,5 t of carbon per hectare per year (excluding peatland sites, extremes and methodologically non-comparable values). In areas with high fly ash deposition and tillage, carbon accumulations were even higher.

Inorganic nitrogen deposition rates increased significantly between 1993 and 2007 to 10–16 kg per hectare per year, and as a result, the soil nitrogen stock increase by 1 t per hectare in the top 30 cm, corresponding to a 16 % increase in relation to the BZE I. Like soil carbon, these increases were more pronounced at sites with high fly ash deposition and at sites that had been ploughed in the past.

#### Forest nutrition

Sufficient nutrient quantities in combination with a balanced nutrient stoichiometry are prerequisites for tree vitality and growth and stability of forest stands. The nutritional status of trees are characterised by both the nutrient element contents as well as nutrient ratios in needles and leaves. In the BZE II, leaf/needle samples of pine, oak, spruce and beech trees were measured at 67 of the 78 plots to assess the nutritional condition of the trees.

The common pine (*Pinus sylvestris* L.) is the most dominant tree species in Saxony-Anhalt. In 2007 (the year the leaf or needle samples were collected), pine trees were adequately supplied (within the normal range) with nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium and sulphur at 26 of 44 sampling points where pine trees were found. Latent deficiencies of one or more nutrients and/or unbalanced nitrogen ratios were measured at 16 points of the 44 points and is predominantly due to latent magnesium deficiencies and imbalanced N/Mg ratios. Although nutrient deficiencies in pine are rare, two BZE points exhibited low magnesium supply.

In contrast to pine, there were comparatively few sites where oak, spruce or beech pine trees were present (only 10 to 13 sites depending on these tree species). For all three species, nutrient deficiencies were a widespread problem. First, nutrient deficiencies were evident in oak trees at 10 of the 13 sites, where phosphorus and (latent) magnesium deficiencies were measured. At one plot the nutrient concentration of magnesium fell below the deficiency threshold. Second, the nutritional status of beech trees was sub-optimal at all BZE points, of which 4 of the 11 beech points were considered malnourished. A large number of the beech stands exhibited (latent)

phosphorus deficiencies as well as low potassium and magnesium levels. Analogously, unbalanced nitrogen ratios are a widespread problem in beech stands across the state. Lastly, only 2 of the 10 BZE spruce plots did not exhibit either (latent) deficiencies of main nutrients or elemental imbalances (most frequent N/K).

Overall, the 2007 state-wide inventory provides an excellent assessment of the effects anthropogenic deposition have had on the forests in Saxony-Anhalt. Compared to the first BZE (1992), nitrogen contents in pine needles increased in the second BZE (2007), reflecting the persistent effects of elevated N deposition on the forests from industrial and agro-industrial sources. On the other hand, clean air policies and air pollution control measures have led to a clear reduction in the sulphur contents in pine needles. During the time period between the two surveys, increases in pine needle calcium concentrations were observed as well as decreases in magnesium, iron, manganese and zinc contents.

#### Forest floor vegetation

An examination of the relationship between understory vegetation and soil chemistry, was used to identify indicator species that are representative of different forest trophic levels. This analysis assessed how soil chemical parameters, namely, soil pH(H<sub>2</sub>O), soil C/N ratio, exchangeable base cations and base saturation in the top-soil (0–5 cm) were correlated with understory vegetation communities across north-western Germany (Saxony-Anhalt, Lower Saxony, Hesse, Schleswig-Holstein and Bremen).

#### Site mapping

Soil chemical analyses are especially useful for supporting site diagnostic evaluations, in that they can improve nutrient availability estimates in forest mapping exercises and support sustainable forest management planning decisions (e.g. tree species selection, forest liming and whole-tree harvest operations).

**Keywords:** Forest soil inventory, fly ash, substrate groups, forest nutrition, forest floor vegetation, carbon sequestration



# 1 Überblick: Bewertung und Diskussion der bodenkundlichen Ergebnisse

*Jan Evers, Uwe Paar*

## 1.1 Vorbemerkungen und Rahmenbedingungen

Der forstliche Standort ist definiert als die „Gesamtheit der für das Wachstum der Waldbäume wichtigen Umweltbedingungen, wie sie im Gelände durch Lage, Klima und Boden bestimmt wird“ (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Insofern ist die Kenntnis der Böden, ihrer Entwicklung und Gefährdung sowie der Einflussfaktoren, die auf sie wirken, die Grundlage für eine multifunktionale, standorts- und klimaangepasste nachhaltige Forstwirtschaft.

Wälder in Deutschland wachsen auf Böden, deren Vielfalt durch die verschiedensten geologischen Ausgangsgesteine, Umlagerungen und Bodenentwicklungen geprägt ist. Waldböden tendieren in Mitteleuropa „von Natur aus“ durch die Bildung von Kohlensäure und organischen Säuren dazu, allmählich zu versauern, sofern keine ausreichende Säurepufferung durch Verwitterung erfolgt. Neben diesen natürlichen Prozessen hat der Mensch direkt und indirekt insbesondere in Sachsen-Anhalt in der Vergangenheit einen erheblichen Einfluss auf die Waldböden ausgeübt, der weit über die natürliche Versauerung hinausgeht. Als Folge zwischeneiszeitlicher Verwitterungsprozesse und starker Übernutzung in vorindustrieller Zeit sind die Waldböden, vor allem die Oberböden, häufig deutlich versauert. Mit der Industrialisierung, der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung und den zusätzlichen hohen luftbürtigen Säure- und Stickstoffeinträgen ist die Versauerung auch in die Unterböden vorgedrungen. Dieser Prozess wurde regional noch verstärkt durch die früher weit verbreitete Entnahme von Waldstreu, die Plaggennutzung und die Waldweide für die Versorgung der Bevölkerung mit landwirtschaftlichen Produkten. Der damit einhergehende Biomasseexport führte zu weiterer Nährstoffverarmung der Waldböden.

Bis zur Wende wurden regional im Bereich größerer Industriekomplexe und der Kohlekraftwerke zusätzlich basische Stäube und Schwefel sowie Schwermetalle und organische Schadstoffe in die Waldböden eingetragen. Zusätzlich sind für viele Waldstandorte die heutigen Stickstoffeinträge zu hoch, es kommt zur Eutrophierung und zu Nitratausträgen mit dem Sickerwasser in das Grundwasser.

Die Belastung der Böden durch den Schwefeleintrag ist aufgrund der Luftreinhaltemaßnahmen deutlich zurückgegangen; allerdings sind in den Böden noch erhebliche Säuremengen (Altlasten) gespeichert. Regelmäßige Bodenuntersuchungen im Rahmen von Übersichtserhebungen und des intensiven Monitorings sowie auf Versuchsflächen der Forstlichen Umweltkontrolle sind deshalb von besonderer

Wichtigkeit, um Bodenveränderungen und –prozesse zu dokumentieren, zu verstehen und Therapiemaßnahmen einzuleiten.

Vor dem Hintergrund der aufgezeigten Einflussfaktoren auf die Waldböden ist ein wesentliches Ziel der Waldbodenzustandserhebungen, den aktuellen Bodenzustand zu beschreiben und zu bewerten sowie bodenkundliche Veränderungen zahlenmäßig in Raum und Zeit abzubilden. Die Bodenzustandserhebungen sollen zu einem vertieften Verständnis von Ausmaß, Fortschritt und Ursachen der chemischen und physikalischen Bodenveränderungen beitragen. Daraus ergibt sich auch die Notwendigkeit, Standortbedingungen als Grundlage forstlichen Handelns in Zukunft präziser zu fassen.

### 1.1.1 *Ländlicher Versorgungswald und Waldboden*

Sachsen-Anhalt war nacheiszeitlich vor stärkerer Besiedelung überwiegend von Eichenmischwald bedeckt. Die ersten Besiedlungen begannen in der Bronzezeit 2000–800 v. Chr. entlang der Flüsse und im Steppenwald des mitteldeutschen Trockengebietes mit Rodungen von Löss- und Auenböden. Nach der Völkerwanderung setzten weitere Waldrodungen ein, die erst im 13. Jahrhundert zum Abschluss kamen. Daraus hat sich die heutige Wald-Feldverteilung entwickelt. Ackerbau und Viehzucht drängten den Wald auf die unwirtlichen, schlecht zu bearbeitenden und nährstoffärmeren Standorte zurück. Der Nutzungsdruck auf den Wald war durch Waldweide, Schweinemast, Köhlerei, Bergbau, Holzlieferung für Bau- und Brennzwecke, Harz, Rinde für die Gerberei und Jagd hoch (SCHWANECKE u. KOPP 1994).

Im Mittelalter erreichte der Waldanteil infolge der Landnutzung seinen Tiefstand. Viele Acker- und Siedlungsflächen mussten im Spätmittelalter aufgegeben werden, zum einen aufgrund nachlassender Leistungskraft der eher nährstoffarmen Sandböden, zum anderen durch klimatische Veränderungen der Kleinen Eiszeit 1500–1850 n. Chr., Seuchen und Kriege. Hier breitete sich der Wald wieder aus (FISCHER et al. 2020).

Bis ins 18. Jahrhundert war Wald als ländlicher Versorgungswald (Prinzip der Bedarfsdeckung) essentieller Bestandteil des ländlichen Lebens. Neben der Produktion von Holz war die Nutzung anderer Güter aus dem Wald bedeutend, besonders die enorme Bedeutung der Eichelmast für die Landwirtschaft ließ in dieser Zeit die Holzproduktion zurücktreten. Die Waldweide ersetzte die nur knapp verfügbare Offenlandweide, die Eichelschweinemast das knappe Schweinefutter, die Waldstreunutzung das fehlende Stroh, die Futterlaubgewinnung den Heuengpass und der Waldfeldbau den Mangel an Ackerfläche und Dünger. Köhlerei produzierte Holzkohle als Hochtemperatur-Energiequelle (FISCHER et al. 2020, HMLWLFN 1994, STUBER u. BÜRGI 2011).

Die historische Bedeutung der landwirtschaftlichen Nutzungen im ländlichen Versorgungswald kann kaum überschätzt werden. Hohe Nährstoffentzüge vor allem

durch die Waldweide, Waldbrände und Verbiss durch Weidevieh verursachten starke Schäden.

Diese Waldinanspruchnahme verursachte Veränderungen der Standorte und des Stoffhaushalts, die teilweise bis heute nachwirken. Langjährige Nutzungen der Waldstreu in Kiefernforsten verstärkte den Nährstoffmangel ärmerer Waldböden, wie z. B. in Bärenthoren, der Altmark und Dübener Heide (FISCHER et al. 2020). Durch Waldstreu wurden beispielsweise bis zu 2.000 kg N/ha (KREUTZER 1972) entnommen.

Die Waldgebiete im Harz sind eng mit dem Bergbau verknüpft. Der vormalig dichte Harzwald wurde zurückgedrängt, die Wälder übernutzt. Um 1800 gab es kaum noch überständiges Holz im Harz. Der Erlass von Holzordnungen erhöhte die Umtriebszeiten und führte Schonzeiten vor Vieheintrieb ein. Dennoch wurde die Buche zu Gunsten der Fichte zurückgedrängt und Fichtenforste zur Versorgung des Bergbaus bestimmten die Waldbilder (FISCHER et al. 2020). Teilweise hohe Schwermetallkonzentrationen in den Waldböden des Harzes zeugen noch heute von den Folgen des damaligen Bergbaus (DOBLER 1999).

### 1.1.2 Säureeintrag und Waldböden

Mitte der 1970er-Jahre erreichte die Belastung der Wälder durch die aus der Nutzung fossiler Energieträger emittierten Luftschadstoffe Schwefel und Stickstoff ihren Höhepunkt.

ULRICH et al. (1979) wiesen auf Grundlage zehnjähriger Messreihen zum Stoffhaushalt von Wäldern im Solling (Niedersachsen) nach, dass in einer als Reinluftgebiet ausgewiesenen Region, fernab von Siedlungen und Industrie, hohe atmogene Säure- und Stickstoffbelastungen aus der Luft auftraten. Diese Einträge führten nachweisbar zu einer fortlaufenden Versauerung der Böden unter Freisetzung toxisch wirkender Substanzen, zur Verarmung der Böden an den Nährstoffen Magnesium, Calcium und Kalium bei gleichzeitiger Stickstoff-Eutrophierung der Waldökosysteme (BEESE 1992).

Die Reaktionsmuster der Böden auf Stoffeinträge unterschieden sich auf verschiedenen Standorten vor allem nach ihrem chemischen und biologischen Ausgangszustand. ULRICH (1981) beschrieb diese Muster als Puffersysteme. Er entwickelte zudem ein methodisches Konzept von Untersuchungsverfahren und Kriterien zur Bewertung der Versauerung und ihrer Folgen in Waldökosystemen (ULRICH et al. 1984).

Wesentlich geprägt durch die Ergebnisse der Waldökosystemforschung in Göttingen fand Ende der 1970er- und Anfang der 1980er-Jahre eine politische Entscheidungsfindung zur Verbesserung der Luftqualität statt. Die Genfer Luftreinhaltkonvention der Vereinten Nationen UNECE (1979) und die Großfeuerungsanlagen-Verordnung (BIMSCHV 2013) bewirkten den drastischen Rückgang der SO<sub>2</sub>-Emis-

sionen. Ein verändertes waldbauliches Grundverständnis im Sinne eines an natürliche Prozesse angenäherten Waldbaus (Leitlinie Wald 2014, MLU 2014 für Sachsen-Anhalt, LÖWE-Programm NLR 1991, ML 2013 und NLF 2016 für Niedersachsen) in Verbindung mit Bodenschutzkalkungen stützte den Zustand der Wälder in einer Zeit hoher Säureeinträge. Mit dem Nachlassen der Säureeinträge stellte sich eine Entlastung der Waldböden ein. Nachwirkungen der hohen Säureeinträge zeigen sich allerdings bis heute in bodenchemischen Prozessen des Schwefel- und Säurehaushalts der Waldböden.

### *1.1.3 Veränderungen des Stickstoffhaushaltes und Waldböden*

In früheren Zeiten war Stickstoff stets ein Mangellement für forstliche Standorte. Durch Wald- und Streunutzungen verarmten die forstlichen Standorte an diesem Element. Im 20. Jahrhundert stiegen jedoch die Stickstoffeinträge aus der Verbrennung fossiler Energieträger und aus der intensiven Landwirtschaft an und erreichten Ende der 1970er-Jahre maximale Werte. In den nachfolgenden Jahrzehnten sind Reduktionen der zu hohen Einträge nachweisbar (ANDREAE et al. 2016). Stickstoff hat in Wäldern eine Zweigesichtigkeit (SRU 2015). Er fördert das Wachstum, verändert aber gravierend eine Vielzahl standörtlicher Bedingungen (EICHHORN 1995, KÖLLING 1991, DE VRIES et al. 2007).

### *1.1.4 Klimaveränderungen und Waldböden*

Auf Basis der Messdaten von rund 125 sachsen-anhaltischen Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zeigt sich beim Vergleich der Referenzperiode 1961–1990 gegenüber der aktuellen Periode 1991–2020 eine signifikante Erwärmung für das Vegetationsjahr von Oktober bis September. Die Jahresmitteltemperatur ist im Periodenvergleich von 8,5 °C auf 9,6 °C angestiegen: In allen Monaten hat sich die Temperatur im Zeitraum 1991–2020 gegenüber der Periode 1961–1990 erhöht, besonders deutlich in den Monaten Januar bis April, Juli und August. Bei den Niederschlägen kam es zu einer leichten Zunahme der Jahressumme von 566 mm in der Periode 1961–1990 auf 593 mm in der Periode 1991–2020. Dabei ist besonders der Juli feuchter und der April trockener geworden, jeweils gegenüber der Periode 1961–1990. Weiterhin zeigt sich eine Tendenz zu wärmeren und trockeneren Klimabedingungen im Frühjahr und Frühsommer in Sachsen-Anhalt. Dies entspricht auch den Ergebnissen der meisten Klimamodelle. Eine von den Modellen erwartete Verschiebung der Niederschläge in die Wintermonate konnte für Sachsen-Anhalt bisher nicht festgestellt werden (SUTMÖLLER 2020).

Klimaänderungen wirken sich auf den Stoffhaushalt und den Wasserhaushalt von Waldböden aus. Neben der Verfügbarkeit von Nährstoffen ist eine ausreichende Wasserversorgung Grundvoraussetzung für das Wachstum der Wälder. Infolge der extremen Trockenjahre 2018–2020 im Vergleich zum langjährigen Mittel



trat das Wasserangebot als limitierender Faktor für den Zuwachs der Bäume in Erscheinung. Seit 2018 haben extreme Witterungsbedingungen mit Hitzeperioden, Trockenheit und heftigen Stürmen zu Schäden in den Wäldern geführt, wie sie seit Jahrzehnten nicht beobachtet wurden. Der projizierte Klimawandel lässt aus heutiger Sicht für Sachsen-Anhalt eine weitere Zunahme der Lufttemperatur während der Vegetationsperiode erwarten. Bisher setzt sich der langfristige Erwärmungstrend in Sachsen-Anhalt ungehindert fort, die meisten Monate waren in der jüngeren Vergangenheit teilweise deutlich zu trocken. Regional bestehen jedoch deutliche Unterschiede, so war der äußerste Nordwesten 2020 überdurchschnittlich nass und der Harz trockener (SUTMÖLLER 2020). Besonders in den warmen und niederschlagsarmen Gebieten Sachsens-Anhalts wird mit weiteren Ausfällen und Schäden in Waldbeständen zu rechnen sein. Das Ausmaß, die räumliche und zeitliche Verteilung sowie die Geschwindigkeit des Klimawandels werden die Anpassungsfähigkeit der Bestände überschreiten. Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl im Land Sachsen-Anhalt sind von der NW-FVA erarbeitet worden (HAMKENS et al. 2020).

## 1.2 Repräsentativität der Bodenzustandserhebungen

Die Bodenzustandserhebung ist wie die Waldzustandserhebung (WZE) ein Stichprobenverfahren, das die gesamte Waldfläche des Landes Sachsen-Anhalt umfasst. Inwieweit die Ergebnisse der BZE II als repräsentativ für die Waldfläche Sachsens-Anhalts angesehen werden dürfen, wurde über den Vergleich mit der nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte (BÜK 1000 N; BGR 2007) und durch die Gegenüberstellung der Standortselemente „Trophie“ für die Waldfläche in Sachsen-Anhalt mit Ergebnissen der sachsen-anhaltischen Standortkartierung überprüft.

Der Vergleich mit der BÜK 1000 N und der Verteilung der Substratgruppen in der BZE II zeigt eine recht gute Übereinstimmung. Die in der BZE II mit 53 % Anteil häufigste Substratgruppe der unverlehnten Sande in Sachsen-Anhalt findet sich in der BÜK 1000 mit 48 % gut vergleichbar wieder. Auch die Anteile der schwach- und verlehnten Sande mit 11 % in der BZE II sind gut vergleichbar mit 10 % Anteilen in der BÜK 1000 zu finden, die Anteile der Lösslehme jeweils mit 11 % ebenso. Die Substrate Tonschiefer, Granit und Grauwacke sind in der BÜK1000 nicht eindeutig zugeordnet, daher ist ein Vergleich mit der BZE II nicht möglich.

Vergleicht man die Verteilung der Trophiestufen der BZE-Punkte nach den Polygonen der forstlichen Standortkartierung, in denen die BZE-Punkte liegen, mit der Verteilung nach der forstlichen Standortkartierung für den Gesamtwald in Sachsen-Anhalt, so dokumentieren die Ergebnisse eine bemerkenswert hohe Übereinstimmung und damit eine gute Repräsentativität des BZE-Rasternetzes. Es hat sich aber auch gezeigt, dass die Einbeziehung der chemischen Analyseergebnisse der Bodenfestphase bei der Trophiebewertung der BZE-Punkte zu einer anderen

Verteilung der Trophiestufen an den BZE-Punkten führt und damit die forstlichen Standorte präziser einordnet. Danach sind die eutrophen Standorte in der Standortskartierung deutlich unterschätzt, die kräftigen Standorte überschätzt, die mittleren Standorte deutlich überschätzt und die ziemlich schwachen Standorte deutlich unterschätzt. Nur die armen Standorte bestätigten sich auch unter Einbeziehung der bodenchemischen Analysen.

### 1.3 Geologie, Boden und Bodenentwicklung

Das Land Sachsen-Anhalt ist durch drei wesentliche Standortsregionen geprägt: dem Tiefland im Norden und Nordosten, dem Hügelland in der Mitte des Landes und dem Mittelgebirge mit dem Harz und Kyffhäuser im Südwesten. Die meisten Waldstandorte liegen im Tiefland mit 70 % der Waldfläche, gefolgt vom Mittelgebirge mit 19 % und dem Hügelland mit 11 %. Die geologischen und bodenkundlichen Verhältnisse der Wuchsgebiete sind im Folgenden beschrieben (nach SCHWANECKE u. KOPP 1994):

Das *Tiefland* wird von glazialen und fluvioglazialen Ablagerungen der letzten Eiszeiten geprägt, vor allem der Warthevereisung. Dies sind intensiv verwitterte, eher nährstoffarme Grund- und Endmoränen, Sander und Talsande, die vorwiegend aus sandigen Böden bestehen. Es herrschen tief entkalkte Sand-Braunerden und Tieflehm-Fahlerden mit mittlerer Nährstoffversorgung sowie ärmere Sand-Podsole vor. Auf den Grundmoränenplatten kommen auch Lehm- und Tieflehm-Staugleye vor. Holozäne Auen der Talniederungen begleiten den Lauf der Elbe und ihrer Nebenflüsse. Vor allem im Raum Bitterfeld und Dübener Heide hat der ehemalige Braunkohleabbau und der einhergehende Flugascheneintrag durch Verbrennung der Kohle in Kraftwerken, Industrie und Haushalten die Böden stark beeinflusst.

Das Tiefland umfasst die forstlichen Wuchsgebiete:

- Das *Ostniedersächsisch-Altmärkische Altmoränenland* mit überwiegend mäßig nährstoffversorgten Sand-Braunerden, z. T. lehmbeeinflusst und pseudovergleyt, sowie ärmeren Sanderflächen mit Braunerde-Podsolen, in Niederungen Sand-Gleye, Gleypodsole und Flachmoorbildungen und reicheren Auen im Elbtal;
- das weichselkaltzeitlich entstandene *Mittelbrandenburgische Talsand- und Moränenland*, welches überwiegend durch ärmere grundwasserbeeinflusste Sande und Braunerde-Podsole auf Sandern sowie durch lehmbeeinflusste Braunerden mit mittlerer Nährstoffversorgung auf den Moränen geprägt ist;
- das *Mittlere Nordostdeutsche Altmoränenland* mit vorherrschenden ärmeren Sanden, mäßig nährstoffversorgten lehmigen Sanden sowie Lehmen mit Braunerden, Sand-Gleyen und Moorbildungen in den Niederungen sowie reicheren Auen in der Elbtalniederung;
- den *Hohen Fläming* mit mittleren bis ärmeren Sanden und lehmigen Sanden sowie Lehmen als Braunerden und Braunerde-Podsolen;

- die *Dübener Heide* im Bereich der Moränen mit mittleren Sand-Braunerden, auf den Sanderflächen mit mittleren bis ärmeren Sand-Braunerden und Sand-Braunpodsolon sowie kleinflächig vorkommenden Mooren. Die Böden sind in Folge des basischen Flugascheeintrages z. T. eutrophiert.

Das *Hügelland*, weitgehend mit Löss bedeckt, ist Teil des mitteleuropäischen Lössgürtels und wird überwiegend landwirtschaftlich genutzt. Je nach Mächtigkeit der Lagen und Klimaeinfluss bildeten sich Fahlerden, Parabraunerden und Schwarzerden aus. Es gibt aber auch Sandstein-Podsole, Rendzinen, gleyartige Schwemmböden und Auen. Die Waldstandorte im Hügelland sind überwiegend gut mit Nährstoffen versorgt.

Das Hügelland umfasst die folgenden Wuchsbezirke:

- Das *Nordwestliche Harzvorland* ist geologisch durch Ablagerungen der subherzynischen Scholle (Kreide, Jura, Trias) über Zechstein sowie im nördlichen Bereich durch Grauwacke und den rotliegenden Porphyren geprägt. Im Süden des Wuchsgebietes beherrschen Lössdecken das Bild. Entsprechend vielseitig sind die Böden: kräftige Braunerden, Parabraunerden und Fahlerden, im Norden auch ärmere Böden auf pleistozänen Sanden und Lehmen. Auf Muschelkalk-Rücken kommen auch flachgründige Rendzinen vor.
- Die *Nordöstlichen Harzvorländer*: hier herrschen landwirtschaftlich genutzte Lössböden vor, die in den östlichen Teilen in Schwarzerden übergehen können. Forstböden sind auf die ärmeren Sandgebiete und Höhenrücken beschränkt. Im bewaldeten Hakel kommen Deckton-Braunerden vor. Auf Muschelkalk kommen flachgründige Rendzinen, auf Kreidesandstein und tertiären Sanden Ranker, Braunerden und Podsole sowie Auen-Lehme in den Talauen vor.
- Die *Sachsen-Anhaltische Lössebene* ist bedeutender Teil des mitteleuropäischen Lössgürtels, die Böden sind überwiegend landwirtschaftlich genutzt. Die Waldflächen dieses Wuchsgebietes liegen überwiegend in Niederungen und Auen, kräftige Fahlerden, Parabraunerden sowie Schluff- und Lehm-Auenböden sind typisch.
- Das *Sächsisch-Thüringische Löss-Hügelland* ist von meist über 1 m mächtigen, carbonatfreien Lössdecken bedeckt, es kommen Löss-Fahlerden, Braunerden, Braun-Staugleye und Auenböden vor.
- Die *Leipziger Sandlöss-Ebene* ist durch kräftige Sandlöss-Fahlerden geprägt und weitgehend waldfrei.
- Die *nördlichen und südlichen Randplatten des Thüringer Beckens* sind geologisch sehr vielfältig: auf Muschelkalk, Buntsandstein, teilweise Keuper (eher nördliche Randplatten), Zechstein (eher südliche Randplatten) und Lössdecken über Rotliegenden weist die Bodenbildung der Schichtstufenlandschaft dementsprechend auch eine große Bandbreite an Böden auf. Das Spektrum reicht von Rendzinen und Decklöss-Fahlerden bis zu Sandstein-Braunerden und kräftigen Staugleyen sowie Ton- und Auenlehmböden.

- Das sachsen-anhaltische *Innere Thüringer Becken* ist vom Löss und Keuper bestimmt, es liegen Löss-Fahlerden, Parabraunerden sowie Lehm- bis Ton-Braunerden vor und es ist weitgehend waldfrei.



Abbildung 1: Forstliche Wuchsgebiete in Sachsen-Anhalt (nach SCHWANECKE U. KOPP 1994, verändert durch W. Schmidt)

Die Standortsregion *Mittellebige* mit den Wuchsgebieten Harz und Kyffhäuser hebt sich deutlich vom Hügelland ab.

- Der sachsen-anhaltische *Harz* ist von silurischen, devonischen und karbonischen Tonschiefern mit eingelagerten Grauwacken sowie Diabasen, Kiesel-schiefer und Granit geprägt. Es kommen auch als Besonderheit devonische Kalke und der Quarzporphyr des Auerberges vor. Der Kern der Harzscholle ist von einem Band aus Zechstein umlagert, im Osten durch Kupferschiefer gekennzeichnet. Zungenartig sind Lössdecken in den flachen Tälern des Ostharzes eingelagert. Die Böden im Harz sind stark durch periglaziale Umlage-rungsprozesse beeinflusst. Es überwiegen Gesteinsbraunerden mit mittlerer

und kräftiger Nährstoffversorgung, es kommen aber ebenso podsolige Braunerden, Podsole und Ranker mit geringerer Nährkraft hinzu. In verdichteten Wannen sind kleinflächige Quell- und Hochmoore sowie Staugleye und Humusstaugleye ausgebildet. Auf Löss am Harzrand sind Fahlerden verbreitet.

- Das *Kyffhäusergebirge* wird von Gesteinen aus dem Oberkarbon wie Sandsteinen, grobkörnigen Konglomeraten und Schiefertönen gebildet, es herrschen mittlere bis kräftige lössbeeinflusste Gesteins-Braunerden vor. Am Westrand tritt Zechstein mit Kalk, Dolomit und Gips auf, hier bildeten sich Rendzinen und tonige Braunerden aus.

## 1.4 Substratgruppen

Eine Expertengruppe, bestehend aus Bodenkundlern und erfahrenen Standortskartierern, wies sämtlichen 388 BZE II-Punkten der Länder Niedersachsen, Bremen, Hessen und Sachsen-Anhalt Substratgruppen zu. Die Gruppierung der Waldböden in Substratgruppen erfolgte nach den Merkmalen Ausgangssubstrat (Ausgangsgestein), Lagerung (Substrat-Lagerung), Bodenart, Bodenmorphologie und Bodenphysik. Dabei prägt das Ausgangsgestein der Bodenbildung die Substratgruppen ganz wesentlich. Die Substratgruppen ermöglichen länderübergreifende Auswertungen (EVERS et al. 2013b). Darüber hinaus können die länderspezifischen Standortseinheiten den generierten Substratgruppen zugeordnet werden, sodass eine operationale Übertragung der Ergebnisse auf Standorts-Polygone der Standortskartierung gewährleistet ist bzw. erfolgen kann.

In Sachsen-Anhalt kommen an den 76 BZE-Punkten der BZE II 13 der für Nordwestdeutschland insgesamt nach EVERS et al. (2013b) definierten 16 Substratgruppen vor. Für 39 BZE-Punkte (51 %) wurde die Substratgruppe „unverlehmt Sande“ ausgewiesen. An 8 (11 %) BZE-Punkten ist standörtlich der Lösslehm bestimmend. Bei 7 BZE-Punkten (9 %) bildet Tonschiefer das Ausgangssubstrat. Es folgen die Substratgruppen schwach verlehmt Sand (5 BZE-Punkte, 7 %) und verlehmt Sand (4 BZE-Punkte, 5 %) sowie Lehm (3 BZE-Punkte, 4 %). Mit nur noch jeweils 2 BZE-Punkten sind die Substratgruppen organisch geprägte Standorte (v. a. ehemalige Moore), Grauwacke und Granit vertreten (insgesamt 8 %). Vereinzelt mit jeweils einem BZE-Punkt treten noch die Substratgruppen Basalt/Diabas, Kreidesandstein, Quarz und Zechstein mit insgesamt 5 % Anteil auf.

## 1.5 Bodentypen

Bei den sachsen-anhaltischen Waldstandorten dominiert mit Abstand der Bodentyp der Braunerde. Fast 60 % der vorkommenden Böden der BZE II in Sachsen-Anhalt entfallen auf diesen Bodentyp. Im Tiefland und Mittelgebirge sind jeweils rund zwei Drittel aller Bodentypen der BZE II-Punkte Braunerden, im Hügelland rund 20 %.

Vereinzelt sind Podsol-, Gley-, Pseudogley- und Parabraunerde-Braunerden angesprochen worden, doch nur die Podsol-Braunerden kommen im Tiefland häufiger vor. Parabraunerden sind in Sachsen-Anhalts Wäldern mit 10 % vertreten. Sie stellen im Hügelland den am häufigsten vorkommenden Bodentyp und sind vereinzelt auch im Mittelgebirge vertreten. Podsole (9 %) sind neben den Braunerden im Tiefland typisch. Pseudogleye sind mit 7 % Anteilen in der BZE II und in allen Wuchsregionen vertreten. Weitere vorkommende Bodentypen sind Vega-Gleye, Moore, Ranker, Regosole, Fahlerden und eine Schwarzerde, die aber mit jeweils 1–3 Punkten in der BZE II Sachsen-Anhalt eher selten sind.

## 1.6 Trockenrohdichten und Grobbodenanteile

Hinsichtlich bodenphysikalischer Eigenschaften sind die Grobbodengehalte (Steingehalte) vom Feinboden zu unterscheiden. Je nach Korngrößen- und Mineralzusammensetzung, Verdichtung, Bodentiefe sowie organischer Beimischung unterscheidet sich die Dichte des Mineralbodens. Der Unterboden weist in der Regel höhere Trockenrohdichten als der Oberboden auf. Die geringsten Trockenrohdichten finden sich beim Tonschiefer und verlehmtten Sand mit Werten von unter  $1,0 \text{ g/cm}^3$  in 0–5 cm. Sie sind Ausdruck der hohen Humusgehalte und des lockeren Mineralbodens direkt unterhalb des Auflagehumus. Mit zunehmender Bodentiefe steigen die Trockenrohdichten des Feinbodens aller Substratgruppen bis auf Werte zwischen  $1,4\text{--}1,9 \text{ g/cm}^3$  an. Die Böden in den Substratgruppen der Sande weisen insgesamt höhere Trockenrohdichten auf als die der Lösslehme und Tonschiefer. Absolut die geringsten Trockenrohdichten traten bei den organisch geprägten Standorten mit Werten unter  $0,5 \text{ g/cm}^3$  auf. Die Böden der Substratgruppen Granit, Grauwacke und Basalt/Diabas liegen mit ihren Trockenrohdichten ungefähr bei dem Werten des Tonschiefers, Quarzit, Lehm, Zechstein und Kreidesandstein eher bei den Sanden mit höheren Trockenrohdichten.

Die Grobbodenanteile in den Substratgruppen organisch geprägte Standorte, der Sande und des Lösslehms sind in allen Tiefenstufen überwiegend gering mit mittleren Werten unter 8 Vol%. Bei den Lehmen und im Kreidesandstein liegen die Grobbodenanteile etwas höher mit mittleren Werten zwischen 5–15 Vol%. In den Substratgruppen Granit und Tonschiefer liegen die Grobbodenanteile im Oberboden bis 30 cm zwischen 10 und 20 Vol%, im Unterboden steigen sie auf 30–40 Vol%, beim Tonschiefer auf 65 Vol% in 60–90 cm Bodentiefe an. Die Grobbodenanteile in den Substratgruppen Zechstein, Grauwacke Basalt/Diabas und Quarzit haben schon im Oberboden Werte zwischen 10–60 Vol%, im Unterboden sind die Grobbodenanteile häufig noch höher.

## 1.7 Austauschkapazität

Die Fähigkeit von Mineralböden und Humus zum Austausch von Kationen bestimmt wesentlich deren Puffereigenschaften und die mittelfristige Speicherkapazität für die Nährstoffkationen Calcium, Magnesium und Kalium und die sauren Kationen Aluminium, Eisen, Mangan sowie Protonen. Insgesamt liegt die Austauschkapazität in den Waldböden Sachsen-Anhalts im Mittel aller BZE II-Punkte mit rund 540 kmol<sub>c</sub>/ha noch im mittel-hohen Bewertungsbereich nach AK STANDORTSKARTIERUNG (2003). Damit haben die Waldböden in Sachsen-Anhalt, bedingt durch die eher ärmeren Böden im Tiefland, im Vergleich der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt, die geringsten Austauschkapazitäten.

Mit durchschnittlich 23 kmol<sub>c</sub>/ha trägt der Auflagehumus, bedingt durch seine in der Regel geringe Mächtigkeit, durchschnittlich nur zu etwa 4 % der gesamten Austauschkapazität bis 90 cm Bodentiefe bei. Die höchste Austauschkapazität (bezogen auf jeweils 5 cm Bodenschicht) mit 45 kmol<sub>c</sub>/ha findet sich aufgrund hoher Humusgehalte in den oberen 5 cm des Mineralbodens.

Die mittlere Austauschkapazität aller Waldstandorte in Sachsen-Anhalt ist vor dem Hintergrund der weiten Spanne der vorkommenden Substrate ökologisch nicht sehr aussagekräftig. Grundsätzlich zeigt sich aber bei einer (möglichst) gleichen mittleren Austauschkapazität in einer Wiederholungsinventur, dass die Methodik von der Probennahme bis zur Analyse mit der Erstinventur vergleichbar ist. Das war auf Ebene der Tiefenstufen in Sachsen-Anhalt der Fall. Die signifikante (leichte) Zunahme um 10 kmol<sub>c</sub>/ha (+2 % bezogen auf die BZE I) zwischen der BZE I und BZE II im oberen Mineralboden ist durch die Zunahme der organischen Substanz im oberen Mineralboden zu erklären.

Insgesamt belegen die Ergebnisse, dass mit dem Verfahren der BZE trotz standörtlicher Variabilität landesweit bestimmte Bodenzustände abbildbar sind und sich räumliche und zeitliche Veränderungen nachweisen lassen.

## 1.8 Status und Veränderung der Bodenversauerung

Durch die Bildung von Kohlensäure und organischen Säuren (Huminsäuren) kommt es in Böden Mitteleuropas zur allmählichen Versauerung. Hinzu kommen anthropogen verursachte Säureinträge, deren Säurewirkung seit Jahrzehnten die ökosysteminterne Versauerung übersteigt. Der Eintrag stärkerer Säuren, insbesondere der Schwefel- und Salpetersäure, bewirkt hauptsächlich eine Versauerung auf unter pH(H<sub>2</sub>O) 5. In diesem bodenchemischen Milieu werden die Kationen Calcium, Magnesium und Kalium am Austauscher von Aluminium, Eisen und Mangan sowie Protonen verdrängt und mit Nitrat, Sulfat und organischen Säuren mit dem Sickerwasser ausgewaschen. Je nach Mineralisierungsraten und Einträgen mit dem Niederschlag verlieren Waldökosysteme damit Nährstoffe. Der Eintrag von starken Säuren sowie säurewirksame Stickstoffeinträge haben daher in vielen Waldökosystemen zu

gravierenden bodenchemischen Veränderungen geführt (COOLS et al. 2016, MEESENBERG et al. 2016, DE VRIES et al. 2014, ULRICH 1981, ULRICH 1986).

Die Analyse der Stoffeinträge in Sachsen-Anhalt zeigt eine extrem hohe Belastung der Waldökosysteme durch anthropogen bedingte Stoffeinträge bis Anfang/Mitte der 1990er Jahre. Trotz deutlich geringerer Niederschläge und geringerer Benadelungsdichte war die Sulfatbelastung im Raum Colbitz unter Kiefer genauso hoch wie unter Fichte im Solling. Auf einer Fichtenfläche im Solling wurde das Maximum der Sulfat-Schwefelbelastungen in den 1970er Jahren erreicht. Im Mittel der Jahre 1986–1988 betrug der Schwefeleintrag im Solling unter Fichte 72 kg je Hektar und Jahr, unter Buche 38 kg je Hektar und Jahr, unter Kiefer in Raum Colbitz zwischen 61 und 72 kg je Hektar und Jahr und im Raum Wittenberg sogar 173 kg je Hektar und Jahr. Durch das Ende der Kohlewirtschaft der ehemaligen DDR und Maßnahmen zur Luftreinhaltung sind die Emissionen von Schwefeldioxid in erheblichem Umfang zurückgegangen, auch in den neuen Bundesländern. Infolge dieser Maßnahmen ging der Schwefeleintrag auch in Wäldern stark zurück. Im Vergleich zum Zeitraum 1986–1988 betrug der Rückgang in Colbitz unter Kiefer 96 % (siehe Kap. 3.4).

Trotz der beobachteten Abnahme der Stoffeinträge werden die Critical Loads für Säure- und für Stickstoffeinträge nach wie vor an einer Vielzahl von Standorten überschritten (MEESENBERG et al. 2015). Die deutliche stärkere Abnahme beim Schwefeleintrag im Vergleich zum Stickstoffeintrag hat dazu geführt, dass sich die Bedeutung der einzelnen Säurebildner am Gesamtsäureeintrag deutlich verschoben hat. Während in den Jahren 1986–1988 die Schwefeldeposition für rund 60 %, die Stickstoffdeposition für rund 25 % und die Chloriddeposition für rund 15 % des Gesamtsäureeintrags verantwortlich war, wird auf den Versuchsflächen in Sachsen-Anhalt heute mehr als 80 % des Gesamtsäureeintrags durch anorganische Stickstoffeinträge verursacht. Eine weitere Reduktion des Stickstoffeintrags ist deshalb auch unter dem Gesichtspunkt Säurebelastung dringend geboten.

Die Deposition von basisch wirkendem Calcium, Magnesium und Kalium ist durch die Luftreinhaltemaßnahmen ebenfalls stark reduziert wurden. In Colbitz hat der Calciumeintrag beispielsweise von 37 kg je Hektar und Jahr (Mittel 1986–1988) auf knapp 3 kg je Hektar und Jahr, d.h. um rund 90 %, abgenommen. In Colbitz wurden in den Jahren 1986–1988 im Mittel 43 % der eingetragenen Säuren durch ebenfalls eingetragene Basen neutralisiert, im Zeitraum 2013–2018 im Mittel noch 27 %.

Generell ist der Säure-Basen-Status von übergeordneter Bedeutung für sämtliche Bodenfunktionen. Zur Beschreibung des Status und der Veränderung des Säure-Basen-Zustandes der sachsen-anhaltischen Waldböden werden nachfolgende Kenngrößen herangezogen.



### 1.8.1 Kationen-Anteile an der Austauschkapazität

Die Besetzung der Austauscherplätze durch unterschiedliche Kationen steuert den Versauerungszustand von Waldböden und beeinflusst die Ernährungsbedingungen für die Waldbäume am Standort ganz wesentlich. Häufigstes basisch wirkendes Kation im Mittel Sachsen-Anhalts ist Calcium mit 16–27 % Anteilen an der Austauschkapazität. Deutlich niedriger liegen die Anteile von Magnesium und Kalium in Höhe von 3–6 % sowie Natrium in Höhe von bis zu 2 %. Aluminium ist in sachsen-anhaltischen Waldböden in jeder Bodentiefe das bestimmende Kation mit Anteilen zwischen 44–70 %. Protonen belegen Anteile zwischen 1 und 16 %, die höchsten Anteile befinden sich im Oberboden. Die Kationenbelegung sachsen-anhaltischer Waldböden wird demnach im Mittel von sauer wirkenden Kationen, vor allem Aluminium dominiert.

### 1.8.2 Basensättigung

Die Basensättigung gibt den prozentualen Anteil der basischen Kationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium (Mb) bezogen auf die effektive Kationenaustauschkapazität an. Sie ist damit eine der wichtigsten Kenngrößen für die Versauerung von Waldböden. Ihr Rückgang kann Folgen von Bodenversauerung anzeigen.

Bodenchemisch abgeleitet und in Versuchen nachgewiesen tritt unter einer Basensättigung von 15 bis 20 % Aluminium als dominierendes Kation in der Bodenlösung auf und wirkt auf Waldökosysteme destabilisierend (REUSS 1983, REUSS u. JOHNSON 1985, 1986). Zugleich weisen diese Böden nur noch geringe austauschbare Anteile an den wichtigen Nährstoffen Calcium und Magnesium auf. Mit 37 % durchschnittlicher Basensättigung bis 90 cm Bodentiefe liegen die Waldböden in Sachsen-Anhalt sowohl bei der BZE II als auch bei der BZE I im mittleren Bewertungsbereich. Summiert und gemittelt über diesen Bodentiefenbereich hat sich die Basensättigung in Sachsen-Anhalt nicht verändert.

Die Spanne der mittleren Basensättigung auf Profilebene reicht mit Werten zwischen 10–15 % beim Quarzit, Granit und der Grauwacke, 26–36 % beim Tonschiefer, unverlehmten Sand und schwach verlehmten Sand sowie 55–75 % beim verlehmten Sand, Lösslehm und Lehmen. Die Niedermoore- und Zechstein- Standorte erreichen nahezu 100 % Basensättigung.

Mit durchschnittlich 26 % liegt die Basensättigung beim unverlehmten Sand nicht im kritischen Bereich unter 20 %. Dieser Mittelwert ist jedoch stark durch Flugascheinträge und Bodenbearbeitung beeinflusst. Ohne diese Einflüsse treten auch in Sachsen-Anhalt im unverlehmten Sand mittlere Basensättigungen von unter 20 % auf, der Median für den unverlehmten Sand liegt bei 17 %. Auch auf basenarmen Gesteinen im Harz sind diese geringen Werte typisch. An solchen Standorten ist über eine Bodenschutzkalkung nachzudenken. Ein Ziel der Bodenschutzkalkung liegt darin, für definierte Standorte ein Absinken unter eine Basensättigung von 20 % zu verhindern bzw. den Versauerungsprozess zu verlangsamen und die durch Säure

ausgewaschenen Nährstoffe Calcium und Magnesium zu ergänzen (MEIWES 1995, BEESE u. MEIWES 1995). Nach dem derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand und den Grundsätzen einer verantwortungsbewussten, ökologischen und nachhaltigen Waldbewirtschaftung ist eine Kompensationskalkung auf Standorten erforderlich, deren Böden im Hauptwurzelraum stark versauert sind, d. h. eine Basensättigung von unter 15 % im unteren Hauptwurzelraum (30–60 cm) aufweisen, und bei denen kein Ausschlussgrund für eine Kalkung vorliegt (NW-FVA 2010).

Wie stark die Basensättigung durch die Flugasche in Sachsen-Anhalt beeinflusst wird, zeigt die Gegenüberstellung der gekalkten und ungekalkten unverlehmten Sande in Niedersachsen mit denen in Sachsen-Anhalt von Flugasche beeinflussten und unbeeinflussten unverlehmten Sanden (Abb. 2). Bereits ab 10 cm Bodentiefe übersteigt die Basensättigung der unverlehmten Sande ohne Flugascheeinfluss in Sachsen-Anhalt die durchschnittlichen Werte für die gekalkten und ungekalkten Sande in Niedersachsen, diese Unterschiede erhöhen sich noch mit zunehmender Bodentiefe. Das Niveau der Basensättigung der unverlehmten Sande mit Flugascheeinfluss in Sachsen-Anhalt übersteigt die Werte in Niedersachsen unabhängig von einer Kalkung bei Weitem mit mehr als doppelt so hohen Werten in Sachsen-Anhalt. Damit haben die Flugascheinträge die unverlehmten Sande bis in den Unterboden deutlich stärker aufgebast als die Waldkalkungen in Niedersachsen. Diese Basenmenge bildet zwar einen Nährstoffpool und Reservoir gegenüber einer weiteren Bodenversauerung, ist aber auch sensitiv gegenüber Auswaschung mit dem Sickerwasser und bei den sonst natürlich als relativ saure Waldstandstandorte anzusehenden Ökosystemen als starke, tiefwirkende anthropogene Veränderung anzusehen. Es zeigt sich deutlich, wie unterschiedlich je nach Historie bei gleichem Substrat Bodenzustände im Waldboden sein können und wie wichtig bodenchemische Messwerte für die Beurteilung von Beständen zur Durchführung von Waldkalkungen sind.

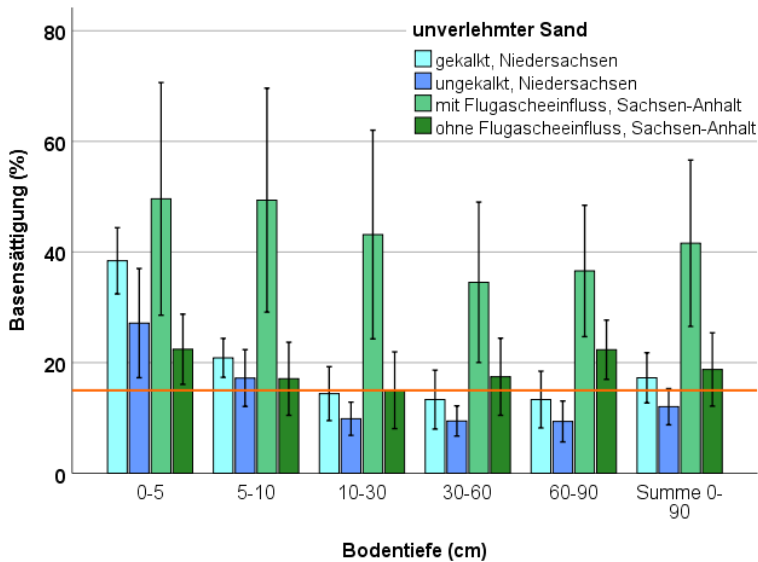


Abbildung 2: Mittlere Basensättigung [%] nach Tiefenstufen und Mineralboden 0–90 cm in der BZE II für Niedersachsen und Sachsen-Anhalt für den unverlehmten Sand nach Kalkung (Niedersachsen) und Flugascheeinfluss (Sachsen-Anhalt)

### 1.8.3 Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat

Zur umfassenden ökologischen Bewertung chemischer Kenndaten im Mineralboden ist die Ermittlung raumbezogener Vorratswerte erforderlich (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003).

Calcium hat im Allgemeinen die höchsten Anteile unter den basischen Kationen am Austauscher und demzufolge einen hohen Indikatorwert für die Nährstoffausstattung der Waldböden. Zu weiteren, sehr wichtigen basischen Kationen gehören Magnesium und Kalium.

Relativ gering mit Calcium und Magnesium sind Standorte mit Quarzit, Granit, unverlehmten Sand, Grauwacke und teilweise auch Tonschiefer ausgestattet. Hohe Vorräte an basischen Kationen finden sich dagegen beim Lehm, Lösslehm, Zechstein teilweise beim verlehmten Sand.

Zwischen der BZE I und der BZE II haben die Calciumvorräte im Oberboden in den Waldböden Sachsen-Anhalts leicht zugenommen, im Unterboden tendenziell abgenommen, insgesamt auf das Profil saldiert gab es keine signifikanten Unterschiede. Beim unverlehmten Sand erreichen die von Flugasche beeinflussten Standorte mehr als doppelt so hohe Calciumvorräte wie die nicht von Flugasche beeinflussten Standorte. Sie sind damit mit den gekalkten Standorten des unverlehmten Sandes in Niedersachsen vergleichbar. Im Raum Bitterfeld liegen die Calciumvorräte

zwischen 4000–6500 kg/ha bei mehr als vierfach so hohen Werten wie die gekalkten Standorte des unverlehmten Sandes in Niedersachsen. Der deutliche Einfluss von Flugaschen auf Basensättigung und Calciumvorrat wurde auch in Brandenburg festgestellt (RIEK et al. 2015, RIEK et al. 2021). Dabei zeigten sich in der südlichen Hälfte Brandenburgs an dem Rasternetz der ökologischen Waldzustandskontrolle weit verbreitete, hohe Calciumeinträge mit bis zu vierfach erhöhten Werten im Vergleich zum industriefernen Norden. Neben dem lokalen Einfluss von Braunkohlekraftwerken und durch hohe Schornsteine auch weiter verbreitete Flugasche wird auch der Braunkohleinsatz im Hausbrand dafür verantwortlich gemacht. Es ist daher davon auszugehen, dass auch in Sachsen-Anhalt der Einfluss von Flugasche nicht nur an einzelnen BZE-Punkten, sondern vor allem im Osten und Süden des Landes flächig erfolgte.

Bei Magnesium konnten leichte signifikante Zunahmen im Mineralboden und Auflagehumus festgestellt werden. Diese Zunahmen stehen auch mit Einträgen durch Flugasche im Zusammenhang, an diesen Standorten waren die Zunahmen besonders hoch.

Die Kaliumvorräte haben insgesamt um 54 % bezogen auf die Vorräte der BZE I ungewöhnlich auffallend in der BZE II zugenommen, vor allem im Unterboden. Diese hohen Zunahmen ließen sich weder ökologisch noch durch anthropogenen Einfluss wie z. B. Deposition erklären. Zunahmen dieser Größenordnung sind aus der Mineralverwitterung vor allem von Sandböden nicht zu erwarten. Kalium könnte in tiefere Bodenschichten verlagert worden sein, doch dann hätten im Auflagehumus und oberen Mineralboden die Kaliumvorräte zwischen der BZE I und BZE II eher abnehmen müssen. Das Gegenteil war jedoch der Fall. Die Depositionen nahmen zwischen den Bodenzustandserhebungen eher deutlich ab, damit kommen sie als Erklärung nicht in Betracht. In den Ländern Brandenburg (RIEK et al. 2015), Thüringen (BURSE et al. 2011) und Niedersachsen (EVERS et al. 2019) kam es eher zu Kaliumabnahmen im Mineralboden, nur in Mecklenburg-Vorpommern kam es auch zu Zunahmen (RUSS et al. 2011). Die im Jahr 2021 angefertigten Nachanalysen von Rückstellproben aus der BZE I vom Umweltlabor der NW-FVA ergaben in unteren Konzentrationsbereichen deutlich höhere Werte, sodass die Zunahmen auf fehlerhafte Werte der BZE I zurückgeführt werden konnten.

#### 1.8.4 Pufferbereiche

Hinsichtlich der pH-Wert-Analysen ist einschränkend festzustellen, dass aus dem Aciditätsstatus nur sehr begrenzt auf den chemischen Bodenzustand und sein Ursachen-Wirkungs-Geflecht geschlossen werden darf (ULRICH 1966).

Der pH-Wert ist eine Kenngröße für die Konzentration der  $\text{H}_3\text{O}^+$ -Ionen in der Bodenlösung und somit für den Versauerungszustand der Böden. Die in wässrigen Bodensuspensionen gemessenen  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte erlauben eine Zuordnung zu den

verschiedenen Pufferbereichen (ULRICH 1981, BLOCK et al. 2000). Je nach Kationenbelegung des Austauschers sowie der Säuredeposition laufen unterschiedliche Säure-Basen-Reaktionen und damit Pufferreaktionen ab (NÄTSCHER u. SCHWERTMANN 1991, SÜSSER u. SCHWERTMANN 1991, KHANNA et al. 1987, PRENZEL 1982, ULRICH 1981).

Die Anteile der Kationen an den Humus- und Tonmineraloberflächen bestimmen damit wesentlich das Pufferungsverhalten von Waldböden gegenüber Säureeinträgen und geben eine Zuordnung zu Resilienzeigenschaften und zur Ernährungssituation von Waldböden. Eine wesentliche Grenze stellt der Übergang vom Austauscher-Pufferbereich zum Aluminium-Pufferbereich dar. Im Aluminium-Pufferbereich verändern sich die Nährstoffbedingungen, ihre Wechselwirkungen und damit auch die Bodeneigenschaften und -funktionen.

Bei durchschnittlichen Werten zwischen 4,4 und 4,9  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  befinden sich zum Zeitpunkt der BZE II die Waldböden in Sachsen-Anhalt im Austauscher-Pufferbereich. Die Mittelwerte je Tiefenstufe und deren Konfidenzintervalle liegen oberhalb des Aluminium-Pufferbereiches. Die  $\text{pH}$ -Wert Spanne reicht von 3,5 bis 8,0. Es kommen damit bis auf den Eisen-Pufferbereich alle Pufferbereiche vor. In einigen Tiefenstufen im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe der Substratgruppen Tonschiefer sowie beim schwach- und unverlehmten Sand liegen die Mediane der  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Aluminium-Pufferbereich. In diesem Pufferbereich ist mit einer Auflösung sekundärer Tonminerale und Tonzerstörung, Freisetzung von Aluminium-Ionen und Protonen in die Bodenlösung sowie einer zunehmenden Einschränkung der Wuchsleistung durch den bodenchemischen Zustand zu rechnen (ULRICH 1981). Im Vergleich zu den Mittelwerten auf Bundesebene der BZE II sind die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in Sachsen-Anhalt wesentlich geringer (WELLBROCK et al. 2016), was mit den hohen Anteilen der relativ sauren Sandstandorte erklärt werden kann. Die deutlich geringeren  $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte im Vergleich zu den  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten belegen historisch hohe Säurebelastungen und erschöpfte Pufferreserven des Mineralbodens, vor allem der betreffenden Oberböden in den Substratgruppen schwach- und unverlehmter Sand sowie Tonschiefer. Auf Flugasche beeinflussten Waldstandorten konnten in allen Tiefenstufen höhere  $\text{pH}$ -Werte festgestellt werden, die teilweise auch in den Silikat-Pufferbereich reichen.

Im Auflagehumus nahmen die  $\text{pH}$ -Werte ( $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{KCl}$ ) von der BZE I zur BZE II signifikant ab. Im Mineralboden kam es bei den  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten zu leichten Zunahmen, vor allem in Unterboden. Die  $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte nahmen dagegen bis 10 cm Bodentiefe signifikant ab, im tieferen Mineralboden gab es keine Veränderungen. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass zwischen der BZE I und BZE II in Sachsen-Anhalt die Gesamtsäurebelastung an vielen Standorten immer noch höher als die Pufferkapazität der Böden ist, denn bei den etwas geringeren Säureeinträgen hätte mit einem Anstieg der mittleren  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in der Bodenlösung und der  $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte gerechnet werden können. Der überwiegende Säureeintrag in Sachsen-Anhalt resultiert aus anorganischen Stickstoffeinträgen, die sich

zwischen der BZE I und II in Sachsen-Anhalt erhöht haben, was diese Interpretation stützt (s. Kap. 3.4). Neben dem Säureeintrag über Luftschadstoffe sind jedoch auch weitere Säurequellen zu beachten, die die pH-Werte mit beeinflussen. Entkopplungen des Stickstoffkreislaufes, rückläufige Pufferreaktionen bei Aluminiumsulfaten, Basenverluste über Nitrat- und Sulfatausträge sowie Entzüge mit der Biomasse führen zu weiterer Versauerung (ULRICH 1983, ULRICH et al. 1994, KHANNA et al. 1987, PRIETZEL u. KÖLLING 1999).

Im Hinblick auf die Zuordnung der Pufferbereiche nach dem  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert zeichnet sich für Sachsen-Anhalt zwischen der BZE I und BZE II einerseits eine Verschlechterung des bodenchemischen Zustandes ab: Die Anteile der ökologisch ungünstig zu beurteilenden Aluminium-Eisen- und Aluminium-Pufferbereiche haben im oberen Mineralboden zu Lasten des Austausch-Pufferbereiches zugenommen. Dies betrifft vor allem die schwächeren Standorte des unverlehmten Sandes und Tonschiefers. Andererseits nahmen die Anteile im Carbonat- und Silikat-Pufferbereich zu Lasten des Austausch-Pufferbereiches leicht zu, in diesen Fällen hat sich die Situation verbessert. Dies betrifft den Lösslehm sowie die schwach- und verlehnten Sande.

### 1.8.5 Bewertung

Die Wälder und Waldböden in Sachsen-Anhalt sind über lange Zeiträume durch sehr hohe atmosphärische Stoffeinträge beeinflusst, die in einigen Regionen sogar extrem ausfielen. Neben sehr hohen Säureeinträgen sind auch regional sehr unterschiedlich Flugascheinträge niedergegangen und veränderten die chemische Zusammensetzung der Waldböden erheblich. Die BZE I-Ergebnisse 1992–1994 zeigen für die Mehrzahl der Standorte eine deutliche Versauerung im oberen Mineralboden, eine geringe Ausstattung mit basischen Kationen und hohe Anteile von Aluminium am Austauscherkomplex (FORSTLICHE LANDESANSTALT SACHSEN-ANHALT 1998). Weiterhin waren schon in der BZE I relativ hohe Nährstoffvorräte in der Auflage gespeichert und damit nicht unmittelbar pflanzenverfügbar, Nährstoffkreisläufe damit entkoppelt.

Obwohl durch Rauchfilter die Flugascheinträge in den 1980er Jahren zurückgingen, stiegen die Schwefeinträge über die Kohleverbrennung noch bis zum Ende der 80er Jahre weiter an. Die seit Mitte der 1990er-Jahre ergriffenen Maßnahmen zur Luftreinhaltung und das Ende der Kohlewirtschaft in Sachsen-Anhalt verringerten vor allem die Emissionen von Schwefeldioxid und Flugasche erheblich. Die Stickstoffeinträge sind zurzeit mit 10–16 kg je Hektar und Jahr aber immer noch auf einem relativ hohen Niveau und höher als der mittlere Bedarf der Waldbestände. Die Ergebnisse belegen insgesamt, dass das Thema Bodenversauerung auch heute noch aktuell ist. Der weitaus überwiegende Teil des Gesamtsäureeintrags in Sachsen-Anhalt wird mittlerweile durch anorganische Stickstoffeinträge verursacht. Aktuell sind die wirkungsbezogenen Belastungsgrenzen, die Critical Loads für Versauerung

und Eutrophierung, in vielen Wäldern von Sachsen-Anhalt weiterhin durch den Eintrag von Luftschadstoffen überschritten. Dies kann zu Bodenversauerung, Nährlementverlusten mit dem Sickerwasser, Änderungen des Wuchs- und Konkurrenzverhaltens von Waldbäumen, Waldbodenvegetation und Bodenorganismen führen. Eine weitere Reduktion des Stickstoffeintrags ist deshalb auch unter dem Gesichtspunkt Säurebelastung dringend geboten. Viele Waldböden, vor allem der unverlehmte Sand, sind durch Flugascheinträge bis in den Unterboden aufgebast. Die Höhe der Einträge war regional sehr unterschiedlich, im Osten des Landes waren sie besonders hoch. Die Flugascheinträge stellen ein pufferndes Reservoir gegenüber Säureinträgen dar. Dies ist sicherlich auch ein Grund mit dafür, warum sich die mittlere Basensättigung auf Landesebene kaum geändert hat zwischen den BZE-Erhebungen. Dieser Nährstoffpool, vor allem von Calcium, wird jedoch bei weiteren Nitrat- und Sulfatausträgen mit dem Sickerwasser weiter abnehmen. Neben Calcium und Magnesium sind mit der Flugasche vielerorts auch organische Schadstoffe wie beispielsweise Hexachlorbenzol (HCB) oder polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe sowie Schwermetalle wie Arsen und Chrom eingetragen worden. Diese Stoffe und deren Derivate werden im Waldboden lange aufgespeichert und stellen potentielle Risikofaktoren für das Waldökosystem dar (RIEK et al. 2021).

## 1.9 Hauptergebnisse für die Substratgruppen

Waldregionen werden standörtlich weitgehend durch ihre Ausgangsgesteine und die dazugehörigen Substratgruppen geprägt. Zu nennen sind etwa das überwiegend durch Sande geprägte sachsen-anhaltische Tiefland, das durch Lösslehm geprägte Hügelland und das aus den Gesteinen des Erdaltertums aufgebaute Bergland. Im Interesse einer Anwendbarkeit der Ergebnisse der Bodenzustandserhebung für konkrete forstliche Fragestellungen auf überregionaler, regionaler oder lokaler Ebene sind vor allem die Befunde für konkrete Substratgruppen von Bedeutung.

### 1.9.1 *Unverlehmter Sand (51 % der Waldböden nach BZE II in Sachsen-Anhalt)*

Die Standorte der unverlehmten Sande gehören zu den ärmeren Standorten in Sachsen-Anhalt und kommen ausschließlich im sachsen-anhaltischen Tiefland vor. Diese Standorte weisen die höchsten Trockenrohdichten, die geringsten Skelettanteile und mit den (Löss)Lehmen und verlehmtten Sanden die höchsten Feinbodenvorräte auf. Die mittlere nutzbare Feldkapazität liegt mit Werten zwischen 60–120 mm und im Mittel mit 93 mm bis 90 cm Bodentiefe im geringen bis mittleren Bewertungsbereich und hat im Vergleich zu den anderen Substratgruppen in Sachsen-Anhalt eine relativ geringe Wasserspeicherkapazität.

Bei einer mittleren Austauschkapazität von 255 kmol<sub>c</sub>/ha (summiert bis 90 cm Bodentiefe) liegen die BZE II-Punkte dieser Substratgruppe noch gerade im middle-

ren Bewertungsbereich. Dieser Durchschnitt ist höher als die mittleren Vergleichswerte in Hessen (220 kmol<sub>c</sub>/ha), aber geringer als die in Niedersachsen (340 kmol<sub>c</sub>/ha) und liegt um 53 % unter dem Landesmittel (100 %) von Sachsen-Anhalts Waldböden.

Die durchschnittliche Basensättigung von 26 % auf Profilebene liegt im gering-mittleren Bewertungsbereich und damit 11 %-Punkte unter dem Landesdurchschnitt. Der mittlere Calciumvorrat auf Profilebene beträgt rund 1300 kg/ha und ist damit als mittel einzustufen, der Magnesiumvorrat mit 150 kg/ha und der Kaliumvorrat mit 550 kg/ha jeweils als gering-mittel. Im Vergleich zu den Mittelwerten auf Landesebene liegen die Nährelementvorräte dieser Substratgruppe bei 25 % (Calcium), 26 % (Magnesium) und 73 % (Kalium).

Der obere Mineralboden der unverlehmten Sande bis 10 cm Bodentiefe befindet sich überwiegend im Aluminium-Pufferbereich, die tieferen Bodenschichten im Austauscher-Pufferbereich. Im Vergleich zur BZE I haben sich die pH(H<sub>2</sub>O)-Werte kaum verändert, die pH(KCl)-Werte haben im Auflagehumus und oberen Mineralboden bis 10 cm Bodentiefe deutlich abgenommen.

Die mittleren Kohlenstoffvorräte der unverlehmten Sande auf Profilebene liegen mit 110 t/ha in der BZE II noch im mittleren Bewertungsbereich und damit 8 t/ha unter dem Mittel von Sachsen-Anhalt. Die Kohlenstoffvorräte sind in der BZE II saldiert bis 90 cm Bodentiefe gegenüber der BZE I um 32 t/ha angestiegen, dies entspricht rechnerisch einer jährlichen Speicherrate von knapp 2,5 t/ha. Bis auf die Tiefenstufe 60–90 cm ist dieser Anstieg in jeder Tiefenstufe und im Auflagehumus signifikant. Ohne Extreme und die Tiefenstufen unter 30 cm (ev. methodische Unterschiede zur BZE II) ergibt sich immer noch eine Speicherrate von 1,9 t/ha.

Mit rund 5,3 t/ha auf Profilebene liegen die mittleren Stickstoffvorräte im unverlehmten Sand im mittleren Bewertungsbereich und sind um 2, 2 t/ha geringer als das Mittel Sachsen-Anhalts. Zur BZE I gab es eine signifikante Zunahme um 26 %.

Weiterhin zeigte sich in Sachsen-Anhalt, dass die bodenchemischen Parameter und deren Dynamik teilweise stark durch die atmosphärischen Einträge beeinflusst wurden. Neben dem Osten des Landes (Landkreise Anhalt-Bitterfeld und Wittenberg) sind die BZE-Punkte im Raum Bitterfeld besonders betroffen. Hier liegen die Calciumvorräte und Basensättigung beispielsweise deutlich über den Vergleichswerten des unverlehmten Sandes in Niedersachsen. Weiterhin auffällig für diese Region sind hohe Magnesium-, Kalium-, Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte im Auflagehumus und Mineralboden. Zwischen der BZE I und BZE II wurden Zunahmen der Calcium- und Magnesiumvorräte vor allem im Raum Bitterfeld, für Kalium, Kohlenstoff und Stickstoff besonders im Osten und am höchsten im Raum Bitterfeld festgestellt. Dies kann auf die atmosphärischen Stoffeinträge zurückgeführt werden. Überlagert werden diese Einflüsse durch Bodenbearbeitungen wie z. B. den Streifenpflug, die überall im Osten und häufig auch im Norden des Landes in Wäldern durchgeführt wurden. Auch hier konnten in der BZE höhere Kohlen- und Stickstoffvorräte sowie Zunahmen von der BZE I zur BZE II festgestellt werden.



### 1.9.2 *Schwach verlehmtte Sande (7 % der Waldböden nach BZE II in Sachsen-Anhalt)*

Die Standorte der schwach verlehmtten Sande gehören ebenfalls zu den ärmeren Standorten in Sachsen-Anhalt und kommen überwiegend im sachsen-anhaltischen Tiefland vor. Typisch sind Geschiebedecksande und Sandlössen mit schwach verlehmtten und schluffigen Sanden, die sich im Vergleich zu den unverlehmtten Sanden vor allem durch eine höhere nutzbare Feldkapazität auszeichnen, die im Mittel Sachsen-Anhalts auf Profilebene bis 90 cm Bodentiefe 174 mm beträgt. Die Trockenrohdichten, Skelettanteile und Feinbodenvorräte sind mit denen der unverlehmtten Sande vergleichbar.

Mit einer Austauschkapazität von rund 550 kmol<sub>c</sub>/ha bis 90 cm Bodentiefe weisen die BZE II-Punkte dieser Substratgruppe eine mittel hohe Austauschkapazität auf, die leicht über dem Mittel Sachsen-Anhalts liegt. Die Austauschkapazität ist mehr als doppelt so hoch wie die der unverlehmtten Sande (256 kmol<sub>c</sub>/ha).

Mit 36 % mittlerer Basensättigung auf Profilebene liegen die schwach verlehmtten Sande im mittleren Bewertungsbereich und deutlich über den Werten der unverlehmtten Sande. Der mittlere Calciumvorrat auf Profilebene entspricht mit 3450 kg/ha dem 2,7-fachen Vorrat der unverlehmtten Sande und ist bereits als mittel-hoch einzustufen. Der Magnesiumvorrat mit 490 kg/ha liegt im mittleren und der Kaliumvorrat mit 900 kg/ha im mittel-hohen Bewertungsbereich. Im Vergleich zum Landesmittel (100 %) liegen die Nährelementvorräte dieser Substratgruppe bei 67 % (Calcium), 83 % (Magnesium) und 119 % (Kalium). Die höheren Nährstoffvorräte gegenüber den unverlehmtten Sanden bilden den höheren Verlehmungsgrad sehr gut ab.

Die oberen 10 cm des Mineralbodens der schwach verlehmtten Sande liegen überwiegend im Aluminium-Pufferbereich, die tieferen Bodenschichten im Austauscher-Pufferbereich. Im Vergleich zur BZE I sind die pH(H<sub>2</sub>O)-Werte im Auflagehumus gesunken und im Mineralboden leicht, aber nicht signifikant angestiegen. Die pH(KCl)-Werte haben im Auflagehumus und im Oberboden bis 10 cm seit der BZE I abgenommen.

Die mittleren Kohlenstoffvorräte auf Profilebene der schwach verlehmtten Sande liegen mit rund 150 t/ha im mittleren Bewertungsbereich und damit deutlich über dem Mittel der Waldböden Sachsen-Anhalts.

Mit 7,3 t/ha mittlerem Stickstoffvorrat auf Profilebene sind die schwach verlehmtten Sande besser mit Stickstoff bevorratet als die unverlehmtten Sande, liegen aber ebenfalls im mittleren Bewertungsbereich und leicht unter dem Mittelwert Sachsen-Anhalts.

### 1.9.3 Verlehmte Sande (5 % der Waldböden nach BZE II in Sachsen-Anhalt)

Die verlehmten Sande zeichnen sich im Vergleich zu den unverlehmten und schwach verlehmten Sanden durch eine etwas höhere Austauschkapazität (rund 590 kmol<sub>c</sub>/ha), deutlich höhere Basensättigung (56 %) und höhere Calcium- und Magnesiumvorräte aus. Die Kaliumvorräte liegen oberhalb der Werte des unverlehmten Sandes, aber unter denen der schwach verlehmten Sande. Die Calciumvorräte liegen im hohen, die Magnesiumvorräte im mittel-hohen und die Kaliumvorräte im mittleren Bewertungsbereich. Die Verteilungen der pH(H<sub>2</sub>O)-Werte umfassen sowohl den Carbonat-, Kohlensäure-, Austauscher- und Aluminiumpufferbereich, die Mediane liegen im Kohlensäure- (0–5 cm) und Austauscher-Pufferbereich (5–90 cm). Die Trockenrohdichten dieser Substratgruppe sind im Oberboden etwas geringer als bei den schwach- und unverlehmten Sanden, die Skelettgehalte sind überwiegend gering. Die nFK liegt mit rund 150 mm bis 90 cm Bodentiefe im hohen Bewertungsbereich. Die Kohlenstoffvorräte mit rund 120 t/ha und die Stickstoffvorräte mit 7,4 t/ha bis 90 cm Bodentiefe entsprechen ungefähr dem Landesmittel.

### 1.9.4 Lösslehm (11 % der Waldböden nach BZE II in Sachsen-Anhalt)

Der Lösslehm prägt den mitteleuropäischen Lössgürtel, in Sachsen-Anhalt findet er sich überwiegend im Hügelland, aber auch im Bergland. Diese Böden werden überwiegend landwirtschaftlich genutzt. Das lockere, durch Wind abgelagerte Sediment bildet mit den lehmigen Schluffen bis schwach tonigen Lehmen aber auch hervorragende Waldstandorte aus. Die Trockenrohdichten sind mit den verlehmten Sanden vergleichbar, die Skelettgehalte sind sehr gering. Entsprechend sind die Feinbodenvorräte relativ hoch und mit den Sanden vergleichbar. Aufgrund des hohen Schluffanteils im Boden ist die nFK mit knapp 200 mm bis 90 cm Bodentiefe sehr hoch. Daher zählen diese Standorte hinsichtlich des Wasserhaushaltes zu den besten Waldstandorten.

Die Substratgruppe Lösslehm umspannt einen weiten Rahmen bodenchemischer Eigenschaften. Teilweise kommen tief versauerte und an Nährstoffen verarmte (Mittelharz) oder noch kalkhaltige Löss-Standorte (z. B. bei Naumburg) vor. Mit einer Austauschkapazität von 1180 kmol<sub>c</sub>/ha bis 90 cm Bodentiefe sind die BZE II-Punkte dieser Substratgruppe mit einer hohen Austauschkapazität ausgestattet, die doppelt so hoch ist wie das Landesmittel.

Mit 60 % mittlerer Basensättigung auf Profilebene befinden sich die Lösslehme im mittel-hohen Bewertungsbereich und sind mit den verlehmten Sanden und Lehmen vergleichbar. Der mittlere Calciumvorrat auf Profilebene ist mit rund 13.000 kg/ha aber wesentlich höher als bei den verlehmten Sanden und wird weit im sehr hohen Bewertungsbereich eingruppiert. Der Magnesium- und Kaliumvorrat mit jeweils 1.600 kg/ha liegt im hohen Bewertungsbereich. Im Vergleich zum Landesmittel (100 %) befinden sich die mittleren Nährelementvorräte der Substratgruppe Lösslehm bei 250 % (Calcium), 270 % (Magnesium) und 215 % (Kalium).

In der Substratgruppe Lösslehm verteilen sich die pH(H<sub>2</sub>O)-Werte im Austauschbereich, im Unterboden ab 30 cm auch im Kohlensäure-Pufferbereich. Die pH(H<sub>2</sub>O)-Werte sind gegenüber der BZE I in der Tendenz angestiegen, die pH(KCl)-Werte eher leicht gesunken.

Die mittleren Kohlenstoffvorräte auf Profilebene liegen mit 111 t/ha im mittleren Bewertungsbereich und damit leicht unter dem Landesmittel. Die Kohlenstoffvorräte nahmen um 20 % zu, statistisch abgesichert werden konnten die Zunahmen nicht. Mit 8,9 t/ha mittlerem Stickstoffvorrat auf Profilebene sind die Lösslehme mit dem Tonschiefer vergleichbar, sie liegen im mittleren Bewertungsbereich und oberhalb des Landesmittels.

### *1.9.5 Tonschiefer (9 % der Waldböden nach BZE II in Sachsen-Anhalt)*

Die Standorte des Tonschiefers befinden sich im sachsen-anhaltischen Harz und zählen eher zu den basenarmen Gesteinen, können aber je nach Zusammensetzung auch besser mit Nährstoffen versorgt sein.

Die Trockenrohdichten im Tonschiefer sind vergleichsweise gering und etwas niedriger als die der Lösslehme. Die Grobbodengehalte zählen mit bis zu 20 Vol% im Oberboden und mit rund 65 Vol% im Unterboden zu den höchsten in Sachsen-Anhalt. Entsprechend gering sind die Feinbodenvorräte, die z. B. im Vergleich zu den Sanden nur halb so hoch sind. Noch geringere Feinbodenvorräte weisen Granit, Grauwacke, Quarzit und organisch geprägte Standorte in Sachsen-Anhalt auf. Die nFK mit mittleren 130 mm bis 90 cm Bodentiefe liegt im hohen Bewertungsbereich und über dem Mittel sachsen-anhaltischer Waldböden.

Die mittlere Austauschkapazität von rund 500 kmol<sub>c</sub>/ha bis 90 cm Bodentiefe liegt im mittleren Bewertungsbereich und erreicht 90 % des Mittelwerts von Sachsen-Anhalts Waldböden. Die durchschnittliche Basensättigung ist mit 26 % als gering-mittel zu bewerten und entspricht dem Mittel der Basensättigung des unverlehmten Sandes. Die mittleren Calciumvorräte von 2.600 kg/ha sind halb so hoch wie das Landesmittel, liegen aber noch im mittel-hohen Bewertungsbereich. Die Magnesiumvorräte mit rund 540 kg/ha sind ebenfalls im mittel-hohen Bewertungsbereich und etwas unterhalb des Landesmittels. Kalium fällt mit knapp 600 kg/ha in den gering-mittleren Bewertungsbereich und liegt damit deutlich unterhalb vom Landesmittel. Auch die Tonschiefer-Standorte zählen zu den empfindlich auf Versauerung reagierenden Waldböden.

Die Verteilung der pH(H<sub>2</sub>O)-Werte ist vergleichbar mit der beim schwach- und unverlehmten Sand, im Oberboden wird häufig der Aluminium-Pufferbereich erreicht, im Unterboden befinden sich diese Standorte im Austauscher-Pufferbereich. Signifikante Veränderungen gab es bei den pH-Werten im Vergleich zur BZE I nicht, in der Tendenz sind sie gesunken.

Die mittleren Kohlenstoffvorräte auf Profilebene sind mit 110 t/ha im mittleren Bewertungsbereich und etwas geringer als das Landesmittel. Die Stickstoffvorräte

sind mit 8,8 t/ha ebenfalls im mittleren Bewertungsbereich und knapp 20 % oberhalb des Landesmittels. Signifikante Veränderungen ergaben sich weder beim Kohlenstoff- noch beim Stickstoffvorrat.

Tonschiefer-Standorte sind für Waldkalkungen zu prüfen.

### *1.9.6 Substratgruppen mit geringen Anteilen an der BZE II*

Die Substratgruppen mit drei oder weniger BZE-Punkten in Sachsen-Anhalt Basalt/Diabas, Granit, Grauwacke, Kreidesandstein, Lehm, organisch geprägte Standorte, Quarzit und Zechstein kommen mit Ausnahme des Lehms und der organisch geprägten Standorte im Berg- und Hügelland vor. Die jeweiligen Anteile liegen unterhalb von 4 %, zumeist bei 1 % Anteil an der BZE II.

Organisch geprägte Standorte umfassen ehemalige Hoch- und Niedermoore im Tiefland, Anmoore überwiegend im Bergland und Brüche, die überwiegend mit Erle (reiche Niedermoore) bzw. mit Birke (nährstoffarme ehemalige Hochmoore) bestockt sind. Kennzeichnend sind die mehr oder weniger mächtigen, überwiegend organisch zusammengesetzten Schichten aus ehemaligen Torfmoosen oder Mudden, die jetzt mit Wald bestockt sind. Die Trockenrohdichten sind im Oberboden sehr gering und steigen im Unterboden auf mittlere Werte, die Grobbodengehalte sind im ganzen Profil gering. Die Brüche haben im Gegensatz zu den ehemaligen Mooren deutlich höhere mineralische Anteile, zeichnen sich aber ebenfalls durch hohe Anteile organischer Komponenten im Boden aus. Entsprechend hoch sind die Kohlen- und Stickstoffvorräte: Mit 480 t/ha Kohlenstoff und 33 t/ha Stickstoff bis 90 cm Bodentiefe speichern diese Standorte mehr als viermal so viel dieser Elemente wie ein durchschnittlicher Waldstandort in Sachsen-Anhalt.

Die Lehme, immerhin mit 4 % an der BZE II beteiligt, zählen mit dem Zechstein, Niedermooren, Basalt/Diabas und Lösslehmen zu den am besten mit Nährstoffen versorgten Standorten. Typisches Beispiel ist ein Auenlehm bei Magdeburg.

Eine mittlere Nährstoffversorgung bei hoher Basensättigung weist der Kreidesandstein auf, dieser Punkt hat sehr geringe Kohlen- und Stickstoffvorräte.

Im Gegensatz dazu sind die Quarzite, Granite und Grauwacke Standorte eher schwach mit Nährstoffen versorgt. Die durchschnittliche Basensättigung auf Profilebene liegt unterhalb von 20 %, hier ist Aluminium am Austauscher prägend. Der Quarzit mit einer nFK von 50 mm hat die geringsten Werte in der BZE II und fällt damit in die sehr geringe Bewertungsstufe.

## 1.10 Humusformen

24 % der sachsen-anhaltischen BZE II-Punkte weisen den Humustyp Mull auf, der die günstigsten Mineralisierungsbedingungen für den Waldboden kennzeichnet. Der Waldboden wird intensiv von Regenwürmern gelockert, die Streuzersetzung verläuft rasch im oberen Mineralboden, der meist ein krümeliges Gefüge aufweist. Der mullartige Moder, der ebenfalls noch relativ günstige Zersetzungsbedingungen anzeigt, ist mit 4 % in der BZE II vertreten. Typische Moder-Standorte mit bereits verlangsamter Streuzersetzung haben insgesamt einen Anteil von 27 % (feinhumusarm: 14 %, feinhumusreich: 13 %). Hier sind Regenwürmer seltener, Arthropoden wie Tausendfüßler oder Asseln häufiger. Die Streuzersetzung verläuft nicht mehr im Mineralboden, sondern in der organischen Auflage. Am häufigsten kommt in Sachsen-Anhalts Wäldern der Graswurzelfilzmoder vor (21 % Anteil). Diese Humusform ist typisch für die Kiefernwälder im Tiefland. Im Übergang zum Rohhumus liegt der Rohhumusartige Moder, der in Sachsen-Anhalt mit 16 % vertreten ist. Deutlich gestörte Streuzersetzung anzeigende Auflagehumusformen (typischer Rohhumus-feinhumusarm bzw. feinhumusreich) sind auf 3 % der sachsen-anhaltischen BZE-Punkte anzutreffen. Hydromorphe Humusformen wie Feuchtmoder (2 %) und Anmoor (3 %) kommen vereinzelt vor.

Die Verteilung der Humusformen in Sachsen-Anhalt entspricht in etwa der aus Niedersachsen (EVERS et al. 2019), sie ist im Vergleich zu Hessens Waldböden, bei denen die günstigsten Mull-Humusformen auf gut 40 % der BZE II-Standorte vorkommen (PAAR et al. 2016), deutlich schlechter. Dies steht im engen Zusammenhang mit dem hohen Anteil unverlehmter Sande und den Nadelholzbeständen in Sachsen-Anhalt und Niedersachsen im Tiefland.

Gegenüber der Humustypverteilung der BZE II mit 24 % Mull, 68 % Moder und 3 % Rohhumus sowie 5 % anderen Humusformen war die Verteilung zum Zeitpunkt der BZE I deutlich abweichend: Auf den Humustyp Mull entfielen lediglich 8 %, den Moder 58 % und Rohhumus 28 % (andere 6 %). Damit zeigt sich eine deutlich qualitative Verbesserung der Humusformen hin zu den günstigeren Humusformen Moder und Mull.

Die Tendenz zu günstigeren Humusformen kann zum einen mit den langjährig hohen Stickstoffeinträgen, zum anderen auch mit insgesamt höheren Temperaturen bei ähnlichem Niederschlag und stärker durchforsteten Beständen mit höheren Laubholzanteilen zusammenhängen.

Die durchschnittliche Trockenmasse im Auflagehumus von 72 t/ha in Sachsen-Anhalt hat sich bezogen auf die BZE I deutlich erhöht. Die Zunahme von 18 t/ha ist signifikant.

Die Trockenmasse vom Auflagehumus wird wesentlich von der Baumartenzusammensetzung beeinflusst. Mit zunehmendem Anteil von Nadelholz erhöht sich i. d. R. die Trockenmasse: In den von Laubholz bestimmten Bestandestypen Buche, Eiche und sonstiges Laubholz (z. B. Birke, Erle, Roteiche, Ahorn oder Esche) liegen

die durchschnittlichen Trockenmassen des Auflagehumus überwiegend zwischen 20 und 50 t/ha und in den von Nadelholz bestimmten Bestandestypen Fichte und Kiefer zwischen 80 und 90 t/ha. Hohe Trockenmassen im Auflagehumus können aber auch unter Laubwald auftreten, wie die Extremwerte bei Eiche und sonstigem Laubholz zeigen. Ebenso sind geringe Werte im Auflagehumus unter Nadelholz möglich.

Die Trockenmassen im Auflagehumus sind in den Substratgruppen sehr unterschiedlich. Die geringsten Auflagen finden sich auf den besser versorgten Standorten des Lösslehms mit durchschnittlich 23 t/ha. Es folgen die Substratgruppen Tonschiefer mit 48 t/ha, verlehmtter Sand mit 61 t/ha und der unverlehmtte Sand mit 85 t/ha. Die höchsten mittleren Trockenmassen im Auflagehumus in Sachsen-Anhalt wurden mit 103 t/ha beim schwach verlehmtten Sand festgestellt.

Insgesamt zeigt sich eine Entwicklung der morphologischen Humusformen hin zu besseren Zersetzungsbedingungen: Der Anteil von Rohhumus hat deutlich abgenommen, Mull und Moder haben zugenommen. Die Flugascheeinträge hatten keinen Einfluss auf die Verteilung des Humustyps, allerdings wurden in der BZE II deutlich weniger Graswurzelfilzmoder auf Flugasche beeinflussten Standorten des unverlehmtten Sandes gefunden. Deutlich geringere Mächtigkeiten beim Auflagehumus wurden nach Kalkung in Hessen (PAAR et al. 2016) und Niedersachsen (EVERS et al 2019) sowie auf Bundesebene festgestellt (WELLBROCK et al. 2016). Die Kohlenstoffverluste im Auflagehumus werden jedoch in Niedersachsen und Hessen durch Zunahmen im Mineralboden mehr als ausgeglichen.

### 1.11 Kohlenstoff – Status und Veränderung in den Waldböden

Kohlenstoff hat für Böden eine Vielzahl wichtiger Funktionen. Zu nennen sind die Wasser- und Nährstoffspeicherkapazität, der Luft- und Wärmehaushalt, das Puffervermögen und die biologische Aktivität. Darüber hinaus erlangt der Waldboden als Speicher für Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) aus der Atmosphäre eine besondere Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit und Politik.

Die weltweiten jährlichen Treibhausgasemissionen erreichten mit 49,5 Gt im Jahre 2010 den bisherigen Höchststand. Die Notwendigkeit, den Ausstoß der Treibhausgase zu vermindern, hat hohe internationale Priorität und umfasst ein umfangreiches Portfolio von Maßnahmen (IPCC 2014). Neben der Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen ist die Speicherung von Kohlenstoff ein wichtiges klimapolitisches Ziel. Die Bundesrepublik Deutschland ist als Vertragsstaat der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen verpflichtet, Inventare zur nationalen Treibhausgasemission zu erstellen und fortzuschreiben. Zur bundesweiten Quantifizierung des Waldbodens als Kohlenstoffquelle bzw. -senke sind auch die sachsen-anhaltischen Daten der BZE I und II in den Nationalen Inventarbericht (National Inventory Report (UBA 2014)) eingegangen.

Die Quantifizierung des Kohlenstoffvorrates in Waldböden ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Die meist hohe kleinräumige Variabilität erschwert eine abgesicherte Quantifizierung. Die Vorratsbestimmung benötigt neben der Kohlenstoffkonzentration noch die Größen Trockenrohddichte und Skeletttgehalt, die ebenfalls erheblich in einer Fläche streuen können.

Für das sachsen-anhaltische BZE-Kollektiv mit 76 Stichprobenpunkten ergeben sich entsprechend der bundesweiten methodischen Vorgaben zur Durchführung Kohlenstoffvorräte von 130 t/ha (Auflagehumus und Mineralboden) zum Zeitpunkt der BZE II. Die Kohlenstoffvorräte liegen im mittleren Bereich nach AK STANDORTSKARTIERUNG (2003) und belegen eine langfristige Nettospeicherung. Sachsen-anhaltische Waldböden stellen somit eine wichtige Kohlenstoffsенке dar. Die höchsten Kohlenstoffvorräte enthalten organisch geprägte Standorte wie Moorböden, auf denen aktuell Wald stockt. Hier betragen die Kohlenstoffvorräte je nach Mächtigkeit und Zusammensetzung der Moordecke zwischen 200 und über 600 t Kohlenstoff je ha.

Neben der insgesamt im Boden festgelegten Kohlenstoffmenge in Waldböden ist vor allem die zeitliche Rate der Kohlenstoffspeicherung oder Freisetzung von Interesse. Im Zeitraum 1993 (BZE I) bis 2007 (BZE II) haben die Kohlenstoffvorräte in sachsen-anhaltischen Waldböden insgesamt deutlich zugenommen. Im Vergleich zur BZE I erhöhten sie sich bis 90 cm Bodentiefe um 34,1 t/ha (+40 %), was rechnerisch einer jährlichen Speicherrate von rund 2,44 t/ha entspricht (ohne organisch geprägte Standorte). Diese Zunahme trat sowohl im Auflagehumus als auch in allen Tiefenstufen auf und war in allen Fällen signifikant. Dieses Mittel schließt jedoch 3 BZE-Punkte mit extremen Zunahmen ein, die nicht mit einer zeitlichen Speicherrate in Zusammenhang gebracht werden sollten (Braunkohlereste, Beprobungsfehler, Bodenbearbeitung). Ohne diese Extreme ergibt sich eine geringere Speicherrate von 1,8 t/ha und Jahr.

Weiterhin sind methodisch bedingte Unterschiede zwischen den Messungen in der BZE I und BZE II wahrscheinlich, die besonders mit sehr geringen C-Konzentrationen in der BZE I auffielen. Hier wurden in der BZE II deutlich höhere Werte gemessen. Da dies besonders die Tiefenstufen 30–60 und 60–90 cm betrifft, sollten diese Vorratsänderungen nicht mit berücksichtigt werden. Ohne diese Tiefenstufen und Extremwerte ergibt sich eine Vorratsveränderung von 20,8 t/ha (+25 %) und eine rechnerische Speicherrate von 1,5 t/ha und Jahr Kohlenstoff. Diese Speicherrate ist immer noch als sehr hoch anzusehen.

Die Speicherraten für Kohlenstoff im Waldboden zwischen den BZE-Erhebungen sind bundesweit sehr unterschiedlich. Ähnlich hohe Anstiege der Kohlenstoffvorräte in Waldböden wurden im Rahmen der BZE-Auswertungen für Mecklenburg Vorpommern (+1,73 t/ha, RUSS et al. 2011), Brandenburg (+1,79 t/ha, RIEK u. RUSS 2019) und Niedersachsen (+1,45 t/ha, EVERS et al 2019) nachgewiesen. Die Bodenzustandserhebungen in Rheinland-Pfalz dagegen ergaben zwar eine Abnahme der Kohlenstoffgehalte in der Humusaufgabe, aber keine abgesicherten Unterschiede

der Kohlenstoffvorräte insgesamt auf Profilebene (BLOCK u. GAUER 2012). In den Waldböden Baden-Württembergs kam es insgesamt zu Abnahmen, die vor allem auf Abnahmen im Auflagehumus zurückzuführen waren (HARTMANN et al. 2016). In Hessen speicherten die Waldböden deutlich weniger als in Sachsen-Anhalt und Niedersachsen (0,3 t/ha und Jahr, PAAR et al. 2016), die Unterschiede zwischen der BZE I und BZE II waren jedoch signifikant. Auch hier nahmen wie in Niedersachsen die Vorräte im Auflagehumus ab und wurden durch Zunahmen im oberen Mineralboden bis 30 cm mehr als ausgeglichen. Auf Bundesebene ergaben sich aus allen BZE-Erhebungen der Länder mittlere signifikante Zunahmen auf Profilebene um 0,75 t/ha und Jahr, die wie in Niedersachsen und Hessen wesentlich auf deutlichen Zunahmen im Mineralboden bis 30 cm basieren (GRÜNEBERG et al. 2016).

Bisher wurde davon ausgegangen, dass sich die Kohlenstoffvorräte in Waldböden nur in sehr langen Zeiträumen ändern. Der vor allem über Blatt- und Nadelstreu, Früchte, Totholz und Wurzeln eingetragene Kohlenstoff dient vielen Mikroorganismen als Nahrungsgrundlage und wird über die Zersetzerketten letzten Endes als Kohlendioxid wieder abgegeben. Kohlenstoffeintrag und -austrag sind i. d. R. in Waldökosystemen mehr oder weniger im Gleichgewicht. Organische Substanz wird nur in geringem Maße im Waldboden über die Humusbildung, z. B. als organische Humin- und Fulvosäuren sowie Ton-Humuskomplexe, auch langfristig gespeichert. Es werden durchschnittliche Speicherraten um 220 kg/ha und Jahr in Europas Waldböden kalkuliert (LUYSSAERT et al. 2010). Im Laufe der Zeit können sich natürlich auch bei geringen Speicherraten hohe Vorräte aufsummieren.

Die durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte von rund 130 t/ha in sachsen-anhaltischen Waldböden zeugen von einer langfristigen Nettospeicherung. Dabei wird es immer wieder auch Phasen von Kohlenstoffverlusten gegeben haben, z. B. durch intensive Holz- und Streunutzung, Waldbrand oder –rodung, Sturmwurf sowie Insektenkalamitäten.

Die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus sind unter Kiefern- und Fichtenbeständen dreimal so hoch wie unter Buchen- und Eichenbeständen, dies steht im Zusammenhang mit höheren Auflagen auf ärmeren Standorten mit schlechteren Humusformen durch gehemmte Streuzersetzung. Die Kohlenstoffvorräte im Mineralboden sind standortsbedingt jedoch bei den Laubbaumarten höher als beim Nadelholz, sodass sich die Unterschiede wieder angleichen.

Für die relativ hohen Speicherraten von Kohlenstoff in den Waldböden Sachsen-Anhalts kommen verschiedene Erklärungen in Betracht, die sich durchaus ergänzen können.

Zunächst spielt möglicherweise das Bestandesalter eine Rolle bei den Speicherraten von Kohlenstoff im Auflagehumus und Mineralboden: In der Substratgruppe unverlehmter Sand bei überwiegend Kiefernbeständen lagen die Speicherraten im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe in Beständen unter 60 Jahren bei 2,7 t/ha, in Beständen über 80 Jahren dagegen nur bei 1,25 t/ha und Jahr. In den jüngeren Beständen waren die relativen Speicherraten vor allem im Mineralboden, in den älteren



Beständen im Auflagehumus höher. Dies erscheint insofern plausibel, als dass in den jüngeren Beständen (20–40 Jahren) vor allem die Ausbildung von (Fein-)Wurzelmasse im obersten Mineralboden zu den höheren Speicherraten geführt haben kann, in älteren Beständen dann vor allem Zunahmen im Auflagehumus und tieferen Bodenschichten auftraten. Mit abnehmendem laufendem Zuwachs im Bestand verringern sich die Speicherraten im Auflagehumus und oberen Mineralboden. Ähnliche Verläufe der Kohlenstoffzunahmen wurden auch in Brandenburg bei der BZE gefunden (RIEK u. RUSS 2019).

Die Ergebnisse für Sachsen-Anhalt geben des Weiteren Hinweise auf einen Einfluss von Flugasche und Bodenbearbeitung auf den Kohlenstoffhaushalt: Sowohl unter Flugascheeinfluss als auch bei Bodenbearbeitung stiegen die Kohlenstoffvorräte im Gesamtprofil deutlich an.

Häufigere und längere Trockenphasen vor allem in der Vegetationsperiode hemmen die Humusmineralisierung, sodass eine Akkumulation gerade im Auflagehumus und oberen Mineralboden von organischer Substanz möglich ist. Dies spiegelt sich in den Vorratsveränderungen der BZE wider, die Kohlenstoffzunahmen waren im Auflagehumus und oberen Mineralboden besonders hoch. Auch bei den Intensiv-Monitoringflächen Klötze und Nedlitz zeigten sich zwischen 2009 und 2019 deutliche Zunahmen von Kohlenstoff in ähnlichen Größenordnungen bis 1 m Bodentiefe: Klötze 0,9 t und Nedlitz 2,9 t/ha und Jahr (FORTMANN 2021 mündliche Mitteilung). In beiden Flächen traten die höchsten Zunahmen vor allem im Auflagehumus auf, in Nedlitz auch im Mineralboden. Auch hier könnten Trockenperioden und verminderte Humusabbauraten eine Rolle gespielt haben.

Untersuchungen von PREGNITZER et al. (2008) und NAVE et al. (2009) weisen auf einen signifikanten Zusammenhang hoher Stickstoffeinträge und deutlich höherer Kohlenstoffspeicherraten im oberen Mineralboden in nördlichen temperierten Wäldern nach. Auch verringerte Schwefeleinträge können zu erhöhten Kohlenstoffspeicherraten im Mineralboden führen, wie es Untersuchungen aus Tschechien belegen (OULEHLE et al. 2011). Diese Bedingungen – hohe Stickstoff- und sinkende Schwefeleinträge – bestanden auch für die Wälder in Sachsen-Anhalt zwischen den BZE-Erhebungen, von daher sind dies möglicherweise zwei zusätzliche Faktoren, die die Kohlenstoffspeicherung im Mineralboden anregten.

Die bislang vorliegenden Ergebnisse zur Höhe der Kohlenstoffvorräte müssen aufgrund erheblicher Variabilität und Unsicherheiten hinsichtlich der Quantifizierung des Kohlenstoffhaushaltes von Waldböden mit Vorsicht interpretiert werden. Die ermittelten Veränderungen seit der BZE I beruhen auf einer einheitlichen Berechnungsbasis und sind daher als relativ gesichert anzusehen. Die Ergebnisse von FORTMANN et al. (2012) zur Entwicklung der Bodenvorräte an organischem Kohlenstoff auf den Intensivmonitoringflächen Solling Buche bzw. Fichte belegen jedoch, dass die Veränderungen innerhalb von zwei Zustandsphasen und die Ableitung von Trends mit großen Unschärfen verbunden sein können.

Umfassende Ursachenanalysen für die unterschiedlichen Befunde zum Kohlenstoffstatus und zur Kohlenstoffveränderung in Waldböden auf Bundesebene sind notwendig und zielführend hinsichtlich der Ableitung von Prozess- und Regulationsmechanismen. Die bislang vorliegenden Ergebnisse müssen trotz länderübergreifender methodischer Standards mit großer Sorgfalt interpretiert werden.

### 1.12 Stickstoff – Status und Veränderung in den Waldböden

Stickstoff gilt als ein Schlüsselement in der Biosphäre und ist die quantitativ wichtigste Komponente der Pflanzenernährung (EVERS 1964, MARSCHNER 1986, EICHHORN 1995). Vor dem Industriezeitalter war Stickstoff in Waldökosystemen ein Mangelfaktor. Das Angebot war begrenzt und es herrschte eine ausgeprägte Konkurrenz um die in der Regel sehr knappe Ressource (KRZAK 1981, KIMMINS 1987, TAMM 1991, EICHHORN 1995). Infolge anthropogener Einträge in den letzten Jahrzehnten ist jedoch eine deutliche Sättigung der Wälder mit Stickstoff erkennbar (ABER et al. 1989). Der eingetragene Stickstoff hat in zahlreichen Waldökosystemen zu erheblichen Veränderungen geführt. Nach COLE (1992) und VAN MIEGROET et al. (1992) sind Ökosysteme stickstoffgesättigt, wenn der Input aus Stickstoffmineralisierung und Atmosphäre die Rückhaltefähigkeit des Systems langfristig übersteigt und regelmäßige Nitratausträge stattfinden. Die Stickstoffsättigung eines Waldökosystems lässt sich daher über die Bestimmung von Nitrat im Sickerwasser unterhalb des Wurzelsystems charakterisieren (BLOCK et al 2000, DE VRIES et al. 2015).

Die Stickstoffvorräte im Auflagehumus und bis 90 cm Bodentiefe liegen in den Waldböden Sachsen-Anhalts bei der BZE II mit durchschnittlich 7,6 t/ha Stickstoff im mittleren Bewertungsbereich. Der Auflagehumus hat mit 1,0 t/ha Stickstoff dabei einen Anteil von 13 %. Ähnlich wie beim Kohlenstoffvorrat sind in den oberen 30 cm Mineralboden (Auflagehumus eingeschlossen) mit rund 5 t/ha Stickstoff insgesamt 66 % der Stickstoffvorräte bis 90 cm Bodentiefe gespeichert. Stickstoff ist hauptsächlich in organischer Substanz gebunden, die vor allem im oberen Mineralboden mit höheren Anteilen vertreten ist. Dennoch sind die Anteile der Tiefenstufe 30–60 cm am Stickstoffvorrat mit 21 % und der Tiefenstufe 60–90 cm mit 13 % nicht unbedeutend. Die prozentuale Tiefenverteilung der Stickstoffvorräte in den Tiefenstufen war bei der BZE I nahezu identisch.

Vergleichbar mit Kohlenstoff ergibt sich für Stickstoff auf Profilebene summiert über den Auflagehumus und die Tiefenstufen bis 90 cm Bodentiefe eine signifikante Anreicherung von Stickstoff von insgesamt 1460 kg/ha (+23 %). Mit Ausnahme der Tiefenstufe 60–90 cm sind diese Zunahmen im Auflagehumus und jeder Tiefenstufe signifikant. Besonders hoch sind die Zunahmen in der Auflage und bis 10 cm Bodentiefe. Die mittlere Zunahme von 1460 t/ha berechnet sich aus allen BZE-Punkten, die sowohl in der BZE I als BZE II beprobt wurden. Dabei gibt es vor allem als Folge hoher standörtlicher Streuungen analog zum Kohlenstoff bei 5 Standorten extreme Unterschiede, die deswegen nicht in die mittlere Speicherrate für Sachsen-

Anhalt einbezogen werden sollten. Um diese Extreme bereinigt ergibt sich immer noch eine mittlere Zunahme von Stickstoff von 1150 kg/ha auf Profilebene, was einer jährlichen Speicherrate von rund 80 kg/ha und Jahr entspricht.

Analog zum Kohlenstoff gab es auch bei der Bestimmung von Stickstoff methodische Unterschiede bei der Stickstoffmessung zwischen der BZE I und BZE II. Vor allem bei geringen Konzentrationen in den Tiefenstufen unter 30 cm in der BZE I wurden bei den Proben in der BZE II deutlich höhere Werte gemessen. Eine derartige Stickstoffanreicherung in diesen Bodentiefen ist eher unwahrscheinlich. Daher wird vermutet, dass dies in der genaueren Elementaranalyse (BZE II) gegenüber dem in diesen Messbereichen ungenaueren Kjeldahl-Aufschluss (BZE I) begründet ist und nicht in einer tatsächlichen Stickstoffanreicherung. Die Verteilung der Stickstoffkonzentrationen nach Horizonten/Tiefenstufen im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe in der BZE I und BZE II gibt im Unterschied zu Kalium zunächst keinen Anlass, die Messungen in Frage zu stellen, zumal die verwendeten Methoden in der BZE I und BZE II grundsätzlich als vergleichbar gelten (HÜBSCH u. NEHRING 1960, RIEK et al. 2015). Ohne die Einbeziehung der Tiefenstufen 30–60 und 60–90 cm ergibt sich noch eine Stickstoff-Speicherung für Sachsen-Anhalts Waldböden von 1000 kg/ha (+ 16 %) und einer rechnerischen jährlichen Zunahme von rund 70 kg/ha, einer immer noch sehr hohen, ungewöhnlichen Zunahme.

Die C/N-Verhältnisse erhöhten sich im Auflagehumus und allen Mineralbodentiefenstufen zwischen der BZE I und der BZE II signifikant mit Ausnahme der Tiefenstufen 0–5 und 10–30 cm. Bezogen auf das Profilmittel liegen die C/N-Verhältnisse in der BZE I und BZE II im mittleren Bereich (C/N 16–20).

Die Stickstoff-Speicherrate von 70 kg/ha und Jahr in Sachsen-Anhalt ist ungewöhnlich hoch. In Thüringen berechneten sich noch höhere Zunahmen als in Sachsen-Anhalt von über 100 kg/ha und Jahr (BURSE et al. 2011). Auf Bundesebene ergab die BZE II Auswertung dagegen einen mittleren Verlust von 26,5 kg/ha und Jahr (bis 60 cm Bodentiefe, ANDREAE et al. 2016). In Niedersachsen wurde eine Zunahme von 8 kg/ha und Jahr festgestellt (ebenfalls ohne Extreme, EVERS et al. 2019), in Brandenburg um 13 kg/ha (RIEK u. RUSS 2019) und Sachsen um 14 kg/ha und Jahr (JACOB u. ANDREAE 2018). In Mecklenburg-Vorpommern dagegen ergaben sich hohe Stickstoffverluste von 1,23 t/ha, was einem jährlichen Stickstoffverlust im Mineralboden von rund -80 kg/ha und Jahr entspricht (RUSS u. RIEK 2011). Diese Werte verdeutlichen, wie regional verschieden die Stickstoffvorratsänderungen zwischen der BZE I und BZE II ausfallen. Vor diesem Hintergrund und den teilweise sehr hohen Unterschieden der Messwerte in den Tiefenstufen zwischen der BZE I und BZE II müssen diese Raten in ihrer absoluten Höhe mit Vorsicht interpretiert werden. Unter der Bedingung, dass weder die räumliche Heterogenität noch methodisch bedingte Abweichungen zu gerichteten Änderungen geführt haben, sind die Stickstoffzunahmen statistisch abgesichert. Genauere Trendabschätzungen werden dann anhand der BZE III-Daten möglich.

In Sachsen-Anhalt und Thüringen entfällt der überwiegende Anteil aller BZE-Punkte in die beiden oberen Quantile in der Verteilung der Stickstoffspeicherung der BZE-Punkte auf Bundesebene (75–90 % mit 48–114 kg und 90–100 % mit über 114 kg/ha und Jahr, ANDREAE et al. 2016, Kartenband). Eine plausible Bilanzierung von Stickstoffzunahmen in dieser Größenordnung ist schwierig, da als erklärbare Stickstoffquelle überwiegend nur Einträge über Deposition in Frage kommen. Im Intensiven Monitoring wurden in Klötze, Nedlitz und Colbitz lediglich Raten zwischen 10–20 kg/ha und Jahr Stickstoff-Gesamtdeposition für den Zeitraum zwischen der BZE I und BZE II in Wäldern berechnet (siehe Kap. 3.4). Dennoch nahmen auch in diesen Flächen die Stickstoffvorräte im Auflagehumus und Mineralboden zwischen 2009–2019 mit ähnlichen Größenordnungen wie in der BZE zu: In Klötze um 43 kg und Nedlitz um 100 kg/ha und Jahr (FORTMANN 2021, mündliche Mitteilung).

Vor der BZE I waren die Stickstoffdepositionen in Sachsen-Anhalt noch deutlich höher, sie lagen z. B. im Raum Wittenberg zwischen 60–90 kg/ha und Jahr (siehe Kap. 7). Es ist wahrscheinlich, dass Flugascheeinträge analog zu Kohlenstoff zwischen den beiden BZE-Erhebungen die Stickstoffeinträge in den Mineralboden erhöhten. Dies zeigen die Auswertungen in Kap. 7, im Osten Sachsen-Anhalts Bitterfeld wurden 2,7-fach höhere Stickstoffspeicherraten, im Raum Bitterfeld sogar um den Faktor 4,5 erhöhte Speicherraten als im Norden Sachsen-Anhalts festgestellt. Möglicherweise wird die Stickstoffdeposition auch unterschätzt, wenn Flugstäube im Labor nicht die Filter passieren, wenn die Messlösung hergestellt wird. Unter bestimmten Bedingungen speichern Feinstaub-Flugaschepartikel Ammoniumnitrat in der Luft (COE 2020, WANG et al. 2020). Mit einer höheren trockenen Deposition in ganzjährig benadelten Kiefernbeständen unter Flugascheeinfluss ist sicherlich zu rechnen. Auch ein erhöhter Stickstoffeintrag über die Nadelstreu ist denkbar, da die gemessenen Stickstoffgehalte in den Nadeln in Sachsen-Anhalt weit im Luxusversorgungsbereich liegen und zwischen der BZE I und BZE II weiter angestiegen sind (siehe Kap. 8). Wenn der dafür benötigte Stickstoff aus tieferen Bodenschichten mit nicht oder unsicher quantifizierten Stickstoffvorräten stammt, dann wären entsprechende Zunahmen denkbar. Tiefere Bodenschichten werden von der Kiefer erschlossen, gerade vor dem Hintergrund von trockeneren Klimabedingungen. Wie bei den Speicherraten von Kohlenstoff folgen auch die Speicherraten von Stickstoff bei Kiefernbeständen auf unverlehmtem Sand den Mustern in Abhängigkeit des Bestandesalters: hohe Zunahmen in Beständen unter 60 Jahren, zunächst im oberen Mineralboden, dann im Auflagehumus und tieferen Mineralboden, dann mit zunehmendem Alter und nachlassendem Zuwachs mit geringen Stickstoffspeicherraten zwischen 60–120 Jahren Bestandesalter.

Ebenfalls analog zu Kohlenstoff können auch bei Stickstoff häufigere und längere Trockenphasen vor allem in der Vegetationsperiode die Humusmineralisierung gehemmt haben, was eine Akkumulation im Auflagehumus und oberen Mineralbo-

den von Stickstoff zur Folge hätte. Auch eine erhöhte Feinwurzelmasse infolge dichter Bodenv egetation wie z. B. Landreitgrasdecken, vermehrter Naturverjüngung der aufstockenden Bestände sowie Vor- und Unterbau hätten eine anreichernde Wirkung von Stickstoff im Oberboden und wären als Faktor für die Stickstoffzunahmen denkbar.

Als weiterer Eintragspfad von Stickstoff kommen Düngungen in Frage, die im Zuge von Stabilisierungsmaßnahmen oder auch Bodenbearbeitungen durchgeführt wurden. Sie sind zumindest für einige Waldflächen dokumentiert (siehe Kap. 7).

Eine weitere mögliche Erklärung sind die anhaltend hohen Stickstoffeinträge, die insbesondere den Streuabbau in den späten Phasen der Zersetzung stabilisieren können (DE VRIES et al. 2006, BERG et al. 1995) und entsprechend die Akkumulation von C und N im Oberboden erhöhen.

Auf negative Auswirkungen und Risiken erhöhter Stickstoffzufuhr haben verschiedene Autoren hingewiesen (MEYER 1984, 1985, NIHLGÅRD 1985, MATZNER 1988, SCHULZE et al. 1989, VAN MIEGROET et al. 1992, BLOCK et al. 2007, RASPE u. GÖTTLEIN 2008, MEESENBURG et al. 2016). Im Sondergutachten „Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem“ des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU 2015) werden die hohen Einträge von Stickstoffverbindungen als Ursache von Versauerung und Eutrophierung mit der Folge von Verlusten an Biodiversität identifiziert, die zusätzlich zur Belastung des Grundwassers mit Nitrat beitragen und durch vermehrte Lachgasbildung die Ozonschicht schädigen und den Klimawandel antreiben. Erhöhte Stickstoffeinträge beeinträchtigen die Ektomykorrhiza von Waldbäumen mit negativen Folgen für Wachstum und Nährstoffversorgung (DE WITTE et al. 2017).

Eine weitere Reduktion der Stickstoffeinträge ist daher dringend geboten, zumal nach neueren Untersuchungen bei 94 % der Wald- und Offenland-Ökosysteme (etwa 57 % der Gesamtfläche) in Sachsen-Anhalt die Critical-Loads für Stickstoff überschritten werden (HELBIG et al. 2020). Zwar sind die Stickstoffausträge unter Wald verhältnismäßig gering im Vergleich zu landwirtschaftlich genutzten Flächen (BEISEKER et al 2020, EVERS et al. 2019), dennoch ist bei einer langfristigen Überschreitung der Critical-Loads mit Stickstoff von negativen Folgewirkungen auf den Wald und seine Funktionen auszugehen.



## 2 Kurzportraits der BZE-Punkte („Steckbriefe“)

*Jan Evers, Andreas Hafner, Uwe Paar*

Mit dem forstökologischen Datenbanksystem ECO der NW-FVA (SCHULZE u. EVERS 2013) lassen sich für jeden BZE-Punkt Kurzportraits automatisiert generieren. Diese „Steckbriefe“ beinhalten ausgewählte Informationen zu allgemeinen Standortstypisierungen, zur Bodenmorphologie, Bodenchemie, Bodenphysik, zur Bestockung und Ertragskunde sowie zur Waldernährung und Bodenvegetation. Diese Kurzportraits sind bezüglich ausgewählter Merkmale parametrisierbar. Die farblichen Hinterlegungen in den angegebenen Wertetabellen stützen sich auf folgende, im Bericht verwendete Bewertungsrahmen:

Die Grenzwerte für die Bewertung von Elementgehalten in den Nadeln und Blättern der Hauptbaumarten (Blatt-Gehalte in den Kurzportraits) entsprechen denen von GÖTTLEIN (2015), FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012) und sind in den Tabellen 16 (S. 245) und 17 (S. 247) im Kapitel 8 „Waldernährung“ in diesem Band aufgeführt.

Die Kenngrößen und Grenzwerte für die Einstufung der Humusaufgabe und des Mineralbodens nach der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) sind in Tabelle 11 (S. 148) im Kapitel 6.5 „Bodenchemische Kenngrößen in Sachsen-Anhalt“ zusammenfassend dargestellt (Boden-Analytik I~II in den Kurzportraits). Die Einstufung des Mineralbodens nach Pufferbereichen findet sich in Tabelle 12 auf Seite 194.

Die farbliche Hinterlegung der Vegetations-Trennarten bezüglich des pH(H<sub>2</sub>O) richtet sich nach den Ergebnissen des Kapitels 9 „Vegetation“ (S. 293 ff.).

Nachfolgend wird für die fünf in Sachsen-Anhalt am häufigsten vorkommenden Substratgruppen (Abb. 3: unverlehmte Sande, Abb. 4: Lösslehm, Abb. 5: Tonschiefer, Abb. 6: schwach verlehmte Sande und Abb. 7: unverlehmte Sande) jeweils ein Portrait eines BZE-Punktes exemplarisch vorgestellt.

**BZE ST03187** (Bund = 150037, Land\_I = 3187, Land\_II = 3187, EU = -)

ElbeTangerwinkelNiederung, MittleresNordostdeutschesAltmoränenland

GK R4488476 / H5802252, UTM32N R692682 / H5804127

44 m NN, Süd-Exposition, Neigung: 1 gon (1,6 %), Klimastufe:

Landkreis Börde, FoA Letzlingen, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 8.6°C, 497mm ~ VegZeit: 15.4°C, 233mm (-&gt; kollin)

1981-2010 Jahr: 9.3°C, 537mm ~ VegZeit: 16.1°C, 271mm (-&gt; kollinplanar)

Standortstyp: Polygon = Tt T Z 2 - Bäs, Profil = Tt T2 Z - Bäs

Wasserhaushalt\*: (mäßig)trocken (Mittelhang, Haupthang)

Trophie\*: schwach\_mesotroph - Substrat/Lagerung\*\*: T2.2 (Typ 2, Klasse 1)

Substratgruppe: unverlehmterSand (-)

**Profil-Morphologie**

|                                 | BZE I (03.11.1992)                              | BZE II (25.04.2006)                             |
|---------------------------------|---|---|
| <b>Streuart</b>                 | keineAngabe                                     | Gras-NadelStreugemisch                          |
| <b>Humusform</b>                | typischerRohhumus                               | GraswurzelfilzModer                             |
| <b>Humusmenge, Auflage</b>      | 47.9 t/ha [6.0 cm], L: 2.0, Of: 2.0, Oh: 2.0 cm | 72.3 t/ha [7.8 cm], L: 0.4, Of: 3.8, Oh: 3.6 cm |
| <b>Bodentyp</b>                 | Braunerde                                       | Braunerde (schwach_podsolig)                    |
| <b>Bearbeitung, Veränderung</b> | keine, keineVeränderungenFestgestellt           | keine, nichtErhoben (nichtErhoben)              |
| <b>Gründigkeit</b>              |   | 90  |

**Horizont-Ansprache BZE I**

| Horizont (Schicht) | FbArt | Dwurz(fein)  | LagDichte   | GrobB % |
|--------------------|-------|--------------|-------------|---------|
| 006 Ah (I)         | Ss    | schwach      | keineAngabe | 0       |
| 020 Bv (I)         | Ss    | mittel       | keineAngabe | 0       |
| 042 Bv (I)         | SI2   | mittel       | keineAngabe | 0       |
| 053 Bv-Cv (I)      | Ss    | schwach      | keineAngabe | 0       |
| 200 Cv (I)         | Ss    | sehr_schwach | keineAngabe | 1       |

**Horizont-Ansprache BZE II**

(akt. GwStand: cm)

| Horizont (Schicht) | FbArt | Dwurz(fein)  | Hauptsubstrat           | Stratigraphie     |
|--------------------|-------|--------------|-------------------------|-------------------|
| 002 Aeh (I)        | fSms  | stark        | Abschwemmmassen         | Holozän           |
| 008 Bv (I)         | fSms  | mittel       | Abschwemmmassen         | Holozän           |
| 025 Cv (I)         | fSms  | sehr_schwach | Abschwemmmassen         | Holozän           |
| 040 fAh (I)        | fSms  | schwach      | TerrassenFlussablager.. | Weichsel-Kaltzeit |
| 060 fBv (I)        | fSms  | sehr_schwach | TerrassenFlussablager.. | Weichsel-Kaltzeit |
| 090 Cv (I)         | fSms  | sehr_schwach | TerrassenFlussablager.. | Weichsel-Kaltzeit |

\*: gemäß länderübergreifender Synopse

\*\* T2.2: einschichtig, unverlehmte silikatärmste Tal-/Schmelzwassersande, auch ± unverlehmte geschiebeführende Sande größerer Mächtigkeit

Typ 2: OB: unverlehmter Sand, UB: unverlehmter Sand/Kies (kiesig)

Klasse 1: OB: Kies und unverlehmter Sand, UB: Kies und unverlehmter Sand

Info Profil II: -

Info Humus II: dichter Graswurzelfilz, Lagerung nicht bestimmbar. U/Of: Graswurzelfilz in der Probe



erzeugt mit ECO-RASTAmAn V4.29\_32 am 14.11.2019 15:02:53, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

*Abbildung 3: Kurzportrait des BZE-Punktes 3187 in der Elbeniederung (Substratgruppe unverlehmter Sand mit sehr geringer Basensättigung, ungekalkt), ausgelesen aus dem ECO-Datenbanksystem der NW-FVA*



(Fortsetzung Abbildung 3)

**BZE ST03187** (Bund = 150037, Land\_I = 3187, Land\_II = 3187, EU = -)  
 ElbeTangerwinkelNiederung, MittleresNordostdeutschesAltmoränenland  
 GK R4488476 / H5802252, UTM32N R692682 / H5804127  
 44 m NN, Süd-Exposition, Neigung: 1 gon (1,6 %), Klimastufe:  
 Landkreis Börde, FoA Letzlingen, Besitz: Privatwald  
 Kalkung: nein  
 Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 8.6°C, 497mm ~ VegZeit: 15.4°C, 233mm (-> kollin)  
 1981-2010 Jahr: 9.3°C, 537mm ~ VegZeit: 16.1°C, 271mm (-> kollinplanar)  
 Standortstyp: Polygon = Tt T Z 2 - Bäs, Profil = Tt T2 Z - Bäs  
 Wasserhaushalt\*: (mäßig)trocken (Mittelhang, Haupthang)  
 Trophie\*: schwach\_mesotroph - Substrat/Lagerung\*\*: T2.2 (Typ 2, Klasse 1)  
 Substratgruppe: unverlehnterSand (-)



**Bodenanalytik - Bodenphysik und Aziditätsstatus**

| Tiefe          | TRD(Fb)   | Vorrat(Fb) | GrobB   | nFK(KA5) | nFK(WR4) | pH(H2O)   | pH(KCl)   | pH(CaCl2) |
|----------------|-----------|------------|---------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| cm             | g/cm³     | t/ha       | Vol%    | mm       | mm       | (DIN-pH)  | (DIN-pH)  | (DIN-pH)  |
| <b>Auflage</b> | n.a.      | 47.9-72.3  | n.a.    | n.a.     | n.a.     | 3.78-3.56 | 3.19-2.76 | -2.94     |
| <b>0 - 5</b>   | 1.29-1.26 | 645-631    | 0.0-0.0 | ~6.5     | ~7.5     | 3.92-3.79 | 3.42-3.09 | -3.16     |
| <b>5 - 10</b>  | 1.47-1.43 | 737-713    | 0.0-0.0 | ~5.0     | ~6.5     | 4.31-3.93 | 3.86-3.31 | -3.35     |
| <b>10 - 30</b> | 1.54-1.55 | 3080-3110  | 0.0-0.0 | ~18.0    | ~22.0    | 4.55-4.64 | 4.20-4.14 | -4.09     |
| <b>30 - 60</b> | 1.57-1.57 | 4701-4702  | 0.0-0.0 | ~27.0    | ~33.0    | 4.68-4.57 | 4.36-4.32 | -4.30     |
| <b>60 - 90</b> | 1.58-1.58 | 4736-4745  | 0.0-0.0 | ~27.0    | ~33.0    | 4.59-4.47 | 4.28-4.41 | -4.30     |
| <b>0 - 90</b>  | ~1.54     | 0-13900    | 0.0-0.0 | ~83.5    | ~102.0   | ~4.39     | ~3.93     | ~3.94     |

II bodenphysikalische Beprobung: Prof01\_30\_60 | Prof01\_60\_90 | Sats\_00\_05 | Sats\_05\_10 | Sats\_10\_30

|              |              |             |        |        |      |           |              |
|--------------|--------------|-------------|--------|--------|------|-----------|--------------|
| nFK (BZE II) | äußerst ger. | sehr gering | gering | mittel | hoch | sehr hoch | äußerst hoch |
|--------------|--------------|-------------|--------|--------|------|-----------|--------------|

|                         |    |       |    |    |    |       |
|-------------------------|----|-------|----|----|----|-------|
| Pufferbereiche (BZE II) | Fe | Fe-Al | Al | AT | Si | CaCO3 |
|-------------------------|----|-------|----|----|----|-------|

**Bodenanalytik - Austauschkapazität und Stoffvorräte, C-Gehalt**

| Tiefe                | BasSättg  | AustKap    | Ca'        | Mg'       | K'         | Corg      | Corg      | Nges      | C/N       |
|----------------------|-----------|------------|------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| cm                   | %         | kmol(c)/ha | kg/ha      | kg/ha     | kg/ha      | t/ha      | g/kg      | t/ha      | -         |
| <b>Auflage</b>       | ~34.8     | ~28.8      | 88.1-194.0 | 19.3-32.2 | 31.6-57.6  | 16.1-33.1 | 336-458   | 0.66-1.12 | 24.5-29.5 |
| <b>0 - 5</b>         | 10.3-15.6 | 11.3-19.3  | 20.3-33.7  | 0.7-5.6   | 2.6-24.1   | 7.9-9.7   | 12.2-15.3 | 0.31-0.36 | 25.2-26.9 |
| <b>5 - 10</b>        | 9.5-14.6  | 8.9-18.8   | 14.8-23.0  | 0.1-5.8   | 1.8-31.6   | 4.1-7.7   | 5.6-10.8  | 0.22-0.31 | 18.6-25.0 |
| <b>10 - 30</b>       | 10.3-12.0 | 29.9-40.7  | 51.7-34.0  | ~11.8     | 11.9-87.0  | 11.4-13.3 | 3.7-4.3   | 0.70-0.59 | 16.3-22.5 |
| <b>30 - 60</b>       | 14.9-12.4 | 34.8-44.1  | 88.2-29.9  | ~12.4     | 21.7-116.2 | 10.5-12.9 | 2.2-2.8   | 0.81-0.71 | 12.9-18.3 |
| <b>60 - 90</b>       | 17.4-13.5 | 39.2-35.9  | 113.7-23.5 | ~10.4     | 31.3-110.6 | 5.2-6.5   | 1.1-1.4   | 0.53-0.47 | 9.9-13.8  |
| <b>0 - 90</b>        | ~13.2     | ~158.9     | ~144.1     | ~46.0     | ~369.6     | ~50.1     | ~3.6      | ~2.44     | ~20.6     |
| <b>Aufl.&amp; 90</b> | n.a.      | n.a.       | ~338       | ~78       | ~427       | ~83.2     | n.a.      | ~3.56     | n.a.      |

\* Auflage = Königswasser; Mineralboden = Austauschkapazität, wird ggf. aus AKt und AKe kombiniert! - \* = AKt zumindest anteilig eingegangen.

I Beprobung: Prof01\_L\_Prof01\_Of | Prof01\_0h | Prof01\_00\_06 | Prof01\_06\_20 | Prof01\_140\_200 | Prof01\_20\_42 | Prof01\_42\_53 | Prof01\_53\_90 | Prof01\_90\_140 | max. = 200cm

II Beprobung: Sats\_L\_Sats\_Of | Sats\_0h | Sats\_00\_05 | Sats\_05\_10 | Sats\_10\_30 | Sats\_30\_60 | Sats\_60\_90 | max. = 90cm

|                    |             |        |               |        |             |      |           |
|--------------------|-------------|--------|---------------|--------|-------------|------|-----------|
| Bewertung (BZE II) | sehr gering | gering | gering/mittel | mittel | mittel/hoch | hoch | sehr hoch |
|--------------------|-------------|--------|---------------|--------|-------------|------|-----------|

|                         |           |      |            |        |           |     |          |
|-------------------------|-----------|------|------------|--------|-----------|-----|----------|
| C/N-Verhältnis (BZE II) | sehr weit | weit | mäßig weit | mittel | mäßig eng | eng | sehr eng |
|-------------------------|-----------|------|------------|--------|-----------|-----|----------|

Zellinhalte = [BZE II]-[BZE III], Konfiguration: Humuskorrektur >15%; H6 und H7 verwenden, Zuordnung Bodenphysik: locker, Vollständigkeit AKe: locker, uBG-Ersatz: ja  
 Bewertungen-Kategorien und Grenzen nach Forstl. Standortsaufnahme, 6. Aufl. (außer nFK: 7. Aufl.)  
 erzeugt mit ECO-RAST Aman V4.29\_32 am 14.11.2019 15:02:53, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

**BZE ST03187** (Bund = 150037, Land\_I = 3187, Land\_II = 3187, EU = -)

ElbeTangerwinkelNiederung, MittleresNordostdeutschesAltmoränenland

GK R4488476 / H5802252, UTM32N R692682 / H5804127

44 m NN, Süd-Exposition, Neigung: 1 gon (1,6 %), Klimastufe: Tiefland,trocken

Landkreis Börde, FoA Letzingen, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 8.6°C, 497mm ~ VegZeit: 15.4°C, 233mm (-&gt; kollin)

1981-2010 Jahr: 9.3°C, 537mm ~ VegZeit: 16.1°C, 271mm (-&gt; kollinplanar)

Stammzahl/ha: 800, Grundfläche: 34.9 m<sup>2</sup>/ha

Flächenanteil Verjüngung: 5 %, Pflanzenarten: 14

Plot-Info: - Störung II: keine

Info I: - Info II: -

**Bestockung**

|                          | BZE I (03.11.1992) | BZE II (03.08.2006) |
|--------------------------|--------------------|---------------------|
| <b>Bestockungstyp</b>    | Kiefer>70          | Kiefer>70           |
| <b>Bestandesstruktur</b> | einstufig          | einstufig           |
| <b>Kronenschluss</b>     | geschlossen        | geschlossen         |
| <b>Mischungsform</b>     | Reinbestand        | Reinbestand         |

**Ertragskundliche Aufnahmen und Kennwerte BZE II**

| Baumart            | Anteil <sup>°</sup> | Alter <sup>°</sup> | BHD <sup>°</sup> | KrAnsatz <sup>°</sup> | Höhe <sup>°</sup> | ErtrKI <sup>°°</sup> | HöhBon <sup>°°</sup> | Volumen <sup>°°</sup> | VolZuw <sup>°°</sup>   | BestockGr |
|--------------------|---------------------|--------------------|------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-----------|
|                    | %                   | 2007               | cm               | m                     | m                 | -                    | -                    | m <sup>3</sup>        | m <sup>3</sup> (gesch) | -         |
| <b>Kiefer n=36</b> | 100.0               | 83.0               | 25.6             | 14.4 (n=7)            | 20.1 (n=32)       | 3,1                  | 20,9                 | 324,8                 | 6,3                    | 1,1       |

erlaubte Probekreis-Entfernungen berücksichtigt

° = Oberschicht, °° = Oberschicht

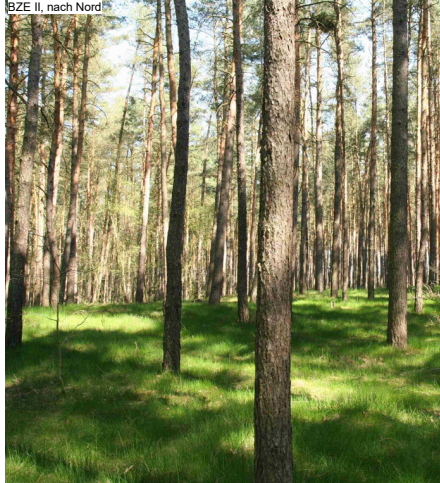
**Blatt-Gehalte BZE II \***

| Baumart                | Ca   | Mg   | K    | P    | C      | N     | C/N   | BIMasse |
|------------------------|------|------|------|------|--------|-------|-------|---------|
|                        | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg   | g/kg  | -     | g       |
| <b>Kiefer Nadeljg1</b> | 3.62 | 0.90 | 6.65 | 1.67 | 522.47 | 20.63 | 25.33 | 20.80   |
| <b>Kiefer Nadeljg2</b> | 5.42 | 0.61 | 5.68 | 1.49 | 536.73 | 18.40 | 29.17 | 18.20   |

BZE II, vertikal



BZE II, nach Nord



03.08.2006

1sch Ki-Rb, 82j ger-ve mittl Bh, n Höhe maß, diff, n BHD deutl diff, Ki tw astig, bogig, tw kleinkronig, ve HZW, StA, tw Trocknis; im UST ve Ki aus Diff, kleinkronig, keine eigene Schicht ausbildend

\* Bewertungsrahmen (Göttlein 2015)

unter Symptomgrenze

unter Normalbereich

im Normalbereich

über Normalbereich

erzeugt mit ECO-RASTAmn V4.29\_32 am 14.11.2019 15:02:55, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 3)

**BZE ST03187** (Bund = 150037, Land\_I = 3187, Land\_II = 3187, EU = -)

ElbeTangerwinkelNiederung, MittleresNordostdeutschesAltmoränenland

GK R4488476 / H5802252, UTM32N R692682 / H5804127

44 m NN, Süd-Exposition, Neigung: 1 gon (1,6 %), Klimastufe: Tiefland,trocken

Landkreis Börde, FoA Letzlingen, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 8.6°C, 497mm ~ VegZeit: 15.4°C, 233mm (-> kollin)

1981-2010 Jahr: 9.3°C, 537mm ~ VegZeit: 16.1°C, 271mm (-> kollinplanar)

Pflanzenarten: 14 (Lage Vegetations-Parzelle normal)



**Bodenvegetation BZE II**

| Aufnahme: 15.08.2008          | Artenzahl | Gesamtdeckung | Summe Deckung |
|-------------------------------|-----------|---------------|---------------|
| <b>Oberschicht</b>            | 2         | 65            | 65.5          |
| <b>Unterstand</b>             | 1         | 1             | 1.0           |
| <b>Strauchschicht</b>         | 1         | 1             | 0.5           |
| <b>Krautschicht (h=60 cm)</b> | 6         | 95            | 96.7          |
| <b>Mooschicht</b>             | 2         | 65            | nicht erhoben |
| <b>30m-Kreis</b>              | 4         | nicht erhoben | nicht erhoben |

**Pflanzenliste und Deckungsgrade BZE II**

(1/1)

| German Standard List       | Flora Europ.   | ökol. AGr.   | Oberschicht | Unterstand | Strauch | Kraut | Moos | 30m-Kreis |
|----------------------------|----------------|--------------|-------------|------------|---------|-------|------|-----------|
| Pinus sylvestris           | 26.007.007     |              | 65.0        | 1.0        |         |       |      |           |
| Viscum album s. austriacum | 043.002.005.DL |              | 0.5         |            |         |       |      |           |
| Quercus robur              | 36.004.014     |              |             |            | 0.5     | 0.5   |      |           |
| Betula pendula             | 34.001.001     | .            |             |            |         | 0.1   |      |           |
| Calamagrostis epigejos     | 193.091.001    | II.3a,IV.2-3 |             |            |         | 0.5   |      |           |
| Carex arenaria             | 199.012.012    |              |             |            |         | 0.5   |      |           |
| Deschampsia flexuosa       | 193.074.005    | II.2a        |             |            |         | 95.0  |      |           |
| Dryopteris carthusiana     | 19.003.017     | III.2        |             |            |         | 0.1   |      |           |
| Hypnum cupressiforme       | 357.005.003    | II.1         |             |            |         |       | x    |           |
| Pleurozium schreberi       | 357.008.001    | II.1         |             |            |         |       | x    |           |
| Dryopteris dilatata        | 19.003.009     | III.3        |             |            |         |       |      | x         |
| Prunus avium               | 80.035.014     |              |             |            |         |       |      | x         |
| Rubus fruticosus ag.       | 080.009.076.DL | .            |             |            |         |       |      | x         |
| Rubus idaeus               | 80.009.007     | 02,II.3a     |             |            |         |       |      | x         |

|                               |    |       |    |       |    |       |    |       |    |
|-------------------------------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|
| Trennarten bzgl. pH in 0-5 cm | Fe | Fe-Al | Al | Al-AT | AT | AT-Si | Si | Si-Ca | Ca |
|-------------------------------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|

erzeugt mit ECO-RASTAmn V4.29\_32 am 14.11.2019 15:02:55, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

**BZE ST00284** (Bund = 150072, Land\_I = 284, Land\_II = 284, EU = 8284)**Östlicher Unterharz, Harz**

GK R4445835 / H5715514, UTM32N R653655 / H5715709

377 m NN, keine-Exposition, Neigung: 0 gon (0,0 %), Klimastufe:

Landkreis Mansfeld-Südharz, FoA Harz, Besitz: Landeswald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 7.4°C, 611mm ~ VegZeit: 14.3°C, 251mm (-&gt; submontan)

1981-2010 Jahr: 8.0°C, 665mm ~ VegZeit: 14.8°C, 279mm (-&gt; kollin)

Standortstyp: Polygon = Uf T K 2 - Mi.Sf-5, Profil = Uf T2w K - Mi.GB-5

Wasserhaushalt\*: frisch (Zentrallage, Kulminationsbereich\_eben\_gestreckt)

Trophie\*: gut\_mesotroph - Substrat/Lagerung\*\*: B3.1 (Typ 27, Klasse 13)

Substratgruppe: Lösslehm (-)

**Profil-Morphologie**

|                                 | <b>BZE I (03.11.1992)</b>                       | <b>BZE II (04.07.2006)</b>                     |
|---------------------------------|---|--|
| <b>Streuart</b>                 | keineAngabe                                     | Blattstreu                                     |
| <b>Humusform</b>                | mullartigerModer                                | F-Mull   |
| <b>Humusmenge, Auflage</b>      | 17.0 t/ha [5.0 cm], L: 3.0, Of: 2.0, Oh: 0.0 cm | 9.0 t/ha [1.5 cm], L: 1.1, Of: 0.4, Oh: 0.0 cm |
| <b>Bodentyp</b>                 | Braunerde-Pseudogley                            | Pseudogley-Parabraunerde (nicht_podsolig)      |
| <b>Bearbeitung, Veränderung</b> | keine, keineVeränderungenFestgestellt           | keine, nichtErhoben (nichtErhoben)             |
| <b>Gründigkeit</b>              |   | 90   |

**Horizont-Ansprache BZE I**

| Horizont (Schicht) | FbArt | Dwurz(fein)  | LagDichte   | GroB % |
|--------------------|-------|--------------|-------------|--------|
| 004 Ah ()          | Ut3   | stark        | gering      | 1      |
| 032 Bv ()          | Lu    | sehr_stark   | mitteldicht | 5      |
| 044 Swd ()         | Lu    | mittel       | mitteldicht | 10     |
| 080 Sd ()          | Ut3   | schwach      | dicht       | 15     |
| 100 Cv ()          | -9    | keineWurzeln | sehr_dicht  | 85     |

**Horizont-Ansprache BZE II** (akt. GwStand: cm)

| Horizont (Schicht) | FbArt | Dwurz(fein)  | Hauptsubstrat  | Stratigraphie    |
|--------------------|-------|--------------|----------------|------------------|
| 007 Ah (I)         | Ut3   | stark        | Lößlehm        | Wechsel-Kaltzeit |
| 030 Bv-Al (I)      | Ut3   | stark        | Lößlehm        | Wechsel-Kaltzeit |
| 063 Al+Bt (I)      | Ut3   | mittel       | Lößlehm        | Wechsel-Kaltzeit |
| 085 Bt-Sw (I)      | Tu4   | schwach      | Lößlehm        | Wechsel-Kaltzeit |
| 090 Cv (I)         | -2    | sehr_schwach | Kieselschiefer | Karbon           |

\*: gemäß länderübergreifender Synopse

\*\* B3.1: Löß/Feinlehm\_mächtig/sandiger\_oder\_verarmt

Typ 27: Lößlehm, auch vermisch (&gt;=70cm) über basenarmem Silikatgestein

Klasse 13: Löß und Löß(misch)lehme (&gt;70cm)

Info Profil II: 30 - 63 cm: Flecken und Zungen mit 10YR7/3; Bitte Rücksprache wegen Substrat/

Bodentyp BZE I: Grobboden: siehe Wägung auf Blatt MBHG. WRB-Klassifikation: Luvisol, Alisol oder Lixisol, Ake und BS an Zusatzproben untersuchen

Info Humus II: -



erzeugt mit ECO-RAST Aman V4.29\_32 am 14.11.2019 15:01:52, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

Abbildung 4: Kurzportrait des BZE-Punktes 284 im unteren Ostharz (Substratgruppe Lösslehm), aus-  
gelesen aus dem ECO-Datenbanksystem der NW-FVA

(Fortsetzung Abbildung 4)

**BZE ST00284** (Bund = 150072, Land\_I = 284, Land\_II = 284, EU = 8284)

**ÖstlicherUnterharz, Harz**

GK R4445835 / H5715514, UTM32N R653655 / H5715709

377 m NN, keine-Exposition, Neigung: 0 gon (0,0 %), Klimastufe:

Landkreis MansfeldSüdharz, FoA Harz, Besitz: Landeswald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 7.4°C, 611mm ~ VegZeit: 14.3°C, 251mm (-> submontan)

1981-2010 Jahr: 8.0°C, 665mm ~ VegZeit: 14.8°C, 279mm (-> kollin)

Standortstyp: Polygon = Uf T K 2 - Mi.Sf-5, Profil = Uf T2w K - Mi.GB-5

Wasserhaushalt\*: frisch (Zentrallage, Kulminationsbereich\_eben\_gestreckt)

Trophie\*: gut\_mesotroph - Substrat/Lagerung\*\*: B3.1 (Typ 27, Klasse 13)

Substratgruppe: Lösslehm (-)



**Bodenanalytik - Bodenphysik und Aziditätsstatus**

| Tiefe          | TRD(Fb)   | Vorrat(Fb) | GrobB     | nFK(KA5) | nFK(WR4) | pH(H2O)   | pH(KCl)   | pH(CaCl2) |
|----------------|-----------|------------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| cm             | g/cm³     | t/ha       | Vol%      | mm       | mm       | (DIN-pH)  | (DIN-pH)  | (DIN-pH)  |
| <b>Auflage</b> | n.a.      | 17.0-9.0   | n.a.      | n.a.     | n.a.     | 5.20-5.48 | 3.92-4.98 | -5.03     |
| <b>0 - 5</b>   | 1.03-1.03 | 452-452    | 12.3-12.3 | ~10.5    | ~9.2     | 5.23-5.22 | 4.98-4.38 | -4.53     |
| <b>5 - 10</b>  | 1.38-1.32 | 624-598    | 9.5-9.2   | ~9.5     | ~7.3     | 4.72-5.00 | 4.50-3.85 | -4.26     |
| <b>10 - 30</b> | 1.38-1.39 | 2498-2501  | 9.5-10.0  | ~34.2    | ~27.0    | 4.72-4.78 | 4.50-3.69 | -3.97     |
| <b>30 - 60</b> | 1.46-1.47 | 4140-4169  | 5.5-5.2   | ~37.0    | ~34.1    | 4.65-4.81 | 3.92-3.66 | -3.97     |
| <b>60 - 90</b> | ~1.71     | ~4040      | ~21.4     | ~44.8    | ~33.0    | ~4.85     | ~3.55     | ~3.98     |
| <b>0 - 90</b>  | ~1.50     | 0-11760    | 0.0-12.3  | ~136.0   | ~110.6   | ~4.84     | ~3.65     | ~4.00     |

II bodenphysikalische Beprobung: Prof01\_30\_60 | Prof01\_60\_90 | Sats\_00\_05 | Sats\_05\_10 | Sats\_10\_30

|              |              |             |        |        |      |           |              |
|--------------|--------------|-------------|--------|--------|------|-----------|--------------|
| nFK (BZE II) | äußerst ger. | sehr gering | gering | mittel | hoch | sehr hoch | äußerst hoch |
|--------------|--------------|-------------|--------|--------|------|-----------|--------------|

|                         |    |       |    |    |    |       |
|-------------------------|----|-------|----|----|----|-------|
| Pufferbereiche (BZE II) | Fe | Fe-Al | Al | AT | Si | CaCO3 |
|-------------------------|----|-------|----|----|----|-------|

**Bodenanalytik - Austauschkapazität und Stoffvorräte, C-Gehalt**

| Tiefe                 | BasSättg  | AustKap     | Ca'          | Mg'         | K'          | Corg      | Corg      | Nges      | C/N       |
|-----------------------|-----------|-------------|--------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| cm                    | %         | kmol(c)/ha  | kg/ha        | kg/ha       | kg/ha       | t/ha      | g/kg      | t/ha      | -         |
| <b>Auflage</b>        | ~89.7     | ~4.4        | 253.6-115.2  | 28.2-12.5   | 45.8-24.8   | 5.4-3.5   | 315-393   | 0.33-0.13 | 16.1-28.2 |
| <b>0 - 5</b>          | 87.6-81.9 | 61.7-57.1   | 1004.1-804.0 | 30.4-44.4   | 55.0-105.9  | 19.9-22.7 | 44.0-50.3 | 1.48-1.50 | 13.5-15.1 |
| <b>5 - 10</b>         | 31.2-61.6 | 16.2-52.6   | 74.7-567.5   | 7.5-24.6    | 28.2-66.2   | 4.5-13.4  | 7.2-22.3  | 0.56-0.89 | 8.0-15.1  |
| <b>10 - 30</b>        | 31.2-25.0 | 64.9-176.5  | 299.0-679.2  | 30.0-43.5   | 112.8-206.4 | 18.0-18.0 | 7.2-7.2   | 2.24-1.65 | 8.0-10.9  |
| <b>30 - 60</b>        | 27.2-38.3 | 209.6-363.6 | 860.3-1911.3 | 116.9-331.2 | 172.6-557.5 | 8.9-18.1  | 2.2-4.4   | 1.95-2.38 | 4.6-7.6   |
| <b>60 - 90</b>        | ~50.7     | ~418.2      | ~2619.6      | ~782.6      | ~554.3      | ~15.2     | ~3.8      | ~2.26     | ~6.7      |
| <b>0 - 90</b>         | ~44.4     | ~1067.9     | ~6581.6      | ~1226.3     | ~1490.3     | ~87.3     | ~7.4      | ~8.68     | ~10.1     |
| <b>Aufl. &amp; 90</b> | n.a.      | n.a.        | ~6697        | ~1239       | ~1515       | ~90.9     | n.a.      | ~8.80     | n.a.      |

\* Auflage = Königswasser; Mineralboden = Austauschkapazität, wird ggf. aus AKt und AKe kombiniert! -- \* = AKt zumindest anteilig eingegangen.

I Beprobung: Prof01\_L,Prof01\_Of | Prof01\_00\_05 | Prof01\_05\_32 | Prof01\_32\_44 | Prof01\_44\_60 | Prof01\_60\_80 | max. = 80cm

II Beprobung: Sats\_L | Sats\_Of | Sats\_00\_05 | Sats\_05\_10 | Sats\_10\_30 | Sats\_30\_60 | Sats\_60\_90 | max. = 90cm

|                    |             |        |               |        |             |      |           |
|--------------------|-------------|--------|---------------|--------|-------------|------|-----------|
| Bewertung (BZE II) | sehr gering | gering | gering/mittel | mittel | mittel/hoch | hoch | sehr hoch |
|--------------------|-------------|--------|---------------|--------|-------------|------|-----------|

|                         |           |      |            |        |           |     |          |
|-------------------------|-----------|------|------------|--------|-----------|-----|----------|
| C/N-Verhältnis (BZE II) | sehr weit | weit | mäßig weit | mittel | mäßig eng | eng | sehr eng |
|-------------------------|-----------|------|------------|--------|-----------|-----|----------|

Zellinhalte = [BZE I]-[BZE II], Konfiguration: Humuskorrektur >15%; H6 und H7 verwenden, Zuordnung Bodenphysik: locker, Vollständigkeit AKe: locker, uBG-Ersatz: ja

Bewertungs-Kategorien und Grenzen nach Forstl. Standortaufnahme, 6. Aufl. (außer nFK: 7. Aufl.)

erzeugt mit ECO-RASTAmAn V4.29\_32 am 14.11.2019 15:01:53, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 4)

**BZE ST00284** (Bund = 150072, Land\_I = 284, Land\_II = 284, EU = 8284)**ÖstlicherUnterharz, Harz**

GK R4445835 / H5715514, UTM32N R653655 / H5715709

377 m NN, keine-Exposition, Neigung: 0 gon (0,0 %), Klimastufe: untereLage,feucht

Landkreis MansfeldSüdharz, FoA Harz, Besitz: Landeswald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 7.4°C, 611mm ~ VegZeit: 14.3°C, 251mm (-&gt; submontan)

1981-2010 Jahr: 8.0°C, 665mm ~ VegZeit: 14.8°C, 279mm (-&gt; kollin)

Stammzahl/ha: 170, Grundfläche: 32.5 m<sup>2</sup>/ha

Flächenanteil Verjüngung: 80 %, Pflanzenarten: 31

Plot-Info: - Störung II: keine

Info I: - Info II: -

**Bestockung**

|                          | <b>BZE I (03.11.1992)</b> | <b>BZE II (06.07.2007)</b> |
|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
| <b>Bestockungstyp</b>    | Buche>70                  | Buche>70                   |
| <b>Bestandesstruktur</b> | zweistufig                | zweistufig                 |
| <b>Kronenschluss</b>     | geschlossen               | geschlossen                |
| <b>Mischungsform</b>     | stammweise_einzeln        | Reinbestand                |

**Ertragskundliche Aufnahmen und Kennwerte BZE II**

| Baumart              | Anteil <sup>°</sup> | Alter <sup>°</sup> | BHD <sup>°</sup> | KrAnsatz <sup>°</sup> | Höhe <sup>°</sup> | ErtrKI <sup>°°</sup> | HöHBon <sup>°°</sup> | Volumen <sup>°°</sup> | VolZuw <sup>°°</sup>   | BestockGr |
|----------------------|---------------------|--------------------|------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-----------|
|                      | %                   | 2007               | cm               | m                     | m                 | -                    | -                    | m <sup>3</sup>        | m <sup>3</sup> (gesch) | -         |
| <b>Rotbuche n=17</b> | 100.0               | 116.0              | 48.5             | 16.9 (n=5)            | 34.5 (n=17)       | 1,1                  | 32,1                 | 578,3                 | 15,1                   | 1         |

erlaubte Probekreis-Entfernungen berücksichtigt

° = Oberschicht, °° = Oberschicht

**Blatt-Gehalte BZE II \***

| Baumart               | Ca   | Mg   | K    | P    | C      | N     | C/N   | BIMasse |
|-----------------------|------|------|------|------|--------|-------|-------|---------|
|                       | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg   | g/kg  | -     | g       |
| <b>Rotbuche Blatt</b> | 9.01 | 0.86 | 6.74 | 1.13 | 529.89 | 23.52 | 22.53 | 12.80   |

BZE II, vertikal



BZE II, nach Nord



06.07.2007

2sch RBu-Rb, 116j, mittl-stark Bh, n Höhe ger diff, n BHD deutl diff, RBu lang, tlw HZW, StÄ, übw gute Schaftform, ve großkro, ve KlÄ, alte Schlagschäden, Drehwuchs, insgesamt wüchsig, im SO ve SEI, 116j, mittl Bh, KTR, im UST RBu, HBu, ca. 20-35j, Sth, KlÄ, aus NV

|                                    |                     |                     |                  |                    |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| * Bewertungsrahmen (Göttlein 2015) | unter Symptomgrenze | unter Normalbereich | im Normalbereich | über Normalbereich |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|--------------------|

erzeugt mit ECO-RASTAmn V4.29\_32 am 14.11.2019 15:01:54. (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 4)

**BZE ST00284** (Bund = 150072, Land\_I = 284, Land\_II = 284, EU = 8284)

**ÖstlicherUnterharz, Harz**

GK R4445835 / H5715514, UTM32N R653655 / H5715709

377 m NN, keine-Exposition, Neigung: 0 gon (0,0 %), Klimastufe: untereLage,feucht

Landkreis MansfeldSüdharz, FoA Harz, Besitz: Landeswald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 7.4°C, 611mm ~ VegZeit: 14.3°C, 251mm (-> submontan)

1981-2010 Jahr: 8.0°C, 665mm ~ VegZeit: 14.8°C, 279mm (-> kollin)

Pflanzenarten: 31 (Lage Vegetations-Parzelle abweichend)



**Bodenvegetation BZE II**

| Aufnahme: 09.05.2007          | Artenzahl | Gesamtdeckung | Summe Deckung |
|-------------------------------|-----------|---------------|---------------|
| <b>Oberschicht</b>            | 1         | 80            | 80.0          |
| <b>Unterstand</b>             | 2         | 15            | 15.0          |
| <b>Strauchschicht</b>         | 1         | 50            | 50.0          |
| <b>Krautschicht (h=30 cm)</b> | 17        | 60            | 61.5          |
| <b>Mooschicht</b>             | 2         | 0             | nicht erhoben |
| <b>30m-Kreis</b>              | 11        | nicht erhoben | nicht erhoben |

**Pflanzenliste und Deckungsgrade BZE II**

(1/1)

| German Standard List           | Flora Europ. | ökol. Agr.    | Oberschicht | Unterstand | Strauch | Kraut | Moos | 30m-Kreis |
|--------------------------------|--------------|---------------|-------------|------------|---------|-------|------|-----------|
| <i>Fagus sylvatica</i>         | 36.001.001   |               | 80.0        | 13.0       | 50.0    | 10.0  |      |           |
| <i>Carpinus betulus</i>        | 35.001.001   |               |             | 2.0        |         |       |      |           |
| <i>Anemone nemorosa</i>        | 61.014.001   | II.3a         |             |            |         | 20.0  |      |           |
| <i>Cardamine bulbifera</i>     | 68.040.001   | ell.4         |             |            |         | 5.0   |      |           |
| <i>Carex sylvatica</i>         | 199.012.064  | II.3b         |             |            |         | 1.0   |      |           |
| <i>Convallaria majalis</i>     | 183.042.001  | I.3           |             |            |         | 2.0   |      |           |
| <i>Fraxinus excelsior</i>      | 139.004.003  |               |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Hordelymus europaeus</i>    | 193.058.001  | II.5a,[ell.4] |             |            |         | 3.0   |      |           |
| <i>Luzula luzuloides</i>       | 189.002.022  | II.2c         |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Melica uniflora</i>         | 193.040.003  | II.3b         |             |            |         | 10.0  |      |           |
| <i>Mycelis muralis</i>         | 169.172.001  | II.3b         |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Oxalis acetosella</i>       | 82.001.006   | III.2         |             |            |         | 1.0   |      |           |
| <i>Phyteuma spicatum</i>       | 168.009.001  | II.3b         |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Poa chaixii</i>             | 193.016.015  | ell.2b        |             |            |         | 5.0   |      |           |
| <i>Poa nemoralis</i>           | 193.016.027  | II.3a         |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Polygonatum multiflorum</i> | 183.046.004  | II.4          |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Stellaria holostea</i>      | 57.006.006   | II.3c         |             |            |         | 1.0   |      |           |
| <i>Urtica dioica</i>           | 40.001.006   | e01           |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Atrichum undulatum</i>      | 385.001.004  | II.3b         |             |            |         |       | x    |           |
| <i>Polytrichum formosum</i>    | 385.005.002  | II.2a         |             |            |         |       | x    |           |
| <i>Alliaria petiolata</i>      | 68.006.001   | 1             |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Cardamine amara</i>         | 68.040.013   |               |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Carex remota</i>            | 199.012.025  | IV.3-4a       |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Juncus conglomeratus</i>    | 189.001.013  | IV.2-3        |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Lamium galeobdolon ag.</i>  | 151.012.001  |               |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Maianthemum bifolium</i>    | 183.043.001  | ell.3a        |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Milium effusum</i>          | 193.102.001  | II.3a         |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Quercus robur</i>           | 36.004.014   |               |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Rubus idaeus</i>            | 80.009.007   | 02,II.3a      |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Rumex crispus</i>           | 47.008.030   |               |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Stachys sylvatica</i>       | 151.016.024  | III.4a        |             |            |         |       |      | x         |

|                               |    |       |    |       |    |       |    |       |    |
|-------------------------------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|
| Trennarten bzgl. pH in 0-5 cm | Fe | Fe-Al | Al | Al-AT | AT | AT-Si | Si | Si-Ca | Ca |
|-------------------------------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|

erzeugt mit ECO-RASTAmAn V4.29\_32 am 14.11.2019 15:01:54, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

**BZE ST04983** (Bund = 150024, Land\_I = 4983, Land\_II = 4983, EU = -)**Östlicher Unterharz, Harz**

GK R4453695 / H5715248, UTM32N R661519 / H5715766

376 m NN, Nordwest-Exposition, Neigung: 2 gon (3,1 %), Klimastufe:

Landkreis MansfeldSüdharz, FoA Harz, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 7.6°C, 569mm ~ VegZeit: 14.5°C, 251mm (-&gt; submontan)

1981-2010 Jahr: 8.4°C, 605mm ~ VegZeit: 15.2°C, 276mm (-&gt; kollin)

Standortstyp: Polygon = Um T K 1 - Mi.Sf-4, Profil = Um N1+ R - Mi.GU-4+

Wasserhaushalt\*: frisch (Oberhang, Haupthang)

Trophie\*: gut\_mesotroph - Substrat/Lagerung\*\*: B6.3 (Typ 36, Klasse 15)

Substratgruppe: Tonschiefer (-)

**Profil-Morphologie**

|                                 | BZE I (10.11.1992)                             | BZE II (14.06.2006)                             |
|---------------------------------|--|---|
| <b>Streuart</b>                 | keineAngabe                                    | Blattstreu                                      |
| <b>Humusform</b>                | typischerMull                                  | typischerMull                                   |
| <b>Humusmenge, Auflage</b>      | 3.5 t/ha [3.0 cm], L: 3.0, Of: 0.0, Oh: 0.0 cm | 26.8 t/ha [1.8 cm], L: 0.5, Of: 0.4, Oh: 0.9 cm |
| <b>Bodentyp</b>                 | Pseudogley-Stagnogley                          | Braunerde-Pseudogley (nicht_podsolig)           |
| <b>Bearbeitung, Veränderung</b> | keine, keineVeränderungenFestgestellt          | keine, nichtErhoben (nichtErhoben)              |
| <b>Gründigkeit</b>              |  | 90  |

**Horizont-Ansprache BZE I**

| Horizont (Schicht) | FbArt | Dwurz(fein)  | LagDichte   | GroB % |
|--------------------|-------|--------------|-------------|--------|
| 006 Ah (I)         | Ut3   | mittel       | gering      | 3      |
| 018 Sw (I)         | Lu    | schwach      | gering      | 5      |
| 046 Sw (I)         | Lu    | schwach      | mitteldicht | 30     |
| 062 Sw-Sd (I)      | Lt2   | schwach      | mitteldicht | 45     |
| 078 Sd (I)         | Lt2   | keineWurzeln | dicht       | 65     |
| 100 Sd (I)         | Lt2   | sehr_schwach | sehr_dicht  | 60     |

**Horizont-Ansprache BZE II**

(akt. GwStand: cm)

| Horizont (Schicht) | FbArt | Dwurz(fein)  | Hauptsubstrat    | Stratigraphie     |
|--------------------|-------|--------------|------------------|-------------------|
| 008 Ah (I)         | Ut3   | stark        | Lößlehm          | Weichsel-Kaltzeit |
| 030 Bv (I)         | Ut3   | schwach      | Lößlehm          | Weichsel-Kaltzeit |
| 047 Bv-Sw (II)     | Lt3   | schwach      | Residuallehm_ton | Weichsel-Kaltzeit |
| 090 Sd (II)        | Tl    | sehr_schwach | Tonschiefer      | Weichsel-Kaltzeit |

\*: gemäß länderübergreifender Synopse

\*\* B6.3: basenreicheSilikatgesteine\_mit\_schluff-/lehmigen-tonigen(Verwitterungs-)Decken

Typ 36: feimbodenreiche Decken (&lt;=70cm) über basenreichem Grundgestein (C3max)

Klasse 15: basenreich und feimbodenreicher

Info Profil II: -

Info Humus II: -

BZE II Profilgrube



erzeugt mit ECO-RASTAman V4.29\_32 am 14.11.2019 15:05:16, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

Abbildung 5: Kurzportrait des BZE-Punktes 4983 im östlichen Unterharz (Substratgruppe Tonschiefer), ausgelesen aus dem ECO-Datenbanksystem der NW-FVA



(Fortsetzung Abbildung 5)

**BZE ST04983** (Bund = 150024, Land\_I = 4983, Land\_II = 4983, EU = -)

**Östlicher Unterharz, Harz**

GK R4453695 / H5715248, UTM32N R661519 / H5715766

376 m NN, Nordwest-Exposition, Neigung: 2 gon (3,1 %), Klimastufe:

Landkreis MansfeldSüdharz, FoA Harz, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 7.6°C, 569mm ~ VegZeit: 14.5°C, 251mm (-> submontan)

1981-2010 Jahr: 8.4°C, 605mm ~ VegZeit: 15.2°C, 276mm (-> kollin)

Standortstyp: Polygon = Um T K 1 - Mi.Sf-4, Profil = Um N1+ R - Mi.GU-4+

Wasserhaushalt\*: frisch (Oberhang, Haupthang)

Trophie\*: gut\_mesotroph - Substrat/Lagerung\*\*: B6.3 (Typ 36, Klasse 15)

Substratgruppe: Tonschiefer (-)



**Bodenanalytik - Bodenphysik und Aziditätsstatus**

| Tiefe          | TRD(Fb)   | Vorrat(Fb) | GrobB     | nFK(KA5) | nFK(WR4) | pH(H2O)   | pH(KCl)   | pH(CaCl2) |
|----------------|-----------|------------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| cm             | g/cm³     | t/ha       | Vol%      | mm       | mm       | (DIN-pH)  | (DIN-pH)  | (DIN-pH)  |
| <b>Auflage</b> | n.a.      | 3.5-26.8   | n.a.      | n.a.     | n.a.     | 5.14-3.83 | 4.98-3.16 | ~3.34     |
| <b>0 - 5</b>   | 0.84-0.82 | 396-387    | 5.7-5.7   | ~14.1    | ~13.2    | 4.91-4.52 | 4.48-3.61 | ~3.95     |
| <b>5 - 10</b>  | 1.15-0.95 | 533-448    | 7.4-5.7   | ~13.2    | ~12.3    | 5.08-4.57 | 4.50-3.56 | ~3.99     |
| <b>10 - 30</b> | 1.31-1.37 | 2215-2502  | 15.3-8.8  | ~49.3    | ~40.1    | 5.48-4.66 | 4.78-3.55 | ~3.99     |
| <b>30 - 60</b> | 1.37-1.36 | 3038-2909  | 26.2-28.9 | ~36.2    | ~23.5    | 6.20-5.05 | 5.23-3.61 | ~4.36     |
| <b>60 - 90</b> | 1.53-1.50 | 1879-1740  | 59.0-61.4 | ~15.0    | ~9.3     | 6.10-5.53 | 4.87-3.74 | ~4.68     |
| <b>0 - 90</b>  | 1.37-1.36 | 8060-7986  | 32.5-32.7 | ~127.9   | ~98.3    | 5.63-4.92 | 4.86-3.63 | ~4.25     |

II bodenphysikalische Beprobung: Prof01\_30\_60 | Prof01\_60\_90 || Sats\_00\_05 | Sats\_05\_10 | Sats\_10\_30

|              |              |             |        |        |      |           |              |
|--------------|--------------|-------------|--------|--------|------|-----------|--------------|
| nFK (BZE II) | äußerst ger. | sehr gering | gering | mittel | hoch | sehr hoch | äußerst hoch |
|--------------|--------------|-------------|--------|--------|------|-----------|--------------|

|                         |    |       |    |    |    |       |
|-------------------------|----|-------|----|----|----|-------|
| Pufferbereiche (BZE II) | Fe | Fe-Al | Al | AT | Si | CaCO3 |
|-------------------------|----|-------|----|----|----|-------|

**Bodenanalytik - Austauschkapazität und Stoffvorräte, C-Gehalt**

| Tiefe                 | BasSättg  | AustKap      | Ca'           | Mg'           | K'          | Corg      | Corg      | Nges       | C/N       |
|-----------------------|-----------|--------------|---------------|---------------|-------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| cm                    | %         | kmol(c)/ha   | kg/ha         | kg/ha         | kg/ha       | t/ha      | g/kg      | t/ha       | -         |
| <b>Auflage</b>        | ~68.5     | ~11.7        | 57.0-163.5    | 12.2-49.8     | 13.9-50.9   | 1.5-11.4  | 435-423   | 0.06-0.62  | 25.2-18.2 |
| <b>0 - 5</b>          | 95.6-71.6 | 97.1-67.1    | 1485.3-746.7  | 186.2-103.4   | 108.0-79.7  | 33.7-30.5 | 85.2-78.9 | 2.81-2.13  | 12.0-14.3 |
| <b>5 - 10</b>         | 94.0-63.4 | 93.5-65.9    | 1467.6-644.1  | 146.1-94.5    | 78.8-62.6   | 22.3-19.4 | 41.8-43.2 | 1.60-1.48  | 13.9-13.1 |
| <b>10 - 30</b>        | 96.9-48.5 | 351.9-270.0  | 5439.0-1909.4 | 748.4-348.8   | 222.9-221.1 | 38.1-55.5 | 17.2-22.2 | 2.82-4.68  | 13.5-11.9 |
| <b>30 - 60</b>        | 99.4-75.5 | 521.9-328.4  | 7869.2-3468.4 | 1410.2-814.7  | 237.0-214.2 | 18.1-15.7 | 6.0-5.4   | 1.17-2.30  | 15.4-6.8  |
| <b>60 - 90</b>        | 98.7-92.0 | 335.7-261.3  | 5001.3-3288.6 | 915.3-858.3   | 130.5-120.4 | 5.6-4.8   | 3.0-2.8   | 0.57-1.15  | 9.8-4.2   |
| <b>0 - 90</b>         | 98.0-71.4 | 1400.2-992.7 | 21262.5-1005. | 3406.2-2219.6 | 777.2-697.9 | 118-126   | 14.6-15.8 | 8.98-11.74 | 13.1-10.7 |
| <b>Aufi. &amp; 90</b> | n.a.      | n.a.         | 21319-10221   | 3418-2269     | 791-749     | 119-137   | n.a.      | 9.04-12.36 | n.a.      |

\* Auflage = Königswasser; Mineralboden = Austauschkapazität, wird ggf. aus AKI und AKe kombiniert! - \* = AKI zumindest anteilig eingegangen.

I Beprobung: Prof01\_L | Prof01\_00\_06 | Prof01\_06\_18 | Prof01\_18\_46 | Prof01\_46\_62 | Prof01\_62\_78 | Prof01\_78\_100 | max. = 100cm

II Beprobung: Sats\_L,Sats\_Or | Sats\_00\_05 | Sats\_05\_10 | Sats\_10\_30 | Sats\_30\_60 | Sats\_60\_90 | max. = 90cm

|                    |             |        |               |        |             |      |           |
|--------------------|-------------|--------|---------------|--------|-------------|------|-----------|
| Bewertung (BZE II) | sehr gering | gering | gering/mittel | mittel | mittel/hoch | hoch | sehr hoch |
|--------------------|-------------|--------|---------------|--------|-------------|------|-----------|

|                         |           |      |            |        |           |     |          |
|-------------------------|-----------|------|------------|--------|-----------|-----|----------|
| C/N-Verhältnis (BZE II) | sehr weit | weit | mäßig weit | mittel | mäßig eng | eng | sehr eng |
|-------------------------|-----------|------|------------|--------|-----------|-----|----------|

Zellinhalte = [BZE I]-[BZE II], Konfiguration: Humuskorrektur >15%: H6 und H7 verwenden, Zuordnung Bodenphysik: locker, Vollständigkeit AKe: locker, uBG-Ersatz: ja

Bewertungs-Kategorien und Grenzen nach Forstl. Standortaufnahme, 6. Aufl. (außer nFK: 7. Aufl.)

erzeugt mit ECO-RAST Aman V4.29\_32 am 14.11.2019 15:05:16, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald-u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 5)

**BZE ST04983** (Bund = 150024, Land\_I = 4983, Land\_II = 4983, EU = -)

**ÖstlicherUntersharz, Harz**

GK R4453695 / H5715248, UTM32N R661519 / H5715766

376 m NN, Nordwest-Exposition, Neigung: 2 gon (3,1 %), Klimastufe: untereLage,mäßig\_feucht

Landkreis MansfeldSüdharz, FoA Harz, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 7.6°C, 569mm ~ VegZeit: 14.5°C, 251mm (-> submontan)

1981-2010 Jahr: 8.4°C, 605mm ~ VegZeit: 15.2°C, 276mm (-> kollin)

Stammzahl/ha: 650, Grundfläche: 34.2 m²/ha

Flächenanteil Verjüngung: 65 %, Pflanzenarten: 38

Plot-Info: - Störung II: keine



Info I: - Info II: Ausdehnung der Fläche durch Einzäunung nach NE und EE eingeschränkt, daher wurden Satelliten 2 und 3 nach innen verlegt

**Bestockung**

|                          | BZE I (10.11.1992)      | BZE II (29.06.2006) |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| <b>Bestockungstyp</b>    | sonstLaub>70            | sonstLaub>70        |
| <b>Bestandesstruktur</b> | mehrstufig_plenterartig | einstufig           |
| <b>Kronenschluss</b>     | geschlossen             | licht               |
| <b>Mischungsform</b>     | stammweise_einzeln      | gruppenweise        |

**Ertragskundliche Aufnahmen und Kennwerte BZE II**

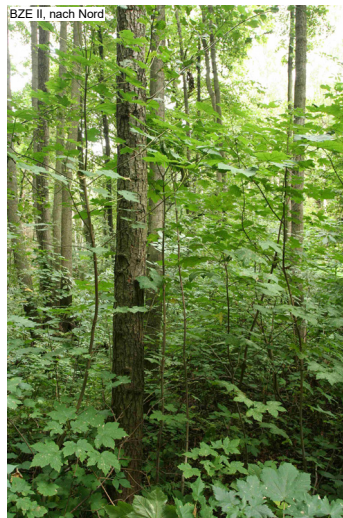
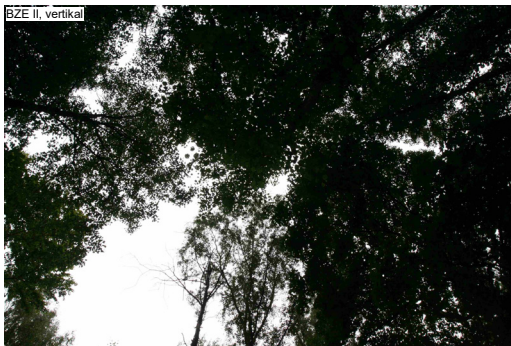
| Baumart                 | Anteil* | Alter° | BHD° | KrAnsatz°  | Höhe°       | ErtrKf°° | HöhBonit°° | Volumen°° | VolZuw°°   | BestockGr |
|-------------------------|---------|--------|------|------------|-------------|----------|------------|-----------|------------|-----------|
|                         | %       | 2007   | cm   | m          | m           | -        | -          | m³        | m³ (gesch) | -         |
| <b>Schwarzerle n=19</b> | 76.0    | 56.0   | 28.7 | 14.1 (n=3) | 21.5 (n=10) | 1,7      |            | 260,8     | 5,9        | 1,1       |
| <b>Sandbirke n=3</b>    | 12.0    | 58.0   | 34.3 | 10.3 (n=2) | 22.9 (n=3)  | 0,9      |            | 39,5      | 1          | 0,2       |
| <b>Stieleiche n=1</b>   | 4.0     | 58.0   | 27.3 | 8.9 (n=1)  | 20.2 (n=1)  | 0,9      | 27,5       | 14,5      | 0,7        |           |
| <b>Rotbuche n=1</b>     | 4.0     | 61.0   | 32.8 | 9.6 (n=1)  | 23.1 (n=1)  | 0,5      | 34,4       | 10,2      | 0,4        |           |
| <b>Bergahorn n=1</b>    | 4.0     | 61.0   | 44.9 | 7.4 (n=1)  | 25.3 (n=1)  | 1,6      |            | 21,3      | 1          | 0,1       |

erlaubte Probekreis-Entfernungen berücksichtigt

\* = Oberschicht, °° = Oberschicht

**Blatt-Gehalte BZE II \***

| Baumart                 | Ca   | Mg   | K    | P    | C    | N    | C/N | BIMasse |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|-----|---------|
|                         | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg | -   | g       |
| <b>keine Beprobung!</b> |      |      |      |      |      |      |     |         |



29.06.2006

1sch SEr-SBI-Bu-Mb, 56(58/61), ger-mittl, ve(SEr)st Bh; SEr n Dm deutl diff; tw T-ve Mzw, tw ast/bc; grw SBI, tw großkr, tw Trockn; tr-stw Bu, ast/kurzsch, Mzw, ve KIA; stw BAH, Kir(W)/SE(O), 61/58], ger-mittl Bh; s Bu; tw Bu/Hbu/EEs/SEr-Ust, 20-35]

|                                    |                     |                     |                  |                    |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| * Bewertungsrahmen (Göttlein 2015) | unter Symptomgrenze | unter Normalbereich | im Normalbereich | über Normalbereich |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|--------------------|

erzeugt mit ECO-RASTArman V4.29\_32 am 14.11.2019 15:05:17, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 5)

**BZE ST04983** (Bund = 150024, Land\_I = 4983, Land\_II = 4983, EU = -)

**ÖstlicherUnterharz, Harz**

GK R4453695 / H5715248, UTM32N R661519 / H5715766

376 m NN, Nordwest-Exposition, Neigung: 2 gon (3,1 %), Klimastufe: untereLage,mäßig\_feucht

Landkreis MansfeldSüdharz, FoA Harz, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 7.6°C, 569mm ~ VegZeit: 14.5°C, 251mm (-> submontan)

1981-2010 Jahr: 8.4°C, 605mm ~ VegZeit: 15.2°C, 276mm (-> kollin)

Pflanzenarten: 38 (Lage Vegetations-Parzelle normal)



**Bodenvegetation BZE II**

| Aufnahme: 09.05.2007          | Artenzahl | Gesamtdeckung | Summe Deckung |
|-------------------------------|-----------|---------------|---------------|
| <b>Oberschicht</b>            | 3         | 30            | 30.0          |
| <b>Unterstand</b>             | 2         | 10            | 10.0          |
| <b>Strauchschicht</b>         | 5         | 30            | 30.0          |
| <b>Krautschicht (h=80 cm)</b> | 21        | 90            | 100.0         |
| <b>Moosschicht</b>            | 1         | 0             | nicht erhoben |
| <b>30m-Kreis</b>              | 10        | nicht erhoben | nicht erhoben |

**Pflanzenliste und Deckungsgrade BZE II**

(1/2)

| German Standard List             | Flora Europ.   | ökol. Agr.      | Oberschicht | Unterstand | Strauch | Kraut | Moos | 30m-Kreis |
|----------------------------------|----------------|-----------------|-------------|------------|---------|-------|------|-----------|
| <i>Alnus glutinosa</i>           | 34.002.002     |                 | 15.0        |            |         |       |      |           |
| <i>Betula pendula</i>            | 34.001.001     | ...             | 10.0        | 5.0        |         |       |      |           |
| <i>Quercus robur</i>             | 36.004.014     |                 | 5.0         |            |         |       |      |           |
| <i>Sorbus aucuparia</i>          | 80.028.002     | ...             |             | 5.0        | 6.0     | 3.0   |      |           |
| <i>Acer pseudoplatanus</i>       | 95.001.005     |                 |             |            | 15.0    | 5.0   |      |           |
| <i>Corylus avellana</i>          | 35.003.001     | .               |             |            | 0.5     |       |      |           |
| <i>Prunus avium</i>              | 80.035.014     |                 |             |            | 0.5     |       |      |           |
| <i>Sambucus racemosa</i>         | 164.001.003    | 1               |             |            | 8.0     |       |      |           |
| <i>Athyrium filix-femina</i>     | 18.001.001     | III.3           |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Calamagrostis arundinacea</i> | 193.091.011    | II.3a,[eII.2.b] |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Dactylis polygama</i>         | 193.026.003.DL | II.3c           |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Dryopteris filix-mas ag.</i>  | 19.003.001     |                 |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Festuca altissima</i>         | 193.004.006    | II.3a           |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Lamium galeobdolon ag.</i>    | 151.012.001    |                 |             |            |         | 1.0   |      |           |
| <i>Melica uniflora</i>           | 193.040.003    | II.3b           |             |            |         | 1.0   |      |           |
| <i>Milium effusum</i>            | 193.102.001    | II.3a           |             |            |         | 20.0  |      |           |
| <i>Moehringia trinervia</i>      | 57.002.002     | 02,II.3a        |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Oxalis acetosella</i>         | 82.001.006     | III.2           |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Poa nemoralis</i>             | 193.016.027    | II.3a           |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Polygonatum multiflorum</i>   | 183.046.004    | II.4            |             |            |         | 1.0   |      |           |
| <i>Pteridium aquilinum</i>       | 15.001.001     | eIV.1-2         |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Rubus idaeus</i>              | 80.009.007     | 02,II.3a        |             |            |         | 10.0  |      |           |
| <i>Rubus spec.</i>               | 80.009.999     |                 |             |            |         | 50.0  |      |           |
| <i>Scrophularia nodosa</i>       | 154.008.018    | II.3b           |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Senecio nemorensis ag.</i>    | 169.096.017    | .               |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Stellaria holostea</i>        | 57.006.006     | II.3c           |             |            |         | 3.0   |      |           |
| <i>Urtica dioica</i>             | 40.001.006     | e01             |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Atrichum undulatum</i>        | 385.001.004    | II.3b           |             |            |         |       | x    |           |
| <i>Carex remota</i>              | 199.012.025    | IV.3-4a         |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Carex sylvatica</i>           | 199.012.064    | II.3b           |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Gymnocarpium dryopteris</i>   | 18.006.001     | III.3           |             |            |         |       |      | x         |

|                               |    |       |    |       |    |       |    |       |    |
|-------------------------------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|
| Trennarten bzgl. pH in 0-5 cm | Fe | Fe-Al | Al | Al-AT | AT | AT-Si | Si | Si-Ca | Ca |
|-------------------------------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|

erzeugt mit ECO-RASTAmAn V4.29\_32 am 14.11.2019 15:05:17, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 5)

**BZE ST04983** (Bund = 150024, Land\_I = 4983, Land\_II = 4983, EU = -)

Östlicher Unterharz, Harz

GK R4453695 / H5715248, UTM32N R661519 / H5715766

376 m NN, Nordwest-Exposition, Neigung: 2 gon (3,1 %), Klimastufe: untere Lage, mäßig feucht

Landkreis Mansfeld-Südharz, FoA Harz, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 7.6°C, 569mm ~ VegZeit: 14.5°C, 251mm (-&gt; submontan)

1981-2010 Jahr: 8.4°C, 605mm ~ VegZeit: 15.2°C, 276mm (-&gt; kollin)

Pflanzenarten: 38 (Lage Vegetations-Parzelle normal)

**Bodenvegetation BZE II**

| Aufnahme: 09.05.2007          | Artenzahl | Gesamtdeckung | Summe Deckung |
|-------------------------------|-----------|---------------|---------------|
| <b>Oberschicht</b>            | 3         | 30            | 30.0          |
| <b>Unterstand</b>             | 2         | 10            | 10.0          |
| <b>Strauchschicht</b>         | 5         | 30            | 30.0          |
| <b>Krautschicht (h=80 cm)</b> | 21        | 90            | 100.0         |
| <b>Moosschicht</b>            | 1         | 0             | nicht erhoben |
| <b>30m-Kreis</b>              | 10        | nicht erhoben | nicht erhoben |

**Pflanzenliste und Deckungsgrade BZE II**

(2/2)

| German Standard List          | Flora Europ.   | ökol. AGr. | Oberschicht | Unterstand | Strauch | Kraut | Moos | 30m-Kreis |
|-------------------------------|----------------|------------|-------------|------------|---------|-------|------|-----------|
| <i>Impatiens noli-tangere</i> | 98.001.001     | III.4a     |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Lonicera xylosteum</i>     | 164.006.008    | ell.4      |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Luzula pilosa</i>          | 189.002.029    | II.3a      |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Melica nutans</i>          | 193.040.001    | I.3        |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Myosotis spec.</i>         | 148.029.999.DL |            |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Poa chaixii</i>            | 193.016.015    | ell.2b     |             |            |         |       |      | x         |
| <i>Populus tremula</i>        | 31.002.004     |            |             |            |         |       |      | x         |

|                               |    |       |    |       |    |       |    |       |    |
|-------------------------------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|
| Trennarten bzgl. pH in 0-5 cm | Fe | Fe-Al | Al | Al-AT | AT | AT-Si | Si | Si-Ca | Ca |
|-------------------------------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|

erzeugt mit ECO-RASTAm V4.29\_32 am 14.11.2019 15:05:17, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

**BZE ST04304** (Bund = 150011, Land\_I = 4304, Land\_II = 4304, EU = -)

WiesenburgerHochfläming, HoherFläming

GK R4543169 / H5752535, UTM32N R749395 / H5756704

93 m NN, keine-Exposition, Neigung: 0 gon (0,0 %), Klimastufe:

Landkreis Wittenberg, FoA Annaburg, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 8.6°C, 574mm ~ VegZeit: 15.7°C, 260mm (-> kollin)

1981-2010 Jahr: 9.3°C, 611mm ~ VegZeit: 16.4°C, 285mm (-> kollinplanar)

Standortstyp: Polygon = kein Polygon, Profil = Tm T2 K - NoRecord

Wasserhaushalt\*: feucht (Zentrallage, Kulminationsbereich\_eben\_gestreckt)

Trophie\*: mesotroph - Substrat/Lagerung\*\*: T3.5 (Typ 8, Klasse 3)

Substratgruppe: schwachverlehmtersand (-)



**Profil-Morphologie**

|                          | BZE I (12.11.1992)                              | BZE II (23.05.2006)                             |
|--------------------------|---|---|
| Streuart                 | keineAngabe                                     | Blattstreu                                      |
| Humusform                | typischerModer                                  | typischerModer_feinhumusreich                   |
| Humusmenge, Auflage      | 30.7 t/ha [8.0 cm], L: 3.0, Of: 3.0, Oh: 2.0 cm | 97.1 t/ha [6.7 cm], L: 0.6, Of: 1.9, Oh: 4.3 cm |
| Bodentyp                 | unklar  | Pseudogley-Regosol (nicht_podsolig)             |
| Bearbeitung, Veränderung | keine, keineVeränderungenFestgestellt           | keine, nichtErhoben (nichtErhoben)              |
| Gründigkeit              |   | 110   |

**Horizont-Ansprache BZE I**

| Horizont (Schicht) | FbArt | Dwurz(fein) | LagDichte   | GrobB % |
|--------------------|-------|-------------|-------------|---------|
| 005 Ah ()          | Su2   | stark       | keineAngabe | 10      |
| 010 Y ()           | Su3   | mittel      | keineAngabe | 10      |
| 030 Y ()           | Su2   | stark       | keineAngabe | 10      |
| 060 Y ()           | Su2   | sehr_stark  | keineAngabe | 10      |
| 090 Y ()           | Su2   | mittel      | keineAngabe | 10      |
| 140 Y ()           | Su2   | mittel      | keineAngabe | 10      |
| 200 Y ()           | Su2   | mittel      | keineAngabe | 10      |

**Horizont-Ansprache BZE II** (akt. GwStand: cm)

| Horizont (Schicht) | FbArt | Dwurz(fein)  | Hauptsubstrat    | Stratigraphie |
|--------------------|-------|--------------|------------------|---------------|
| 003 Ah (I)         | Su3   | stark        | Sandlöß          | Holozän       |
| 060 Sw-C (I)       | Su3   | mittel       | Sandlöß          | Holozän       |
| 085 IC-Sw (I)      | Sl2   | schwach      | Sandlöß          | Holozän       |
| 110 IC-Sw (II)     | fS    | sehr_schwach | Beckenablagerung | Holozän       |



\*: gemäß länderübergreifender Synopse

\*\* T3.5: 2-/mehrschichtig, 20/30cm verlehmtersand-Lösse o. sandlößähnl. Feinsande über/in verlehmtensanden, z.T. über/in unverlehmtensanden

Typ 8: OB: schwach verlehmt Sande, UB: schwach verlehmt Sande, (insgesamt auch mit Sandlöß und schluffig/schllickig)

Klasse 3: OB: schwach verlehmt Sand (auch schluffig/schllickig) und Lehm, UB: un- und schwach verlehmt Sande und Kiese

Info Profil II: 3 bis 85 cm: Flecken und Bänder aus Braunkohle und Braunkohlen-Schluff

Info Humus II: -

erzeugt mit ECO-RAST Aman V4.29\_32 am 14.11.2019 15:03:57, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

Abbildung 6: Kurzportrait des BZE-Punktes 4304 im Hohen Fläming (Substratgruppe schwach verlehmtersand, Aufschüttung mit Kohleresten), ausgelesen aus dem ECO-Datenbanksystem der NW-FVA

(Fortsetzung Abbildung 6)

**BZE ST04304** (Bund = 150011, Land\_I = 4304, Land\_II = 4304, EU = -)**WiesenerHochfläming, HoherFläming**

GK R4543169 / H5752535, UTM32N R749395 / H5756704

93 m NN, keine-Exposition, Neigung: 0 gon (0,0 %), Klimastufe:

Landkreis Wittenberg, FoA Annaburg, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 8.6°C, 574mm ~ VegZeit: 15.7°C, 260mm (-&gt; kollin)

1981-2010 Jahr: 9.3°C, 611mm ~ VegZeit: 16.4°C, 285mm (-&gt; kollinplanar)

Standortstyp: Polygon = kein Polygon, Profil = Tm T2 K - NoRecord

Wasserhaushalt\*: feucht (Zentrallage, Kulminationsbereich\_eben\_gestreckt)

Trophie\*: mesotroph - Substrat/Lagerung\*\*: T3.5 (Typ 8, Klasse 3)

Substratgruppe: schwachverlehmtersand (-)

**Bodenanalytik - Bodenphysik und Aziditätsstatus**

| Tiefe          | TRD(Fb)   | Vorrat(Fb) | GrobB   | nFK(KA5) | nFK(WR4) | pH(H2O)   | pH(KCl)   | pH(CaCl2) |
|----------------|-----------|------------|---------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| cm             | g/cm³     | t/ha       | Vol%    | mm       | mm       | (DIN-pH)  | (DIN-pH)  | (DIN-pH)  |
| <b>Auflage</b> | n.a.      | 30.7~97.1  | n.a.    | n.a.     | n.a.     | 4.88~4.29 | 4.48~3.57 | ~3.74     |
| <b>0 - 5</b>   | 0.88~0.88 | 433~432    | 1.5~1.5 | ~14.3    | ~13.8    | 4.48~4.25 | 3.96~3.58 | ~3.59     |
| <b>5 - 10</b>  | 1.22~1.22 | 600~600    | 1.6~1.6 | ~13.8    | ~12.3    | 4.38~4.19 | 3.85~3.55 | ~3.57     |
| <b>10 - 30</b> | 1.29~1.25 | 2552~2447  | 1.1~1.8 | ~55.0    | ~49.1    | 4.37~4.26 | 3.80~3.58 | ~3.58     |
| <b>30 - 60</b> | 1.31~1.35 | 3909~4060  | 0.6~0.0 | ~84.0    | ~69.0    | 4.35~4.33 | 3.87~3.70 | ~3.71     |
| <b>60 - 90</b> | 1.33~1.33 | 3990~3988  | 0.0~0.0 | ~75.0    | ~54.0    | 4.32~4.25 | 3.96~3.86 | ~3.87     |
| <b>0 - 90</b>  | ~1.29     | 0~11526    | 0.0~0.6 | ~242.0   | ~198.2   | ~4.27     | ~3.70     | ~3.70     |

II bodenphysikalische Beprobung: Prof01\_30\_60 | Prof01\_60\_90 | Sats\_00\_05 | Sats\_05\_10 | Sats\_10\_30

|              |              |             |        |        |      |           |              |
|--------------|--------------|-------------|--------|--------|------|-----------|--------------|
| nFK (BZE II) | äußerst ger. | sehr gering | gering | mittel | hoch | sehr hoch | äußerst hoch |
|--------------|--------------|-------------|--------|--------|------|-----------|--------------|

|                         |    |       |    |    |    |       |
|-------------------------|----|-------|----|----|----|-------|
| Pufferbereiche (BZE II) | Fe | Fe-Al | Al | AT | Si | CaCO3 |
|-------------------------|----|-------|----|----|----|-------|

**Bodenanalytik - Austauschkapazität und Stoffvorräte, C-Gehalt**

| Tiefe                 | BasSättg  | AustKap     | Ca*           | Mg*       | K*        | Corg      | Corg      | Nges      | C/N       |
|-----------------------|-----------|-------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| cm                    | %         | kmol(c)/ha  | kg/ha         | kg/ha     | kg/ha     | t/ha      | g/kg      | t/ha      | -         |
| <b>Auflage</b>        | ~55.2     | ~34.1       | 281.7~517.3   | 30.1~75.4 | 40.0~91.8 | 7.1~27.5  | 232~283   | 0.45~1.49 | 15.7~18.4 |
| <b>0 - 5</b>          | 51.0~30.7 | 36.3~46.2   | 337.7~240.1   | 15.0~10.6 | 11.6~40.7 | 28.8~28.2 | 66.4~65.4 | 0.42~1.32 | 68.9~21.4 |
| <b>5 - 10</b>         | 49.5~26.5 | 35.5~53.3   | 317.9~240.2   | 16.5~8.8  | 9.1~37.6  | 8.7~24.2  | 14.5~40.3 | 0.46~0.88 | 19.0~27.4 |
| <b>10 - 30</b>        | 44.8~20.0 | 67.5~126.1  | 546.8~416.8   | 26.0~21.6 | 10.8~77.1 | 8.7~79.4  | 3.4~32.5  | 0.64~2.52 | 13.5~31.5 |
| <b>30 - 60</b>        | 46.1~26.9 | 138.8~293.2 | 1186.2~1280.2 | 44.3~69.7 | 8.5~291.0 | 26.3~114  | 6.7~28.0  | 1.67~3.33 | 15.7~34.1 |
| <b>60 - 90</b>        | 46.8~25.3 | 176.4~203.9 | 1552.1~784.8  | 49.5~65.4 | 0.8~206.9 | 39.5~46.9 | 9.9~11.8  | 2.37~1.83 | 16.7~25.5 |
| <b>0 - 90</b>         | ~25.5     | ~722.7      | ~2962.1       | ~176.1    | ~653.3    | ~292      | ~25.4     | ~9.89     | ~29.6     |
| <b>Aufl. &amp; 90</b> | n.a.      | n.a.        | ~3479         | ~252      | ~745      | ~320      | n.a.      | ~11.38    | n.a.      |

\* Auflage = Königswasser; Mineralboden = Austauschkapazität, wird ggf. aus AKT und AKe kombiniert! -- \* = AKT zumindest anteilig eingegangen.

I Beprobung: Prof01\_L\_Prof01\_Of | Prof01\_0h | Prof01\_00\_05 | Prof01\_05\_10 | Prof01\_10\_45 | Prof01\_140\_200 | Prof01\_45\_90 | Prof01\_90\_140 | max. = 200cm

II Beprobung: Sats\_L\_Sats\_Of | Sats\_0h | Sats\_00\_05 | Sats\_05\_10 | Sats\_10\_30 | Sats\_30\_60 | Sats\_60\_90 | max. = 90cm

|                    |             |        |               |        |             |      |           |
|--------------------|-------------|--------|---------------|--------|-------------|------|-----------|
| Bewertung (BZE II) | sehr gering | gering | gering/mittel | mittel | mittel/hoch | hoch | sehr hoch |
|--------------------|-------------|--------|---------------|--------|-------------|------|-----------|

|                         |           |      |            |        |           |     |          |
|-------------------------|-----------|------|------------|--------|-----------|-----|----------|
| C/N-Verhältnis (BZE II) | sehr weit | weit | mäßig weit | mittel | mäßig eng | eng | sehr eng |
|-------------------------|-----------|------|------------|--------|-----------|-----|----------|

Zeilinhalte = [BZE I]-[BZE II], Konfiguration: Humuskorrektur &gt;15%; H6 und H7 verwenden, Zuordnung Bodenphysik: locker, Vollständigkeit AKe: locker, uBG-Ersatz: ja

Bewertungs-Kategorien und Grenzen nach Forstl. Standortaufnahme, 6. Aufl. (außer nFK: 7. Aufl.)

erzeugt mit ECO-RASTAmn V4.29\_32 am 14.11.2019 15:03:57, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 6)

**BZE ST04304** (Bund = 150011, Land\_I = 4304, Land\_II = 4304, EU = -)

WiesenburgerHochfläming, HoherFläming  
GK R4543169 / H5752535, UTM32N R749395 / H5756704

93 m NN, keine-Exposition, Neigung: 0 gon (0,0 %), Klimastufe: Tiefland,mäßig\_feucht

Landkreis Wittenberg, FoA Annaburg, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 8.6°C, 574mm ~ VegZeit: 15.7°C, 260mm (-> kollin)

1981-2010 Jahr: 9.3°C, 611mm ~ VegZeit: 16.4°C, 285mm (-> kollinplanar)

Stammzahl/ha: 430, Grundfläche: 38.9 m²/ha

Flächenanteil Verjüngung: 15 %, Pflanzenarten: 36

Plot-Info: - Störung II: keine

Info I: - Info II: -



**Bestockung**

|                          | BZE I (12.11.1992)      | BZE II (12.09.2006) |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|
| <b>Bestockungstyp</b>    | Eiche>70                | Eiche>70            |
| <b>Bestandesstruktur</b> | mehrstufig_plenterartig | zweistufig          |
| <b>Kronenschluss</b>     | geschlossen             | geschlossen         |
| <b>Mischungsform</b>     | stammweise_einzeln      | stammweise_einzeln  |

**Ertragskundliche Aufnahmen und Kennwerte BZE II**

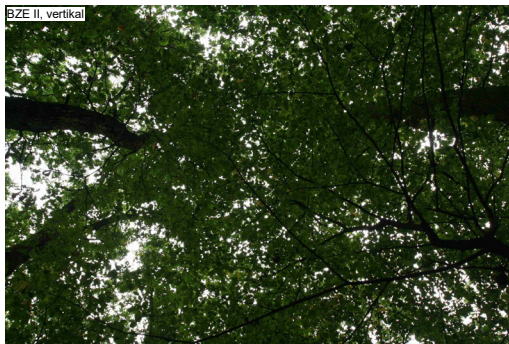
| Baumart         | Anteil° | Alter° | BHD° | KrAnsatz°  | Höhe°       | ErtrkI°° | Höhboni°° | Volumen°° | VolZuw°°   | BestockGr |
|-----------------|---------|--------|------|------------|-------------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|
|                 | %       | 2007   | cm   | m          | m           | -        | -         | m³        | m³ (gesch) | -         |
| Stieleiche n=28 | 90.3    | 66.0   | 35.1 | 11.5 (n=7) | 21.0 (n=28) | 1,5      | 25,5      | 400,3     | 8,9        | 1,4       |
| Kiefer n=3      | 9.7     | 66.0   | 33.6 | 10.7 (n=3) | 18.5 (n=3)  | 2,4      | 23,6      | 28,9      | 0,8        | 0,1       |

erlaubte Probekreis-Entfernungen berücksichtigt

° = Oberschicht, °° = Oberschicht

**Blatt-Gehalte BZE II \***

| Baumart          | Ca   | Mg   | K    | P    | C      | N     | C/N   | BIMasse |
|------------------|------|------|------|------|--------|-------|-------|---------|
|                  | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg   | g/kg  | -     | g       |
| Kiefer Nadeljg1  | 2.84 | 0.69 | 6.18 | 1.53 | 535.66 | 21.44 | 24.98 | 21.90   |
| Kiefer Nadeljg2  | 4.51 | 0.50 | 5.08 | 1.47 | 555.29 | 24.96 | 22.25 | 22.20   |
| Stieleiche Blatt | 6.17 | 1.18 | 7.67 | 1.68 | 535.00 | 32.78 | 16.32 | 23.60   |



12.09.2006  
2sch SEI-KI-Mb,65j,ger-mittl Bh,n Höhe maß diff,n BHD deutl diff,SEI übw kurz,astig,  
ve ZW,Wasserreiser,KiA,im W/N ve Ki,65j u SEI,120j,kurz,astig,tlw ZW,ve alte KBr,matt-  
wüchsig,ve Trocknis aus Diff,im UST FUL,SAh,SEI,Es,Weißdom,ca.20-35j,StH,tlw astig

|                                    |                     |                     |                  |                    |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| * Bewertungsrahmen (Göttlein 2015) | unter Symptomgrenze | unter Normalbereich | im Normalbereich | über Normalbereich |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|--------------------|

(Fortsetzung Abbildung 6)

**BZE ST04304** (Bund = 150011, Land\_I = 4304, Land\_II = 4304, EU = -)

WiesenburgerHochfläming, HoherFläming

GK R4543169 / H5752535, UTM32N R749395 / H5756704

93 m NN, keine-Exposition, Neigung: 0 gon (0,0 %), Klimastufe: Tiefland,mäßig\_feucht

Landkreis Wittenberg, FoA Annaburg, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 8.6°C, 574mm ~ VegZeit: 15.7°C, 260mm (-&gt; kollin)

1981-2010 Jahr: 9.3°C, 611mm ~ VegZeit: 16.4°C, 285mm (-&gt; kollinplanar)

Pflanzenarten: 36 (Lage Vegetations-Parzelle abweichend)

**Bodenvegetation BZE II**

| Aufnahme: 30.08.2008          | Artenzahl | Gesamtdeckung | Summe Deckung |
|-------------------------------|-----------|---------------|---------------|
| <b>Oberschicht</b>            | 2         | 80            | 85.0          |
| <b>Unterstand</b>             | 4         | 90            | 93.0          |
| <b>Strauchschicht</b>         | 5         | 1             | 2.5           |
| <b>Krautschicht (h=30 cm)</b> | 14        | 5             | 8.0           |
| <b>Moosschicht</b>            | 4         | 1             | nicht erhoben |
| <b>30m-Kreis</b>              | 12        | nicht erhoben | nicht erhoben |

**Pflanzenliste und Deckungsgrade BZE II**

(1/2)

| German Standard List    | Flora Europ.   | ökol. AGr.   | Oberschicht | Unterstand | Strauch | Kraut | Moos | 30m-Kreis |
|-------------------------|----------------|--------------|-------------|------------|---------|-------|------|-----------|
| Pinus sylvestris        | 26.007.007     |              | 10.0        |            |         |       |      |           |
| Quercus robur           | 36.004.014     |              | 75.0        |            |         |       |      |           |
| Acer platanoides        | 95.001.001     |              |             | 75.0       |         | 3.0   |      |           |
| Crataegus monogyna      | 80.034.014     |              |             | 5.0        | 0.5     |       |      |           |
| Fraxinus excelsior      | 139.004.003    |              |             | 3.0        |         |       |      |           |
| Ulmus glabra            | 37.001.001     |              |             | 10.0       | 0.5     |       |      |           |
| Euonymus europaea       | 100.001.001    |              |             |            | 0.5     | 0.5   |      |           |
| Rhamnus cathartica      | 103.003.008    |              |             |            | 0.5     |       |      |           |
| Sambucus nigra          | 164.001.002    | 1 1          |             |            | 0.5     | 0.5   |      |           |
| Chelidonium majus       | 66.005.001     | e01          |             |            |         | 0.5   |      |           |
| Geum urbanum            | 80.017.009     | II.4,[e02]   |             |            |         | 0.1   |      |           |
| Hedera helix            | 128.001.001    | II.3a        |             |            |         | 0.5   |      |           |
| Impatiens parviflora    | 98.001.003     | 02,II.3a     |             |            |         | 0.5   |      |           |
| Mahonia aquifolium      | 63.006.001     |              |             |            |         | 0.5   |      |           |
| Polygonatum multiflorum | 183.046.004    | II.4         |             |            |         | 0.1   |      |           |
| Populus tremula         | 31.002.004     |              |             |            |         | 0.1   |      |           |
| Ribes rubrum            | 77.001.002     |              |             |            |         | 0.5   |      |           |
| Rubus fruticosus ag.    | 080.009.076.DL | .            |             |            |         | 1.0   |      |           |
| Sorbus aucuparia        | 80.028.002     | .            |             |            |         | 0.1   |      |           |
| Viola spec.             | 110.001.999.DL |              |             |            |         | 0.1   |      |           |
| Atrichum undulatum      | 385.001.004    | II.3b        |             |            |         |       | x    |           |
| Brachythecium rutabulum | 315.001.019    | e02          |             |            |         |       | x    |           |
| Brachythecium velutinum | 315.001.025    | .            |             |            |         |       | x    |           |
| Hypnum cupressiforme    | 357.005.003    | II.1         |             |            |         |       | x    |           |
| Acer campestre          | 95.001.003     |              |             |            |         |       |      | x         |
| Agrostis capillaris     | 193.087.019    | II.2c        |             |            |         |       |      | x         |
| Arrhenatherum elatius   | 193.064.001    |              |             |            |         |       |      | x         |
| Calamagrostis epigejos  | 193.091.001    | II.3a,IV.2-3 |             |            |         |       |      | x         |
| Deschampsia flexuosa    | 193.074.005    | II.2a        |             |            |         |       |      | x         |
| Plantago major          | 163.001.001    |              |             |            |         |       |      | x         |
| Poa nemoralis           | 193.016.027    | II.3a        |             |            |         |       |      | x         |

| Trennarten bzgl. pH in 0-5 cm | Fe | Fe-Al | Al | Al-AT | AT | AT-Si | Si | Si-Ca | Ca |
|-------------------------------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|
|                               |    |       |    |       |    |       |    |       |    |

erzeugt mit ECO-RASTaman V4.29\_32 am 14.11.2019 15:03:58, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand



(Fortsetzung Abbildung 6)

**BZE ST04304** (Bund = 150011, Land\_I = 4304, Land\_II = 4304, EU = -)

WiesenburgerHochfläming, HoherFläming

GK R4543169 / H5752535, UTM32N R749395 / H5756704

93 m NN, keine-Exposition, Neigung: 0 gon (0,0 %), Klimastufe: Tiefland,mäßig\_feucht

Landkreis Wittenberg, FoA Annaburg, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 8.6°C, 574mm ~ VegZeit: 15.7°C, 260mm (-> kollin)

1981-2010 Jahr: 9.3°C, 611mm ~ VegZeit: 16.4°C, 285mm (-> kollinplanar)

Pflanzenarten: 36 (Lage Vegetations-Parzelle abweichend)



**Bodenvegetation BZE II**

| Aufnahme: 30.08.2008          | Artenzahl | Gesamtdeckung | Summe Deckung |
|-------------------------------|-----------|---------------|---------------|
| <b>Oberschicht</b>            | 2         | 80            | 85.0          |
| <b>Unterstand</b>             | 4         | 90            | 93.0          |
| <b>Strauschicht</b>           | 5         | 1             | 2.5           |
| <b>Krautschicht (h=30 cm)</b> | 14        | 5             | 8.0           |
| <b>Moosschicht</b>            | 4         | 1             | nicht erhoben |
| <b>30m-Kreis</b>              | 12        | nicht erhoben | nicht erhoben |

**Pflanzenliste und Deckungsgrade BZE II**

(2/2)

| German Standard List    | Flora Europ. | ökol. AGR. | Oberschicht | Unterstand | Strauch | Kraut | Moos | 30m-Kreis |
|-------------------------|--------------|------------|-------------|------------|---------|-------|------|-----------|
| Polygonum aviculare ag. | 47.002.017   |            |             |            |         |       |      | x         |
| Prunus spinosa          | 80.035.008   |            |             |            |         |       |      | x         |
| Rosa canina             | 80.010.018   |            |             |            |         |       |      | x         |
| Solidago canadensis     | 169.003.003  |            |             |            |         |       |      | x         |
| Tortilis japonica       | 129.102.003  |            |             |            |         |       |      | x         |

|                               |    |       |    |       |    |       |    |       |    |
|-------------------------------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|
| Trennarten bzgl. pH in 0-5 cm | Fe | Fe-Al | Al | Al-AT | AT | AT-Si | Si | Si-Ca | Ca |
|-------------------------------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|

erzeugt mit ECO-RASTAm V4.29\_32 am 14.11.2019 15:03:59, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

**BZE ST00259** (Bund = 150069, Land\_I = 259, Land\_II = 259, EU = 8259)

DübenerHeideHochfläche, DübenerNiederlausitzerAltmooränenland

GK R4542368 / H5728546, UTM32N R749581 / H5732694

162 m NN, keine-Exposition, Neigung: 0 gon (0,0 %), Klimastufe:

Landkreis Wittenberg, FoA Dessau, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 8.4°C, 586mm ~ VegZeit: 15.4°C, 270mm (-&gt; kollin)

1981-2010 Jahr: 9.2°C, 628mm ~ VegZeit: 16.2°C, 293mm (-&gt; kollinplanar)

Standortstyp: Polygon = Tm T M 2 - MoS, Profil = Tm T2 Z - MoS

Wasserhaushalt\*: (mäßig)trocken (Zentrallage, Kulminationsbereich\_eben\_gestreckt)

Trophie\*: oligotroph - Substrat/Lagerung\*\*: T2.2 (Typ 2, Klasse 1)

Substratgruppe: unverlehmterSand (-)

**Profil-Morphologie**

|                                 | BZE I (16.11.1992)                              | BZE II (11.07.2006)                              |
|---------------------------------|---|--|
| <b>Streuart</b>                 | keineAngabe                                     | Blatt-NadelStreugemisch                          |
| <b>Humusform</b>                | typischerRohhumus                               | rohhumusartigerModer_feinhumusreich              |
| <b>Humusmenge, Auflage</b>      | 50.3 t/ha [β.0 cm], L: 2.0, Of: 2.0, Oh: 4.0 cm | 109.5 t/ha [7.7 cm], L: 0.6, Of: 2.8, Oh: 4.4 cm |
| <b>Bodentyp</b>                 | Podsol-Braunerde                                | Podsol ((Podsol))                                |
| <b>Bearbeitung, Veränderung</b> | keine, Streunutzung                             | keine, nichtErhoben (nichtErhoben)               |
| <b>Gründigkeit</b>              |   | 145  |

**Horizont-Ansprache BZE I**

| Horizont (Schicht) | FbArt | Dwurz(fein) | LagDichte   | GroB % |
|--------------------|-------|-------------|-------------|--------|
| 004 Aeh (I)        | SI2   | sehr_stark  | dicht       | 0      |
| 039 Ahe (I)        | SI2   | stark       | dicht       | 0      |
| 052 Bsh (I)        | SI3   | stark       | dicht       | 0      |
| 080 Bv (I)         | SI2   | stark       | mitteldicht | 0      |
| 150 Cv (I)         | Ss    | schwach     | dicht       | 0      |

**Horizont-Ansprache BZE II**

(akt. GwStand: cm)

| Horizont (Schicht) | FbArt | Dwurz(fein)  | Hauptsubstrat         | Stratigraphie     |
|--------------------|-------|--------------|-----------------------|-------------------|
| 003 Aeh (I)        | mS    | stark        | GeschiebedeckLehmS..  | Weichsel-Kaltzeit |
| 033 Ae (I)         | mS    | schwach      | GeschiebedeckLehmS..  | Weichsel-Kaltzeit |
| 037 Bh (I)         | mS    | mittel       | GeschiebedeckLehmS..  | Weichsel-Kaltzeit |
| 055 Bs (I)         | mS    | mittel       | GeschiebedeckLehmS..  | Weichsel-Kaltzeit |
| 092 Cv (I)         | mS    | schwach      | Schmelzwasserablage.. | Saale-Kaltzeit    |
| 145 C (I)          | mS    | sehr_schwach | Schmelzwasserablage.. | Saale-Kaltzeit    |

\*: gemäß länderübergreifender Synopse

\*\* T2.2: einschichtig, unverlehmte silikatärmste Tal-/Schmelzwassersande, auch ± unverlehmte geschiefelführende Sande größerer Mächtigkeit

Typ 2: OB: unverlehmter Sand, UB: unverlehmter Sand/Kies (kiesig)

Klasse 1: OB: Kies und unverlehmter Sand, UB: Kies und unverlehmter Sand

Info Profil II: -

Info Humus II: -

BZE II Profigrube



erzeugt mit ECO-RAST Aman V4.29\_32 am 14.11.2019 15:01:39, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

Abbildung 7: Kurzportrait des BZE-Punktes 259 in der Dübener Heide (Substratgruppe unverlehmter Sand, Flugasche beeinflusst), ausgelesen aus dem ECO-Datenbanksystem der NW-FVA

(Fortsetzung Abbildung 7)

**BZE ST00259** (Bund = 150069, Land\_I = 259, Land\_II = 259, EU = 8259)  
**DübenerHeideHochfläche, DübenerNiederlausitzerAltmoränenland**  
 GK R4542368 / H5728546, UTM32N R749581 / H5732694

162 m NN, keine-Exposition, Neigung: 0 gon (0,0 %), Klimastufe:

Landkreis Wittenberg, FoA Dessau, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 8.4°C, 586mm ~ VegZeit: 15.4°C, 270mm (-> kollin)

1981-2010 Jahr: 9.2°C, 628mm ~ VegZeit: 16.2°C, 293mm (-> kollinplanar)

Standortstyp: Polygon = Tm T M 2 - MoS, Profil = Tm T2 Z - MoS

Wasserhaushalt\*: (mäßig)trocken (Zentrallage, Kulminationsbereich\_eben\_gestreckt)

Trophie\*: oligotroph - Substrat/Lagerung\*\*: T2.2 (Typ 2, Klasse 1)

Substratgruppe: unverlehmterSand (-)



**Bodenanalytik - Bodenphysik und Aziditätsstatus**

| Tiefe          | TRD(Fb)   | Vorrat(Fb) | GrobB   | nFK(KA5) | nFK(WR4) | pH(H2O)   | pH(KCl)   | pH(CaCl2) |
|----------------|-----------|------------|---------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| cm             | g/cm³     | t/ha       | Vol%    | mm       | mm       | (DIN-pH)  | (DIN-pH)  | (DIN-pH)  |
| <b>Auflage</b> | n.a.      | 50.3~109.5 | n.a.    | n.a.     | n.a.     | 4.47~3.88 | 3.98~3.43 | ~3.49     |
| <b>0 - 5</b>   | 1.19~1.19 | 590~590    | 0.9~0.9 | ~5.9     | ~6.4     | 4.41~4.43 | 3.71~3.47 | ~3.50     |
| <b>5 - 10</b>  | 1.51~1.49 | 747~736    | 1.1~1.0 | ~3.5     | ~5.4     | 4.54~4.99 | 3.73~3.49 | ~3.59     |
| <b>10 - 30</b> | 1.51~1.49 | 2987~2942  | 1.1~1.1 | ~11.9    | ~17.8    | 4.54~4.71 | 3.73~3.88 | ~3.91     |
| <b>30 - 60</b> | 1.56~1.55 | 4659~4660  | 0.7~0.0 | ~18.0    | ~27.0    | 4.47~4.82 | 3.95~4.36 | ~4.29     |
| <b>60 - 90</b> | 1.66~1.68 | 4980~5051  | 0.0~0.0 | ~15.0    | ~27.0    | 4.62~4.83 | 4.47~4.40 | ~4.50     |
| <b>0 - 90</b>  | ~1.56     | 0~13978    | 0.0~0.3 | ~54.3    | ~83.7    | ~4.77     | ~4.03     | ~4.06     |

II bodenphysikalische Beprobung: Prof01\_30\_60 | Prof01\_60\_90 | Sats\_00\_05 | Sats\_05\_10 | Sats\_10\_30

|              |              |             |        |        |      |           |              |
|--------------|--------------|-------------|--------|--------|------|-----------|--------------|
| nFK (BZE II) | äußerst ger. | sehr gering | gering | mittel | hoch | sehr hoch | äußerst hoch |
|--------------|--------------|-------------|--------|--------|------|-----------|--------------|

|                         |    |       |    |    |    |       |
|-------------------------|----|-------|----|----|----|-------|
| Pufferbereiche (BZE II) | Fe | Fe-Al | Al | AT | Si | CaCO3 |
|-------------------------|----|-------|----|----|----|-------|

**Bodenanalytik - Austauschkapazität und Stoffvorräte, C-Gehalt**

| Tiefe                 | BasSättg  | AustKap    | Ca'         | Mg'       | K'         | Corg      | Corg      | Nges      | C/N       |
|-----------------------|-----------|------------|-------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| cm                    | %         | kmol(c)/ha | kg/ha       | kg/ha     | kg/ha      | t/ha      | g/kg      | t/ha      | -         |
| <b>Auflage</b>        | ~31.3     | ~32.7      | 121.2~317.7 | 19.7~67.2 | 21.0~72.4  | 12.7~38.1 | 252~348   | 0.65~1.67 | 19.6~22.8 |
| <b>0 - 5</b>          | 36.9~25.5 | 10.6~16.1  | 70.1~63.7   | 2.3~3.3   | 9.2~18.3   | 6.9~12.3  | 11.7~20.8 | 0.32~0.41 | 21.5~30.2 |
| <b>5 - 10</b>         | 51.0~30.7 | 7.8~12.5   | 75.0~56.9   | 1.3~4.6   | 4.6~24.3   | 3.0~4.4   | 4.0~6.0   | 0.18~0.18 | 16.6~24.9 |
| <b>10 - 30</b>        | 51.0~25.2 | 31.2~37.7  | 300.2~117.1 | 5.4~16.0  | 18.6~91.2  | 11.9~14.1 | 4.0~4.8   | 0.72~0.62 | 16.6~22.8 |
| <b>30 - 60</b>        | 36.2~29.1 | 46.1~49.3  | 312.7~108.3 | 4.2~23.7  | 29.3~208.4 | 18.8~16.3 | 4.0~3.5   | 1.09~0.75 | 17.2~21.8 |
| <b>60 - 90</b>        | 41.2~23.3 | 35.3~41.6  | 262.7~83.0  | 4.3~20.0  | 41.4~152.1 | 10.7~13.8 | 2.2~2.7   | 1.00~0.66 | 10.7~21.1 |
| <b>0 - 90</b>         | ~26.4     | ~157.1     | ~429.0      | ~67.6     | ~494.3     | ~60.9     | ~4.4      | ~2.60     | ~23.4     |
| <b>Aufl. &amp; 90</b> | n.a.      | n.a.       | ~747        | ~135      | ~567       | ~99.0     | n.a.      | ~4.27     | n.a.      |

\* Auflage = Königswasser; Mineralboden = Austauschkapazität, wird ggf. aus AKt und AKe kombiniert! -- \* = AKt zumindest anteilig eingegangen.

I Beprobung: Prof01\_L\_Prof01\_Of | Prof01\_0h | Prof01\_00\_05 | Prof01\_05\_39 | Prof01\_140\_200 | Prof01\_39\_52 | Prof01\_52\_80 | Prof01\_80\_140 | max. = 200cm

II Beprobung: Sats\_L | Sats\_Of | Sats\_0h | Sats\_00\_05 | Sats\_05\_10 | Sats\_10\_30 | Sats\_30\_60 | Sats\_60\_90 | max. = 90cm

|                    |             |        |               |        |             |      |           |
|--------------------|-------------|--------|---------------|--------|-------------|------|-----------|
| Bewertung (BZE II) | sehr gering | gering | gering/mittel | mittel | mittel/hoch | hoch | sehr hoch |
|--------------------|-------------|--------|---------------|--------|-------------|------|-----------|

|                         |           |      |            |        |           |     |          |
|-------------------------|-----------|------|------------|--------|-----------|-----|----------|
| C/N-Verhältnis (BZE II) | sehr weit | weit | mäßig weit | mittel | mäßig eng | eng | sehr eng |
|-------------------------|-----------|------|------------|--------|-----------|-----|----------|

Zellinhalte = [BZE I]-[BZE II], Konfiguration: Humuskorrektur >15%; H6 und H7 verwenden, Zuordnung Bodenphysik: locker, Vollständigkeit AKe: locker, uBG-Ersatz: ja  
 Bewertungskategorien und Grenzen nach Forstl. Standortaufnahme, 6. Aufl. (außer nFK: 7. Aufl.)  
 erzeugt mit ECO-RASTAmAn V4.29\_32 am 14.11.2019 15:01:39, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 7)

**BZE ST00259** (Bund = 150069, Land\_I = 259, Land\_II = 259, EU = 8259)

DübenerHeideHochfläche, DübenerNiederlausitzerAltmoränenland

GK R4542368 / H5728546, UTM32N R749581 / H5732694

162 m NN, keine-Exposition, Neigung: 0 gon (0,0 %), Klimastufe: Tiefland,mäßig\_feucht

Landkreis Wittenberg, FoA Dessau, Besitz: Privatwald

Kalkung: nein

Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 8.4°C, 586mm ~ VegZeit: 15.4°C, 270mm (-&gt; kollin)

1981-2010 Jahr: 9.2°C, 628mm ~ VegZeit: 16.2°C, 293mm (-&gt; kollinplanar)

Stammzahl/ha: 560, Grundfläche: 35.2 m<sup>2</sup>/ha

Flächenanteil Verjüngung: 40 %, Pflanzenarten: 16

Plot-Info: - Störung II: Straße

Info I: - Info II: Kleinrelief: Schurf liegt in einer ca. 0,5 m tiefen Mulde

**Bestockung**

|                          | BZE I (16.11.1992) | BZE II (11.07.2006) |
|--------------------------|--------------------|---------------------|
| <b>Bestockungstyp</b>    | Kiefer>70          | Kiefer>70           |
| <b>Bestandesstruktur</b> | zweistufig         | einstufig           |
| <b>Kronenschluss</b>     | geschlossen        | geschlossen         |
| <b>Mischungsform</b>     | stammweise_einzeln | Reinbestand         |

**Ertragskundliche Aufnahmen und Kennwerte BZE II**

| Baumart            | Anteil <sup>°</sup> | Alter <sup>°</sup> | BHD <sup>°</sup> | KrAnsatz <sup>°</sup> | Höhe <sup>°</sup> | ErtrKI <sup>°°</sup> | HöhBon <sup>°°</sup> | Volumen <sup>°°</sup> | VolZuw <sup>°°</sup>   | BestockGr |
|--------------------|---------------------|--------------------|------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-----------|
|                    | %                   | 2007               | cm               | m                     | m                 | -                    | -                    | m <sup>3</sup>        | m <sup>3</sup> (gesch) | -         |
| <b>Kiefer n=33</b> | 100.0               | 76.0               | 30.6             | 18.1 (n=8)            | 24.7 (n=33)       | 1,7                  | 26,3                 | 391,8                 | 8,1                    | 1         |

erlaubte Probekreis-Entfernungen berücksichtigt

° = Oberschicht, °° = Oberschicht

**Blatt-Gehalte BZE II \***

| Baumart                | Ca   | Mg   | K    | P    | C      | N     | C/N   | BlMasse |
|------------------------|------|------|------|------|--------|-------|-------|---------|
|                        | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg   | g/kg  | -     | g       |
| <b>Kiefer Nadeljg1</b> | 3.36 | 0.82 | 6.60 | 1.71 | 531.26 | 19.82 | 26.80 | 15.40   |
| <b>Kiefer Nadeljg2</b> | 6.01 | 0.56 | 6.06 | 1.50 | 546.69 | 18.08 | 30.24 | 14.80   |

BZE II, vertikal



BZE II, nach Nord



11.07.2006

1sch Ki-Rb,76j,ger-ve mittl Bh,n Höhe maß diff,n BHD deutl diff,Ki tlw astig, kleinkronig,  
 ve bogig,beullig,ve alte KBr,ve Trocknis aus Diff,im UST ve Ki aus Diff,kleinkronig,  
 gering,tlw bogig,keine eigene Schicht bildend

|                                    |                     |                     |                  |                    |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| * Bewertungsrahmen (Göttlein 2015) | unter Symptolgrenze | unter Normalbereich | im Normalbereich | über Normalbereich |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|--------------------|

erzeugt mit ECO-RASTAmAn V4.29\_32 am 14.11.2019 15:01:40, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 7)

**BZE ST00259** (Bund = 150069, Land\_I = 259, Land\_II = 259, EU = 8259)  
 DübenerHeideHochfläche, DübenNiederlausitzerAltmoränenland  
 GK R4542368 / H5728546, UTM32N R749581 / H5732694  
 162 m NN, keine-Exposition, Neigung: 0 gon (0,0 %), Klimastufe: Tiefland,mäßig\_feucht  
 Landkreis Wittenberg, FoA Dessau, Besitz: Privatwald  
 Kalkung: nein  
 Klimakennwerte 1961-1990 Jahr: 8.4°C, 586mm ~ VegZeit: 15.4°C, 270mm (-> kollin)  
 1981-2010 Jahr: 9.2°C, 628mm ~ VegZeit: 16.2°C, 293mm (-> kollinplanar)  
 Pflanzenarten: 16 (Lage Vegetations-Parzelle abweichend)



**Bodenvegetation BZE II**

| Aufnahme: 01.07.2008          | Artenzahl | Gesamtdeckung | Summe Deckung |
|-------------------------------|-----------|---------------|---------------|
| <b>Oberschicht</b>            | 1         | 70            | 70.0          |
| <b>Unterstand</b>             | 1         | 5             | 5.0           |
| <b>Strauchschicht</b>         | 4         | 10            | 12.0          |
| <b>Krautschicht (h=30 cm)</b> | 14        | 80            | 79.0          |
| <b>Moosschicht</b>            |           |               |               |
| <b>30m-Kreis</b>              |           |               |               |

**Pflanzenliste und Deckungsgrade BZE II**

(1/1)

| German Standard List           | Flora Europ. | ökol. AGr.   | Oberschicht | Unterstand | Strauch | Kraut | Moos | 30m-Kreis |
|--------------------------------|--------------|--------------|-------------|------------|---------|-------|------|-----------|
| <i>Pinus sylvestris</i>        | 26.007.007   |              | 70.0        |            |         |       |      |           |
| <i>Fagus sylvatica</i>         | 36.001.001   |              |             | 5.0        | 10.0    | 0.5   |      |           |
| <i>Betula pendula</i>          | 34.001.001   | ..           |             |            | 1.0     | 0.5   |      |           |
| <i>Prunus serotina</i>         | 80.035.018   | .            |             |            | 0.5     |       |      |           |
| <i>Sorbus aucuparia</i>        | 80.028.002   | ..           |             |            | 0.5     | 0.5   |      |           |
| <i>Calamagrostis epigejos</i>  | 193.091.001  | II.3a,IV.2-3 |             |            |         | 2.0   |      |           |
| <i>Deschampsia flexuosa</i>    | 193.074.005  | II.2a        |             |            |         | 10.0  |      |           |
| <i>Dryopteris carthusiana</i>  | 19.003.017   | III.2        |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Epilobium angustifolium</i> | 123.005.001  | 01,II.2c     |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Luzula luzuloides</i>       | 189.002.022  | II.2c        |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Quercus petraea</i>         | 36.004.011   |              |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Rubus idaeus</i>            | 80.009.007   | 02,II.3a     |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Rubus spec.</i>             | 80.009.999   |              |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Rubus spectabilis</i>       | 80.009.006   |              |             |            |         | 0.5   |      |           |
| <i>Teucrium scorodonia</i>     | 151.002.011  | II.2b        |             |            |         | 2.0   |      |           |
| <i>Vaccinium myrtillus</i>     | 132.018.006  | II.1         |             |            |         | 60.0  |      |           |

|                               |    |       |    |       |    |       |    |       |    |
|-------------------------------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|
| Trennarten bzgl. pH in 0-5 cm | Fe | Fe-Al | Al | Al-AT | AT | AT-Si | Si | Si-Ca | Ca |
|-------------------------------|----|-------|----|-------|----|-------|----|-------|----|

erzeugt mit ECO-RASTAmn V4.29\_32 am 14.11.2019 15:01:40, (c) Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand



## 3 Einleitung

### 3.1 Allgemeine Einführung zum Thema Boden

*Uwe Paar, Jan Evers*

Ohne die Böden der Erde könnte die Menschheit nicht ernährt werden. Dieser vielfältig belebte oberste Teil der Erdkruste ist die ökologische Lebensgrundlage zur Erzeugung von Nahrung und Energie und ist deshalb ein kostbares Gut. Auch im Wald, der in Deutschland zumeist die ursprüngliche Vegetationsform darstellt, sind die Böden die Grundlage für alles Leben. Sie stellen Lebensraum und Standorte für Lebensgemeinschaften und bilden zusammen mit Luftraum, Flora und Fauna das Waldökosystem.



*Abbildung 8: Humoser Oberboden auf Kalk*

#### 3.1.1 Bodenbildung

Im Grenzbereich zwischen Atmosphäre und festem bzw. lockerem Gestein entstehen Böden als Teil der Biosphäre durch physikalische und chemische Prozesse (Verwitterung) sowie durch die Tätigkeit einer Vielzahl von Organismen. Böden setzen sich aus Mineralien unterschiedlicher Art und Größe sowie aus organischen Stoffen zusammen. Die räumliche Anordnung der Bodenteilchen erzeugt das Bodengefüge mit einem bestimmten Hohlraumssystem, das mit Bodenlösung (Wasser mit gelösten Salzen und Gasen) und Luft gefüllt ist. Die bodenbildenden Prozesse stellen sich als

dynamisches System dar, das in ständiger kleinräumlicher Entwicklung begriffen ist. Böden entwickeln sich aufgrund unterschiedlicher Ausgangsgesteine, Klimafaktoren und Relief sowie durch die Beeinflussung durch Bodenwasser, Vegetation, Tier und Mensch zu verschiedenen Bodentypen. Diese Faktoren sind durch Stofftransporte miteinander verknüpft und schaffen eine Vielzahl unterschiedlicher Böden. Erst eine bestimmte Kombination von Verwitterung, damit verbundener Nährstofffreisetzung, Hohlraumsystem, Bodenwasser sowie Bodenluft schafft die Grundlage für eine bestimmte Pflanzen- und Baumartenkombination (Waldgesellschaft) und die daran gebundene Fauna.

### 3.1.2 Funktionen der Böden

Böden dienen vielen pflanzlichen und tierischen Organismen als Lebensraum und Lebensgrundlage. Die physikalische Verankerung und die Versorgung von Pflanzen mit Wasser, Gasen und Nährstoffen hängen dabei von der Durchwurzelbarkeit der Böden sowie von der Leitfähigkeit für Flüssigkeiten und Gase ab. Als Bestandteil des Naturhaushalts spielen Böden aufgrund ihrer Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften eine zentrale Rolle als Speicher- und Transformationsmedium gegenüber einer großen Zahl von Umwelteinflüssen.

Waldböden stellen mit ihren vergleichsweise mächtigen humosen Schichten eine wichtige Senke für Kohlenstoff im globalen Kohlenstoffhaushalt dar. Die Kohlenstoffvorräte im Boden übersteigen die oberirdischen Speicher teils um das Doppelte (FAO 2006). Kohlenstoff kann dabei im Boden in karbonatisch und organisch gebundener Form (Humus, organische Substanz und Lebensgemeinschaften des Mineralbodens) vorliegen. Abgefallene Baumkompartimente (Blätter und Äste) und abgestorbene Wurzeln stellen die wichtigste Humusquelle dar. Sie werden von zahlreichen Bodenorganismen zersetzt und mineralisiert. Die Umsetzungsgeschwindigkeit ist dabei wiederum von den Faktoren der Bodenbildung abhängig und resultiert in unterschiedlichen Bodenhumusgehalten und -vorräten, wobei der Humusgehalt zumeist mit der Bodentiefe abnimmt (SCHACHTSCHABEL et al. 1998).

Darüber hinaus hat der weitgehend noch naturbelassene Waldboden eine bedeutende Funktion als Wasserspeicher und leistet so einen wichtigen Beitrag zur verstetigten Wasserversorgung der Waldbestände. Informationen zur mengenmäßigen Erfassung und Verknüpfung von Niederschlag, Speicherwirkung und Transpiration gibt der Wasserhaushalt eines Gebietes (KÖLLING u. FALK 2010). In Abhängigkeit von Bodenart und -gefüge können die Folgen von Trockenperioden abgepuffert, Hochwasserspitzen gemildert und die stetige Nachlieferung von Grundwasser ermöglicht werden. Hohe Speicherwirkungen erzielen Böden mit hohem Lehm- und Schluffgehalten, während grobe Sande und Tone deutlich geringere Wassermengen speichern. Auch hohe Stein-(Skelett-)Gehalte vermindern die pflanzenverfügbare Wassermenge.



Böden können wertvolle natur- und kulturhistorische Archive darstellen, die es zu erfassen und zu erforschen gilt, bevor sie durch Nutzung oder dynamische Bodenentwicklung verloren gehen.

Die Lebensgrundlage des Menschen sichern Böden z. B. als Rohstofflager, als Nutzungsfläche für Siedlung und Verkehr, für die Land- und Forstwirtschaft sowie für Naturschutzbelange.

Ziel des deutschen Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBODSCHG 1998) ist es, all diese Bodenfunktionen zu sichern oder wiederherzustellen. Daraus leitet sich die Vorsorge zur Verhinderung schädlicher Bodenveränderungen ab.

### 3.1.3 Gefährdungen

Viele Jahrhunderte liefen in Waldböden ohne menschliche Nutzung eher langsame natürliche Prozesse ab, deren Dynamik Flora und Fauna durch Anpassung zu meist folgen konnten. Historische Waldnutzungen wie beispielsweise Köhlerei, Glashütten, Erzgewinnung oder Streunutzung führten teilweise schon zu starken Veränderungen der Waldböden. Besonders in den letzten Jahrzehnten veränderte jedoch eine Vielzahl von unterschiedlichen Umweltfaktoren (z. B. Stickstoff-, Säure- und Schwermetalleinträge) die Böden so schnell, dass die Anpassungsmöglichkeiten vieler Tier- und Pflanzenarten sowie von Standorten überschritten wurde. Aufgrund der langen Verweildauer von Schadstoffen und der Akkumulation in Böden können dadurch Schädigungen des Lebensraumes auftreten und die Bodenfunktionen erheblich beeinträchtigen. Schadstoffeinträge unterschiedlicher Quellen, die über Luft, Niederschläge oder auch Grund- und Oberflächenwasser auf die Waldböden einwirken, können zur Versauerung und zu einem daraus resultierenden Ungleichgewicht beim Nährstoffangebot sowie zur Kontaminierung mit toxischen Schwermetallen und organischen Schadstoffen (z. B. Lindan, Dieldrin) führen.

In versauerten Böden werden die *basischen Nährelemente* wie Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Natrium (Na) und Kalium (K) verstärkt von Säurekationen wie Aluminium (Al), Eisen (Fe), Mangan (Mn) und Protonen von den negativ geladenen Austauscherplätzen im Boden verdrängt und mit dem Sickerwasser aus dem durchwurzelten Boden ausgewaschen. Sie stehen somit nicht mehr zur Pflanzenernährung zur Verfügung. Auch eine übermäßige, nicht standortsangepasste Biomassennutzung kann auf einigen Standorten zum Nährstoffentzug und damit zu einer verringerten Basensättigung beitragen (GLATZEL 1991). Dies verschlechtert letztlich die Lebensbedingungen für Wurzeln und Bodentiere und damit auch die Bodenfruchtbarkeit (KÖLLING 2010).

Obwohl der *Stickstoff* (N) für Pflanzen einen lebensnotwendigen Nährstoff und erdgeschichtlich einen Minimumfaktor für die Pflanzenentwicklung darstellt, haben sich heute durch anthropogene Stickstoffeinträge viele Waldflächen zu mit diesem Element überversorgten Standorten entwickelt (ABER et al. 1989, EICHHORN 1995). Eine einseitig hohe Stickstoffversorgung kann zu einem Nährstoffungleichgewicht

und zu einer Eutrophierung des Bodens führen. Mit eintretender Stickstoffsättigung des Bodens können Pflanzen und Mikroorganismen die eingetragenen Stickstoffverbindungen nicht mehr vollständig aufnehmen. Sie werden mit dem Sickerwasser ausgewaschen, führen zu einer erhöhten Nitratbelastung des Grund- und Oberflächenwassers und gefährden damit die bisher weitgehend unbelastete Trinkwassernachlieferung aus dem Wald. Stickoxide als Verbrennungsprodukte fossiler Energieträger tragen als Säurebildner durch Pufferreaktionen zur Bodenversauerung bei und können ebenfalls zu einer Auswaschung von basischen Nährelementen führen. Insbesondere der luftbürtige Eintrag von Ammoniak, vor allem aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung stammend, fördert die Bodenversauerung, da bei der Pflanzenaufnahme von Ammonium die gleiche Menge an Protonen in die Bodenlösung geht (FALK u. STETTER 2010, KÖLLING et al. 2010b, PAAR 1994). Überhöhte Stickstoffeinträge können zur erhöhten Freisetzung des klimawirksamen und am Ozonabbau beteiligten Spurengases Distickstoffmonoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ , Lachgas) führen (HAIDER 1996).

Bei den *Schwermetallen* muss zwischen essenziellen Schwermetallen wie Mangan (Mn), Kupfer (Cu) oder Zink (Zn), die erst in hohen Konzentrationen giftig wirken, und Schwermetallen wie Blei (Pb) oder Cadmium (Cd), die schon in sehr geringen Konzentrationen toxisch wirken können, unterschieden werden. Die Bodenkonzentrationen der jeweiligen Elemente sind vom geologischen Ausgangssubstrat, der Bodenbildung und von anthropogenen Einträgen, zumeist aus der Luft, abhängig. Für die Schadwirkung der jeweiligen Elemente, vor allem für die Einschätzung der Grundwassergefährdung, ist darüber hinaus das Lösungsverhalten von Bedeutung, welches durch die elementspezifische Bindungsstärke des Bodens bestimmt wird. Waldböden sind in der Lage, aufgenommene Schadstoffe zu filtern, zu speichern, umzuwandeln und abzubauen (SCHACHTSCHABEL et al. 1998). Da die Waldböden vergleichsweise naturbelassen und unbelastet sind, erfüllen sie eine wichtige Weiserfunktion für die Luftschadstoffbelastung (FIEDLER u. RÖSLER 1988). Durch eine zunehmende Versauerung könnten aber auch Schwermetalle in Lösung gehen und das Grundwasser belasten.

Eine weitere Gruppe von Schadstoffen, die über die Luftdeposition in die Böden gelangt, sind *persistente organische Stoffe*, sogenannte POP (Persistent Organic Pollutants). Zu dieser Gruppe gehören eine Reihe von zumeist in der Landwirtschaft ausgebrachten Bioziden, aber auch Nebenprodukte der chemischen Industrie und Produkte aus Verbrennungsprozessen. Sie besitzen eine nachgewiesene schädliche Wirkung auf den menschlichen Organismus und unterliegen deshalb weitgehenden Beschränkungen und Verboten (RIEK u. WOLFF 2007). Herbizide, Insektizide und Fungizide sind von Natur aus nicht in Böden enthalten. Ihrem Anwendungszweck entsprechend haben sie einen großen Einfluss auf den Organismenbesatz und damit auf die Eigenschaften und Nutzbarkeit der Böden. Die organischen Biozide können wie alle Stoffe in Böden gelöst, bewegt, gefällt, adsorbiert, desorbiert und chemisch und biologisch verändert oder abgebaut werden. Die jeweiligen Bodeneigenschaften

haben großen Einfluss auf die ablaufenden Reaktionen. Auch die Transformationsprodukte wirken teilweise noch immer biozid (SCHACHTSCHABEL et al. 1998).

Nicht an den Standort angepasste Erntetechniken oder unsachgemäß eingesetzte Maschinen können das Hohlraumsystem des Waldbodens durch Zusammenpressen der porenreichen Bodenkrume langfristig schädigen. Die so verdichteten Böden verändern ihre ökologische Funktionalität, wobei besonders die Bodenluft- und Wasserleitfähigkeit stark beeinträchtigt wird. Eine Verschiebung des Artenspektrums der Mikroorganismen in sauerstoffarme oder sogar anaerobe Bodenverhältnisse und eine verringerte Stressresistenz der Waldbestände gegen Trockenheit, Durchnässung und Sturm kann die Folge sein. Bereits entstandene Beeinträchtigungen lassen sich nur mit hohem Aufwand beheben; die natürliche Regeneration kann Jahrzehnte dauern (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003).

*Klimaveränderungen* wirken sich wahrscheinlich auf den Kohlenstoff-, Stickstoff- und damit den gesamten Nährstoffhaushalt der Wälder aus. Dies betrifft sowohl den unbelebten wie auch den belebten Boden. Die vorhergesagte Klimaerwärmung und die Verminderung der Sommerniederschläge lassen überdies deutliche Änderungen (Verschlechterungen) im Wasserhaushalt der Böden erwarten. Es ist deshalb grundsätzlich von dynamischen ökosystemaren Standortentwicklungen auszugehen (KÖLLING u. FALK 2010).

Regelmäßige, flächenrepräsentative Bodenzustandserhebungen im Wald können zeitliche Veränderungen von indikativen Bodenkenngrößen erfassen und Gefährdungspotenziale aufzeigen. Auf der Basis dieser Untersuchungen und Ergebnisse sind Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung der Bodenfunktionen ableitbar.

## 3.2 Geologische und bodenkundliche Verhältnisse in sachsen-anhaltischen Wäldern

*Wolfgang Schmidt, Jan Evers, Uwe Paar*

### 3.2.1 *Geologie Sachsen-Anhalts*

Sachsen-Anhalt verfügt über eine abwechslungsreiche Geologie. Das Land ist im geologischen Untergrund in Form von Pultschollen aufgebaut, die sich von Süden nach Norden fortsetzen und in der Altmarksenke von mächtigen pleistozänen Sedimenten bedeckt sind.

Sowohl der Harz als auch der Kyffhäuser an der Grenze nach Thüringen sind im Wesentlichen aus Gesteinen des Erdaltertums aufgebaut. Diese Gebirgszüge werden kranzförmig eingefasst von Sedimenten des Erdmittelalters, die mit unterschiedlicher Mächtigkeit ausstreichen und zum Teil markant das Gelände prägen. Die Gesteine des Erdmittelalters umschließt ein Lössgürtel aus in der Weichselkaltzeit durch Gletscherwinde angewehten schluffigen Partikeln. Der Löss überdeckt häufig auch die Schichten des Erdmittelalters und liegt auch schleierförmig in die Gebirgsböden eingemischt. Nach Norden, Nordosten und Osten wird der Lössgürtel durch eiszeitliche und nacheiszeitliche Ablagerungen abgelöst, die sich in Sachsen, Brandenburg und Niedersachsen fortsetzen.

Folgende erdgeschichtliche Vorgänge führten zur Bildung der heutigen Landschaften Sachsen-Anhalts:

Mehrere tausend Meter tonige, sandige und kalkige Sedimente wurden im Gebiet im Ordovizium (vor ca. 500 Mio. Jahren), Silur (440), Devon (400) und Unterkarbon (350) abgelagert, in die Diabase eindringen. Diese wurden an der Wende vom Devon/Karbon und im Oberkarbon (vor 345 bis 260 Mio. Jahren) zum Varistischen Gebirge (Südfrankreich über Schwarzwald, Spessart, Harz bis Ostpolen und Ostasien) aufgefaltet. Silikatische Schmelzen drangen ein, die heute in den Granitmassiven des Brockens und des Ramberges zu Tage treten.

Bei der Auffaltung entstandene Höhen wurden im Laufe der geologischen Entwicklung erodiert. Im Rotliegenden lagerten sich im Meisdorfer und Ilfelder Becken Sedimente ab. Ein Vulkanausbruch bildete den Quarzporphyr des Auerberges. Nach wiederum fast völliger Einebnung durch Erosion sank das Gebiet unter den Meeresspiegel. In der Folge kam es zu Ablagerungen von Schichten des Zechsteins (250) und der Trias (250-200).

Der Harz wurde im Jura (195) und in der Kreidezeit (135) um einige 100 m angehoben. In der Kreidezeit kam es zur Saxonischen Bruchschollentektonik, bei der durch hohen Druck aus Südwest und Nordost der Gebirgsstock in Pultschollen zerbrach, die vom Thüringer Wald kommend mit allmählich ansteigenden Südrändern

und steilen Nordrändern über Kyffhäuser, Harz, Flechtinger Höhenzug und Altmarkscholle aneinander anschließen. Dabei wurden die Nordränder stark aufgerichtet und teils über die vorgelagerten Schollen geschoben.

Zu Beginn des Tertiärs (65) erfolgte erneut eine völlige Abtragung und Einebnung und damit eine Freilegung des Grundgebirges von Kyffhäuser, Harz und Flechtinger Höhenzug. Als silikatische Härtlinge ragten der Brocken, der Ramberg und der Auerberg aus dem Harz heraus. Erneut wurde der Harz im Tertiär um mehrere hundert Meter zum heutigen Mittelgebirge angehoben.

Den Harz umschließen die Sedimente des Perm, der Trias und der Kreidezeit, die in weiten Gebieten von einer unterschiedlich mächtigen Lössschicht bedeckt sind. Auch der Harz ist zum Teil von einem Lössschleier überzogen. An den südlichen allmählich ansteigenden Gebirgsrändern streichen diese Sedimente breiter aus, wogegen sie an den Nordrändern schmale diskordant gestellte Bänder von geringer Breite bilden, die die Landschaft häufig durch ihre exponierte Erscheinung prägen (z.B. Teufelsmauer bei Thale). Auf den im tieferen Untergrund liegenden, als plastisches Gleitlager wirkenden Salzen des Zechsteins wurden durch den hohen Gebirgsdruck von Südwest und Nordost Sättel und Mulden aus Triassedimenten geformt, die als Kreidesandstein-, Keuper-, Muschelkalk- und Buntsandsteinrücken an die Oberfläche treten. Markante Höhenzüge nördlich des Harzes sind Hoppelberg, Regenstein und Heidelberg (Kreidesandstein), Fallstein, Huy und Hakel (Muschelkalk). Zwischen Oschersleben und Helmstedt in Niedersachsen tritt der Jura im Hohen Holz an die Oberfläche.

Als Widerlager des Harzes bei der Faltung der Gesteine der subhercynen Mulde zu Sätteln wirkte der Flechtinger Höhenzug (Porphyry und Porphyrit). Dieser bildet gleichzeitig die Grenze zu den Sedimenten der Saalekaltzeit. Die Grenze zwischen Hügelland und Tiefland verläuft in etwa entlang des Mittellandkanals bis Magdeburg und von dort über Schönebeck und Halle bis nach Zeitz. Im Südosten Sachsen-Anhalts reicht die Leipziger Tieflandbucht mit ihren im Tagebau gewonnenen Braunkohlevorkommen des Paläozäns bis Oligozäns (vor 61–23 Mio. Jahren) und des Miozäns (23 – 5) ins Land herein.

Im Süden des Landes erhebt sich der Buntsandsteinrücken des Ziegelrodaer Plateaus und um Naumburg und Freyburg tritt der Muschelkalk in größerer Ausprägung zu Tage. Diese Triasgesteine sind mehr oder weniger von Löss bedeckt, der sich in einem breiten Band dem Harz anschmiegt und bis zur Tieflandgrenze reicht. Die als Börde bekannte Lösslandschaft mit ihren Schwarzerdeböden wird zu großen Teilen landwirtschaftlich genutzt und ist daher waldarm.

Das pleistozäne Tiefland wird beherrscht von der Altmarksenke mit Sedimenten der Saale-Kaltzeit (Plankener Stadium). Einen breiten Raum nehmen die Endmoränenzüge des Altmarkrückens und des Flämings ein, die in einem breiten Band von der Elbe und den anschließenden die Elbe begleitenden Niederungen und Terrassen durchschnitten werden. Zwischen den Niederungen der Elbe und der Mulde

erhebt sich die Dübener Heide als ältere Moränenbildung, die in Teilen als Stauendmoräne ausgebildet ist. Hier findet man auch Sedimente der Elsterkaltzeit.

Im Nordosten zwischen Genthin und Havelberg reicht die weichselkaltzeitliche Brandenburger Staffel in das Land herein.

Auf die 3 Großlandschaften Mittelgebirge, Hügelland und Tiefland verteilt sich die Waldfläche von ca. 492.000 ha wie folgt:

|                |   |
|----------------|---|
| Mittelgebirge: | 19 % der Waldfläche ( 7 % der Landesfläche) |
| Hügelland:     | 11 % der Waldfläche (40 % der Landesfläche) |
| Tiefland:      | 70 % der Waldfläche (53 % der Landesfläche) |

Diese Verteilung spiegelt sich auch in den geologischen Ausgangsgesteinen wider. Die Auswertung der geologischen Karte unter Wald ergab folgende Anteile der geologischen Formationen:

*Tabelle 1: Prozentuale Verteilung der geologischen Formationen unter Wald in Sachsen-Anhalt nach der geologischen Karte*

| <b>geologischen Formation</b> | <b>Anteil in %</b> |
|-------------------------------|--------------------|
| holozäne Bodenbildung         | 32                 |
| pleistozäne Sedimente         | 44                 |
| Tertiär                       | 2                  |
| Kreide                        | 1                  |
| Jura                          | <1                 |
| Trias                         | 3                  |
| Perm                          | 2                  |
| Karbon                        | 9                  |
| Devon                         | 6                  |
| Ordovizium                    | <1                 |

### 3.2.3 Bodenbildung der geologischen Formationen

#### 3.2.3.1 Holozäne Bodenbildung

*Künstliche Aufschüttungen* (<1 %) treten als Halden des Braunkohle-Tagebaus in Erscheinung. Hier wurden die häufig tauben tertiären bis paläogenen Sedimente des Abraumes mit holozänen Erden überdeckt. Die Böden sind in der Regel undifferenziert. Die Halden wurden meist mit Pionier-Baumarten aufgeforstet (Pappeln, Aspe, Robinie, Kiefer, Birke), in neuerer Zeit aber auch mit Eiche und Ahornarten.

*Moorerden und Torfe* (4 %) sind typisch für die Niederungen der kleineren Flüsse im Tiefland (Havel, Tanger, Milde, Biese) sowie für weite Niederungsbereiche der Elbe und ehemalige Urstromtalgebiete (Fiener südlich Genthin, Wische bei Seehausen, Salzwedeler Niederung). Hier haben sich als Böden stark durch Grundwasser beeinflusste Moore, Gley Moore, Moorgleye, Anmoorgleye und Humusgleye ausgebildet. Moorbirken-, Erlen- und Erlen-Eschenwälder sowie Stieleichen-Hainbuchenwälder kommen häufig als natürliche Waldgesellschaften auf diesen Standorten vor.

*Flussablagerungen, Auen* (7 %) findet man vor allem entlang der Elbe, aber auch an Saale, Mulde, Bode und Elster. Im flussnahen Bereich befinden sich die Bodenbildungsprozesse im ständigen Wandel. Mit humosen Material angereicherte Klockböden (Vegen) sowie Gleye und Amphigleye, die je nach Sedimentationsgeschwindigkeit aus höheren Ton-, Lehm- oder Sandanteilen zusammengesetzt sind, bilden die wesentlichen Bodenformen. Hier wachsen die aus dem Biosphärenreservat Elbtal- aue bekannten Auenwälder mit Eiche, Ulme, Hainbuche und bei höherem Kalkgehalt der Böden (entlang der Saale) auch verstärkt mit Esche. Artenreiche Auenwälder kommen vor allem an der mittleren Elbe zwischen Wittenberge und Magdeburg, an der unteren Mulde, der unteren Saale zwischen Bernburg und Schönebeck und an der weißen Elster zwischen Leipzig und Halle vor.

*Dünen, Flugsand* (6 %) findet man inselartig in der Niederung der Elbe. Sie treten meist als Erhöhungen in Erscheinung, können aber auch in Moränengebiete eingebettet liegen. Die Bodenbildungsprozesse sind häufig noch jung, deshalb bilden sich meist Ranker oder Saumpodsole aus. Ältere Dünen haben wegen längerer Offenlage auch gekappte Böden, die als Rumpfrosterden (gekappte Podsole oder Braunerden) bezeichnet werden. Auf den Dünen mit ihren reinen Sanden und geringer Trophie sowie einem angespannten Wasserhaushalt gedeihen i.d.R. arme, leistungsschwache Kiefernwälder.

Die *Niederterrassen und Talsande* (14 %) (z.T. Mittelterrassen) setzen sich aus humusreichen, verlehnten bis hin zu rein silikatischen Gleyen, Amphigleyen und Halb- gleyen mit Einstreuungen terrestrischer Bodenformen kräftiger bis ziemlich armer Nährkraft zusammen. Typisch für diese Bereiche sind Eichen-Eschen-Wälder und Eichen-Hainbuchenwälder, sowie ärmere Eichen-Wälder, die heute entlang der Elbe, der Havel und des Tanger zu finden sind.

### 3.2.3.2 Pleistozäne Sedimente

Löss, Lösslehm, *Flotssand* (< 1%). Aufgrund ihrer hervorragenden Eignung für die Landwirtschaft, vor allem durch die Ausbildung von sehr fruchtbaren Schwarzerden im mitteldeutschen Trockengebiet, sind die Lössböden nur sehr gering bewaldet. Schwarzerden, Parabraunerden und Fahlerden bis hin zu Pseudogleyen sind die charakteristischen Bodentypen. Die gute bis sehr gute Nährkraft lässt artenreiche Waldlabkraut-Eichen-Hainbuchenwälder gedeihen, bei stärkerer Ausprägung subkontinentalen Klimas auch Eschen-Ulmen-Wälder mit spezieller thermophiler Bodenvegetation. Auf mächtigeren Lössen (bis 4 m) kommen aber auch im trockenen Klima Buchenwälder vor. Hier wird die fehlende Klimafeuchte durch die hohe Wasserspeicherkapazität der Böden kompensiert, jedoch besteht eine erhebliche Gefährdung durch Spätfröste.

Eiszeitliche Böden der Brandenburger Staffel der *Weichselkaltzeit* (*Sander, Grund- und Endmoränen*) reichen mit einem geringen Flächenanteil *von knapp über 1 %* im Nordosten des Landes zwischen Genthin und Havelberg aus Brandenburg herein. Auf den Bodentypen Braunerde und Braunerde-Podsol mittlerer bis ziemlich armer Nährkraft kommen Eichen- und Eichen-Kiefernwälder vor.

Die Saalekaltzeit hat das Tiefland Sachsen-Anhalts am stärksten geprägt. Deshalb stockt der größte Anteil der Wälder des Landes auf eiszeitlichen Böden der *Saalekaltzeit* (*Sander, Grundmoränen, Endmoränen, glazilimnische Bildungen – 44 %*).

Die gesamte Altmark sowie der Fläming und die Dübener Heide sind das Ergebnis der die Landschaft formenden Prozesse der Saalekaltzeit. Entsprechend vielfältig sind auch die Bodentypen, die je nach Anteilen von Ton, Schluff und Sand unterschiedliche Trophieausprägungen aufweisen. Am häufigsten kommen Braunerden mittlerer Nährkraft vor, gefolgt von ziemlich armen Braunerden und Braunerde-Podsolen bis hin zu armen Podsolen und Rankern. Je nach klimatischen Einfluss in der Region wachsen auf diesen Böden Buchenwälder, Eichen-Buchenwälder, Eichen-Hainbuchenwälder, Eichen-Kiefernwälder oder Kiefernwälder. Braunerden und Fahlerden kräftiger Trophie treten auf den Endmoränenzügen bei Klötze, auf der Diesdorfer Hochfläche, im Fläming und in der Dübener Heide auf. Im nordwestlichen Sachsen-Anhalt sind diese Standorte kräftiger Nährkraft bei entsprechend atlantischem Klimaeinfluss durch das Vorkommen von Waldmeister- bis Hainsimsen-Buchenwäldern charakterisiert. Im Fläming und in der Dübener Heide nimmt die Konkurrenzkraft der Eiche zu, sodass Mischwälder aus Eiche und Buche sowie Eichen-Kiefernwälder typisch für diese Moränengebiete sind.

Staugleye und Braunerde-Staugleye begleiten vor allem die Endmoränen. Dort wo toniges Material abgelagert wurde und Bändersande oder lehmunterlagerte Böden vorkommen, wachsen Stieleichen-Hainbuchenwälder als natürliche Waldgesellschaft.



### 3.2.3.3 Tertiär

*Tertiäre Böden aus Tonen, Schluffen und Sanden (2 %)* befinden sich häufig in der Nachbarschaft von Braunkohlen-Tagebauen. Mittlere Braunerden aber auch Staugleye sind die typischen Bodenformen mit Eichen-Hainbuchenwäldern als natürliche Waldgesellschaft.

### 3.2.3.4 Kreide und Jura

Vor allem der *Kreidesandstein (< 1 %)* tritt am Nordharzrand in verschiedenen Ausprägungen zutage. Dort bildet er Schichtrippen (Teufelsmauer, Gegensteine), Steilabstürze (Regenstein) und markante Höhenzüge (Alteburg, Heidelberg). Die gelblichen Sandsteine enthalten wenig Nährstoffe und verwittern zu schwachen Braunerden, Braunerde-Podsolen, Podsolen und Rankern. Ein weit nach Südwesten vorgeschobenes Vorkommen von Kiefernwäldern ist hier als natürliche Waldgesellschaft zu finden. Auf Standorten mittlerer Trophie, die häufig Beimischungen von Löss enthalten, kommt zur Kiefer in Beimischung Traubeneiche hinzu, die auch in Reinbestände auf flachgründigen Böden vorkommen kann.

Böden auf *Jura* im Bereich des Hohen Holzes bei Oschersleben sind mit *unter 0,5 %* sehr gering bewaldet.

### 3.2.3.5 Trias

Wie bei den Böden auf *Jura* sind auch die Böden auf *Keuper* meist landwirtschaftlich genutzt und nur zu *rund 0,5 %* bewaldet.

Bodenbildungen auf *Oberen, Mittleren und Unteren Muschelkalk* sind mit insgesamt *rund 1 %* unter Wald vertreten. Fallstein Huy und Hakel, Sättel im nördlichen Harzvorland sowie Steilstufen am Harzrand stellen das wesentliche Verbreitungsgebiet der Böden auf Muschelkalk dar. Im südlichen Sachsen-Anhalt um Naumburg und Freyburg stocken weitere Wälder auf Muschelkalk. Rendzina, Rendzina-Braunerde und Lössbedeckte Fahlerden sind die charakteristischen Bodentypen mit einer sehr guten Nährkraftausstattung. Artenreiche Bingelkraut-Buchenwälder, Schwalbenwurz-Buchenwälder bis Orchideen-Buchenwälder und Steinsame-Buchenwälder mit z. T. hohen Anteilen von Hainbuche, Linde, Ulme, Esche und Ahorn kennzeichnen als natürliche Waldgesellschaften diese nährstoffreichen Standorte.

Böden, die sich auf *Buntsandstein* entwickelt haben, decken lediglich *1 %* der Waldstandorte des Landes ab. Das Ziegelrodaer Plateau und Bereiche der Schrecke an der Grenze nach Thüringen stellen das Hauptverbreitungsgebiet dar. Vor allem Braunerden, Braunerde-Pseudogleye und Pseudogleye haben sich hier entwickelt, auf denen Goldnessel-Eichen-Buchenwälder, Hainrispengras-Eichen-Buchenwälder, Hainsimsen-Eichen-Buchenwälder, Drahtschmielen-Eichen-Buchenwälder und auf Pseudogleyen Eichen-Hainbuchenwälder als natürliche Waldgesellschaften vorkommen. Auch am Rande der Südharzer Zechsteinmulde findet man ein schmales

Band Braunerden auf Buntsandstein-Untergrund sowie am Rand zum Thüringer Becken bei Nebra.

### 3.2.3.6 Perm

Speziell im Mansfelder Land am südlichen und südöstlichen Harzrand streicht der *Zechstein* relativ flach in der so genannten Zechsteinmulde in einem breiteren Band aus. Zu dem seit Jahrhunderten abgebauten geringmächtigen Kupferschiefer kam im letzten Jahrhundert intensiver tiefer Bergbau zur Förderung von Kalisalzen hinzu. Am Rande der Zechsteinmulde, die mit holozänen Sedimenten ausgefüllt ist, stehen Gips und Stinkkalk an, auf denen sich Rendzinen, Braunerden und Gipsascheböden entwickelt haben mit ihrer sehr abwechslungsreichen Topografie aus Dolinen und Erdfällen. Sie tragen eine vielgestaltige Flora mit Mischwäldern aus Eiche, Hainbuche, Buche, Linde, Ahornarten und Bergulme, die eher den Hangschuttwäldern zuzuordnen sind. Weniger als 1 % der *Zechsteinstandorte* sind bewaldet.

In der Meisdorfer Mulde am Nordostrand des Harzes und in der Südharzmulde bei Illfeld sind Sedimente des *Rotliegenden* abgelagert. Auf diesem Untergrund haben sich vor allem lehmige bis tonige Braunerden mit Beimischung von Löss entwickelt, die eine kräftige Trophie besitzen. Natürliche Waldgesellschaften sind der Goldnesel- und der Perlgras-Buchenwald, sowie der Labkraut-Eichen/Buchen-Hainbuchenwald. Im Rotliegenden entstand durch vulkanische Aktivität auch der aus Quarzporphyr bestehende Auerberg. Auf diesem Gestein sind mittlere bis ziemlich arme Braunerden und Pseudogleye ausgebildet mit aufstockendem Waldreitgras- bis Drahtschmielen-Buchenwald. An den Südhängen findet man eine stärkere Beimischung von Eiche und Hainbuche. Insgesamt sind Wälder auf 1,5 % der *Rotliegenden-Standorte* zu finden.

### 3.2.3.7 Karbon

Der Harz und auch der Kyffhäuser sind in weiten Bereichen aus Gesteinen des Karbons aufgebaut. Hierbei handelt es sich um intrusive Gesteine (Granit, Diorit, Gabbro, Melaphyr), Grauwacken, untermeerische Rutschmassen (Olisthostrome), Kieselschiefer und Quarzite.

Die *Granit-Härtlinge* des Brockens (inklusive Diorit, Gabbro, Melaphyr und Ganggesteinen) und des Rambergs überragen das Harzplateau. Ihre Braunerden, Braunerde-Podsole, Podsole und Staugleyböden kommen unter 2,5 % der Waldfläche vor. Sie haben i.d.R. mittlere bis ziemlich arme Nährkraft und tragen Bergreitgras- (Fichten)-Buchenwälder bis Wollreitgras-Fichtenwälder. Um Brocken und Ramberg haben sich im Grenzbereich zwischen Granit und umliegenden Gesteinen Gürtel mit Stau- und Humusstaugleyböden ausgebildet, auf denen Erlenwälder und Fichtenwälder geringer Leistung in den höheren Lagen wachsen. Um den Brocken kommen auch nahezu waldfreie Moore vor.

*Quarzite*, auf denen sich Podsolböden mit geringer Nährkraft entwickelt haben, besitzen nur lokale Verbreitung im Raum Ilsenburg/Wernigerode mit einem Waldanteil von  $< 0,5\%$ . Die geringe Nährkraft dieser Böden führt zu schwachwüchsigen Fichten-Birkenwäldern. Auch ein inselartiges Vorkommen von Kiefer befindet sich in diesem Gebiet.

Weite Teile des Harzplateaus bestehen aus *Rutschmassen und Molasse (4 %)*, die im Karbon unter dem Meer vom Brockengranit in die weiter östlich gelegenen Faltenmulden abrutschten. Sie liegen als östliches Unterharz-Plateau mit einer durchschnittlichen Höhe zwischen 400 und 500 Metern zwischen Brocken-Komplex, Harzhöhe, Auerberg und Ramberg eingebettet und dehnen sich weiter nach Osten bis zur Wippraer Zone aus. Die anstehenden *tonigen Schiefer* sind oberflächlich mit einem Lössschleier durchmischt. Auf diesen Standorten haben sich im Wesentlichen Braunerden, Podsol-Braunerden und Staugleye kräftiger bis ziemlich armer Trophie ausgebildet, deren natürliche Waldgesellschaften Goldnessel-, Waldreitgras- und Drahtschmielen-Buchenwälder bilden, die nach Osten höhere Eichenanteile enthalten.

*Karbonische Grauwacke* (Tanner Grauwacke) kommt unter  $< 2\%$  der Waldfläche des Landes vor. Es handelt sich um ein Band, das sich von Herzberg im Westharz kommend über Tanne, Hasselfelde und Güntersberge bis nach Gernrode hinzieht. Braunerden und Staugleye sind die wesentlichen Bodenbildungen. Ähnlich den Rutschmassen tragen auch diese Böden einen Lössschleier und sind mit kräftiger bis ziemlich armer Nährkraft ausgestattet. Goldnessel-, Hainrispengras-, Bergreitgras- und Drahtschmielen-Buchenwälder mit Eichenanteilen, die nach Osten zunehmen, stellen die natürliche Waldgesellschaft dar.

*Karbonische Kieselschiefer* begleiten in einem schmalen Band vor allem das Selketal. Sie haben einen geringen Flächenanteil. Auf ihnen entstanden Braunerden und Braunerde-Podsole mit ziemlich armer Nährkraft und natürlichen Drahtschmielen- bis Heidelbeer-Buchenwäldern.

### 3.2.3.8 Devon und Silur

*Diabase* treten im Harz eingebettet in devonische Schieferablagerungen meist in geringerer Flächenausdehnung (*insgesamt  $< 1\%$* ) auf. Auf diesen Standorten haben sich reiche Ranker und Braunerden ausgebildet. Typische natürliche Waldgesellschaften sind Bingelkraut-Buchenwälder, die häufig in den mittleren Berglagen von der Zwiebel-Zahnwurz als charakteristische Weiserart begleitet werden.

Mit knapp  $5\%$  Flächenanteil an den bewaldeten geologischen Formationen des Landes finden *devonische Schiefer* im Harz weite Verbreitung, vor allem um die Täler der Bode und Selke sowie um die Südharzmulde. Auf den tonigen Schiefen haben sich Braunerden, Braunerde-Staugleye, Staugleye und Humusstaugleye ausgebildet, wobei Braunerden kräftiger bis mittlerer Nährkraft dominieren. Auf diesen Böden würden von Natur aus Goldnessel-, Hainrispengras-, Waldreitgras- und Hainsimsen-

Buchenwälder zum Nordharzrand und nach Osten hin auch mit höheren Eichenanteilen wachsen. In mittleren Berglagen ist wiederum die Zwiebel-Zahnwurz charakteristischer Begleiter speziell auch in Hangschuttwäldern. Auf Diabas beeinflussten Standorten tritt auch die Waldhaargerste als Weiserpflanze auf. Staugleye werden von Hexenkraut-, Rasenschmielen- und Schachtelhalm-Roterlen-Eschen-, Buchen-Eschen- bis Roterlenwäldern charakterisiert.

*Devonische Gramwacken* wurden in der Selke- und der Südharzmulde abgelagert. Ihr Flächenanteil beträgt knapp 1 %. Auf ihnen sind Braunerde-Ranker und Braunerden ausgebildet. Im wärmegetönten Klima des Harzrandbereiches kommen auf diesen Böden bei kräftiger Nährkraft Waldreitgras-Goldnessel- bis Hainrispengras-Traubeneichen-Hainbuchen-Buchenwälder vor.

Kleine Vorkommen *silurischer Ablagerungen* im Raum Wippra und Paragneise am Fuße des Kyffhäusers nehmen nur sehr geringe Flächenanteile ein.

### 3.2.4 Prozesse der Bodenbildung

Die Bodenbildung fand in Sachsen-Anhalt vornehmlich im Pleistozän und Holozän statt, das heißt zwischen- und nacheiszeitlich bis in die heutige Zeit.

Im Harz und Kyffhäuser sowie in anderen Gebieten mit durchragenden Grundgesteinen kam es während der eisfreien Tundrenzeiten innerhalb und nach der Weichselkaltzeit zur Entstehung periglazialer Lagen. Diese zeichnen sich durch Lockergesteinsdecken aus, die durch Frostdestruktion (kryogen), über Luftfracht eingetragenes Material (Löss, Feinsand) oder auf Dauerfrostboden stattfindenden Kriechprozessen der Materialverlagerung (Solifluktion) entstanden sind. Dabei kam es durch Wechsel von Warm- und Kaltphasen zur Überlagerung verschiedener solcher Deckschichten, bei denen die hangabwärts gerichtete Solifluktion im wassergesättigtem Milieu für die Lagenbildung die entscheidende Rolle spielte. Selbst bei geringen Hangneigungen fanden diese Prozesse während der Auftauphasen statt.

Die periglazialen Lagen wurden nach ihrer Entstehungsgeschichte, ihrer Beimengung von kryogen aufbereitetem Gestein (Gesteinsschutt), äolisch eingewehten Lössbeimengungen, Sanden und typisch vorkommenden Gesteinssohlen an den Grenzen der Lagen systematisiert.

Für das Gebiet der ehemaligen DDR und somit auch für das heutige Sachsen-Anhalt wurden diese periglazialen Lagen für das Mittelgebirge und Hügelland „Umlagerungszone“ (SCHWANECKE 1970) zugeordnet. Für das Tiefland beschriebene „Perstruktionszonen“ (KOPP 1965, 1970) bezeichnen periglaziale Lagen, die durch wiederholte Auftauprozesse im Pleistozän entstanden sind. Sie werden charakterisiert durch Gefügedestruktion mit Filtergerüstumbau und an der Basis der Lagen angelagerten Steinsohlen aus Moränenmaterial, das während der Auftauphasen durch das Decksediment hindurch bis auf die Grenze des Dauerfrostbodens sank. Dabei entstanden im Tiefland Sachsen-Anhalts die meisten oberflächenbildenden Ablagerungen und Reliefformen in bestimmten Phasen der Saale-Kaltzeit. Nur im

Osten und Nordosten des Landes ragen Bildungen des Brandenburger Stadiums der Weichsel-Kaltzeit ins Land herein.

Die periglazialen Lagen bilden die prägende Grundlage der Bodenbildung der heutigen Naturräume. Die *Basislage* (nach ostdeutschem Verfahren in etwa der Eta-Zone entsprechend) besteht aus Gesteinsschutt oder im Tiefland feingeschichteten Sedimenten, die keinen äolischen Eintrag enthalten. Diese Lage ist meist oberflächenparallel mit einer Mächtigkeit zwischen 20 und 100 cm ausgebildet.

Die eigentlichen Bodenbildungsprozesse finden jedoch in den darüber liegenden Lagen statt:

Die *Mittellage* (etwa Zeta- und Epsilon-Zone) ist nur in bestimmten Reliefteilen erhalten. In ihr sind Löss-Einwehungen zu erkennen, an ihrer Basis findet man Steinanreicherungen und sie besitzt Merkmale von Verdichtung und Solifluktion.

Die *Hauptlage* (Delta-Zone) ist außerhalb holozän geprägter Gebiete fast überall oberflächlich oder zumindest oberflächennah zu finden, enthält durchweg äolisches Material und kann ebenfalls durch eine basale Steinsohle gekennzeichnet sein. Sie dokumentiert die jüngsten kryogenen Vorgänge (jüngere Tundrenzeit) und ist oberflächenparallel eingeregelt. Ihre Mächtigkeit beträgt zwischen 40 und 60 cm. Darüber kann eine Oberlage aus feinerdearmen Gesteinsschutt auf verwitterungsresistenten Gesteinen vorkommen. Nach der ostdeutschen Systematik kann über der Delta-Zone noch eine extraperiglaziale biogene Entschichtungszone auftreten (Beta-Zone) bzw. eine anthropogene Durchmischungszone (Alpha-Zone).

Die Hauptlage mit ihrer Mächtigkeit und ihren Eigenschaften bestimmt insbesondere die Boden- und Standortseigenschaften. Sie stellt den Hauptwurzelraum dar. So hängt die Bodenbildung wesentlich von den Eigenschaften der Lagen oberhalb der Basislage ab. In ihnen finden die Bodenbildungsprozesse wie die Stoffumwandlung durch Verwitterung, die Bildung sekundärer Tonmineralien, die Stoffumwandlung durch Zersetzung organischen Materials und Humusbildung, die Stoffumlagerung durch Perkolation, die Aggregation sowie die Umwandlung und Verlagerung durch Versauerungsvorgänge statt. Bestimmt durch diese Prozesse sowie durch Grund- und Stauwassereinfluss kommt es auf der Basis der Grundeigenschaften der Lagen zur Bildung von Horizonten, die schließlich den Bodentyp bestimmen.

Im Tiefland liegen vor allem sandige bis lehmig-tonige Sedimente in Form von Grund- und Endmoränen sowie Sandern vor. Auf ihnen bildeten sich unter Vegetation Braunerden, Fahlerden, Podsole, Staugleye und Grundgleye aus. In die eiszeitlichen Sedimente eingebettet liegen die Auen und Niederungen wichtiger Fließgewässer, deren Böden hauptsächlich durch holozäne Sedimente bestimmt sind. In die Auen wurden Feinsande eingeweht, die bis heute in Form von Dünen erhalten blieben und meist aus den Auen herausragen. Die Auenböden befinden sich in Flussnähe in ständiger Veränderung und besitzen dadurch häufig einen undifferen-

zierten tiefgründigen Aufbau mit meist hohem Anteil an eingeschwemmten organischen Material. Kennzeichnend für die Auen und Niederungen sind die Bodentypen der Vega (Klockböden), Grundgleye und Amphigleye. Die jeweilige Zusammensetzung der Böden aus Kies, Sand, Lehm oder Ton wird von der Fließgeschwindigkeit der Flüsse bestimmt. Mit wachsender Entfernung vom Fluss treten Gleye, Braungleye, Pseudogleye und mit geringer werdenden Grundwassereinfluss Braunerden stärker in Erscheinung.

Das den Harz und die Bergketten Nordthüringens umfließende Hügelland wird wesentlich durch Lössdecken unterschiedlicher Mächtigkeit bestimmt, die in periglazialen vegetationsfreien Trockenphasen durch kontinuierlich von den Gletschern wehenden Winde abgelagert wurden. Auf ihnen haben sich Schwarzerden, Parabraunerden, Fahlerden und Pseudogleye entwickelt.

Die Lössdecken werden regional von Schichten der Trias, des Jura und der Kreide durchragt. Die periglazialen Lagen sind hier besonders mit äolischem Material angereichert, besitzen aber häufig typische charakteristische Eigenschaften des kryogenen Gesteinszersatzes in der Hauptlage. In Abhängigkeit vom dominierenden Grundgestein kommen vielfältige Bodentypen vor, deren Spektrum für die Waldwachstumsbedingungen außerdem durch ihre Substrateigenschaften noch wesentlich erweitert wird.

Rendzinen auf Muschelkalk, Braunerden unterschiedlicher Trophie, Fahlerden, Pelosole, Parabraunerden und Staugleye kommen mit unterschiedlich großen Flächenanteilen in diesen Naturräumen vor.

Äolische Sedimente wurden periglazial im Harz und Kyffhäuser den vorkommenden Gesteinsschuttdecken des Ordoviziums, Silurs, Devons, Karbons und Perms beigemischt, die als Lössschleier bezeichnet werden und den Feinbodenanteil und damit die Eigenschaften der periglazialen Lagen entscheidend beeinflussen. Dies betrifft das Gefüge sowie die mineralische Zusammensetzung und Filtrationseigenschaften dieser Böden. Prägend für die einzelnen Standorte treten jedoch meist die Eigenschaften der Gesteinsschuttdecken in Erscheinung. Auf den Waldstandorten des Harzes können sich je nach Ausgangsgestein Ranker, Braunerden, Parabraunerden, Podsole, Staugleye, Humusstaugleye oder Moore ausbilden.

### 3.2.5 Zusammenfassung

Die Vielfalt der geologischen Verhältnisse Sachsen-Anhalts spiegelt sich in den mannigfaltigen Bodentypen des Landes wider. Die Voraussetzungen für die Bodenbildung wurden durch eiszeitliche Sedimentation, kryogene Gesteinsdestruktion im Periglazial, Sedimentation äolischen Materials, holozäne Sedimentation und Umlagerung durch Flussfracht sowie durch anthropogene Einflussnahme geschaffen. Die Wälder Sachsen-Anhalts stocken auf einer großen Zahl unterschiedlichster Böden, deren Trophie von sehr armen Standorten der Dünen bis hin zu sehr reichen Standorten der Lössböden und der Kalkgebiete reicht.

Ihre größte Ausdehnung besitzt die Waldfläche Sachsen-Anhalts im Tiefland der Altmark und in der Elbniederung. Die Flächenverteilung orientiert sich an der Trophie der Böden aber auch an den Grund- und Stauwasserverhältnissen sowie an der häufig klein parzellierten Eigentumsstruktur.

Die Lössböden werden ihrer reichen Böden wegen fast ausschließlich landwirtschaftlich genutzt. Dies kommt in einer Bewaldung von lediglich 11 % für das Hügelland zum Ausdruck.

Der Harz war schon früh zum Bannwald erklärtes kaiserliches Jagdregal. Wegen seines in weiten Teilen rauen Klimas wurde und wird er nur in geringem Maße landwirtschaftlich genutzt und ist deshalb im Gegensatz zum umliegenden Hügelland stark bewaldet. Das breite Spektrum an Böden begründet die große Vielfalt natürlicher Waldgesellschaften, die sich von armen gering wüchsigen Fichtenwäldern und Fichten-Birkenwäldern auf Granit oder Quarzit in hohen Berglagen bis hin zu reichen Orchideen-Buchenwäldern und thermophilen Steinsamen-Eichen-Hainbuchenwäldern spannt.

### 3.3 Forstliches Umweltmonitoring an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA)

*Johannes Eichborn, Uwe Paar, Henning Meesenburg, Jan Evers, Birte Scheler, Nils König*

#### 3.3.1 Aufgaben

Die natürliche zeitliche Veränderung der Waldbestände, Managementmaßnahmen und vor allem biotische und abiotische Einflüsse der Umwelt führen zu Veränderungen in Waldökosystemen. Hinzu kommt, dass die Ansprüche der Gesellschaft an den Wald weit gefächert sind und gesellschaftliche Veränderungen widerspiegeln. Während noch vor wenigen Jahrzehnten der Kohlenstoffspeicherung in Waldböden keine besondere Bedeutung zugemessen wurde, erlangen heute der Kohlenstoffvorrat in Waldböden und seine Veränderung ein zunehmendes wissenschaftliches, politisches und wirtschaftliches Interesse. Waldfunktionen als Ausdruck der gesellschaftlichen Erwartungen können nur dann nachhaltig entwickelt und gesichert werden, wenn sie in ihrem Zustand und in ihrer Veränderung zahlenmäßig darstellbar sind.

Das Forstliche Umweltmonitoring leistet dazu einen wesentlichen Beitrag. Es erfasst mittel- bis langfristig Einflüsse der Umwelt auf die Wälder wie auch deren Reaktionen, zeigt Veränderungen von Waldökosystemen auf und bewertet diese auf der Grundlage von Referenzwerten. Die Forstliche Umweltkontrolle leistet Beiträge zur Daseinsvorsorge, arbeitet die Informationen bedarfsgerecht auf, erfüllt Berichtspflichten, gibt für die Forstpraxis Entscheidungshilfen und berät die Politik auf fachlicher Grundlage.

Die rechtliche Grundlage für die Walderhebungen im Forstlichen Umweltmonitoring stellt § 41a des Gesetzes zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz, BWALDG 1975) dar. Dies wird konkretisiert durch die Verordnung über Erhebungen zum Forstlichen Umweltmonitoring (FORUMV 2013) und durch das Durchführungskonzept Forstliches Umweltmonitoring (BMEL 2016).

Die Forstliche Umweltkontrolle geht ursprünglich von den Fragestellungen der Genfer Luftreinhaltkonvention (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE 1979)) aus. In deren Mittelpunkt stehen Belastungen der Gesellschaft und des Waldes durch Umweltveränderungen in Folge der Nutzung fossiler Energieträger, insbesondere im Hinblick auf die damit verursachten Säureeinträge. Die Methodik zur Erfassung der Säurebelastung geht dabei im Wesentlichen auf die Arbeit von Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Bernhard Ulrich (Göttingen) zur Bodenkunde und Waldernährung zurück (ULRICH et al. 1979). In der Folgezeit hat sich das Forstliche Umweltmonitoring als inhaltlich flexibel und breit angelegt erwiesen, um auch Informationen zum Stickstoffhaushalt, zur Kohlenstoffspeicherung und zu möglichen Risiken infolge des Klimawandels zu gewinnen.



Durch die Einbindung des Forstlichen Umweltmonitorings in Deutschland in das Europäische Waldmonitoring unter ICP Forests (Level I seit 1984, Level II seit 1994) und die Orientierung an den dort definierten Standards (ICP FORESTS 2010) ist ein hinsichtlich inhaltlicher Tiefe, räumlicher Repräsentanz, Langfristigkeit, Datenqualität und internationaler Vergleichbarkeit weltweit beispielhaftes Monitoringprogramm entstanden.

### 3.3.2 *Konzept*

Grundsätzlich werden im Forstlichen Umweltmonitoring waldfächenrepräsentative Übersichtserhebungen auf Rasterebene (Level I), die intensive Dauerbeobachtung ausgewählter Waldökosysteme (Level II) sowie Untersuchungen auf Experimentalflächen (Level III) unterschieden.

Das Konzept der NW-FVA umfasst folgende Monitoringprogramme, wobei einzelne Messflächen mehreren Programmen zugeordnet sein können:

- Level I (Übersichtserhebung)
- BDF (Bodendauerbeobachtungsprogramm)
- Level II (ICP Forests Intensive Monitoring Plots)
- Level II Core (Level II mit intensivierten Erhebungen)
- WÖSSH (Waldökosystemstudie Hessen)
- Experimentalflächen (Level III)
- An den *Level I-Punkten* werden folgende Erhebungen durchgeführt:
  - Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren (auf allen Stichprobenpunkten der Waldzustandserhebung (WZE) und der Bodenzustandserhebung (BZE)).
  - Auf den BZE-Punkten werden zusätzlich Baumwachstum, Nadel-/Blatternährung, Bodenvegetation und der morphologische, physikalische und chemische Bodenzustand untersucht. Auf dem BZE-Netz erfolgt zusätzlich eine Erhebung von Daten entsprechend der Bundeswaldinventur.
- Auf *Bodendauerbeobachtungsflächen* (BDF) werden langfristig standorts-, belastungs- und nutzungsspezifische Einflüsse auf Waldböden erfasst. BDF dienen als Referenzstelle und der Vorsorge für rechtzeitige Maßnahmen zum Schutz von Böden in ihrer Substanz und ihren Funktionen. Das BDF-Programm umfasst für forstlich genutzte Flächen folgende Erhebungen (HÖPER u. MEESENBURG 2012):
  - Chemischer und physikalischer Bodenzustand, Nadel-/Blatternährung, Baumwachstum, Bodenvegetation, Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren.

- Auf Intensiv-BDF werden zusätzlich Erhebungen zum Wasser- und Stoffhaushalt von Waldböden durchgeführt:
  - Deposition, Bodenlösung, Streufall, Meteorologie und Bodenhydrologie.
- Das Monitoring auf *Level II-Flächen (Standard)* umfasst nach der Modifizierung im Rahmen der ICP Forests Manualrevision 2010 folgende Erhebungen:
  - Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren, Baumwachstum, Nadel-/Blatternährung, Bodenvegetation, Deposition, Bodenzustand.
- *Level II Core-Flächen* sind eine Unterstichprobe der Level II-Flächen. Sie haben die Zielsetzung einer möglichst umfassenden Beobachtung. Neben den Erhebungen auf den Level II-Standardflächen sind hier folgende Erhebungen verpflichtend durchzuführen (ICP FORESTS 2010):
  - Streufall, Baumphänologie, Baumwachstum (intensiviert), Bodenlösung, Bodenfeuchte, Luftqualität, Meteorologie.
- Auf den Flächen der *Waldökosystemstudie Hessen (WÖSSH)* werden auf repräsentativen Standorten Waldökosystemzustände und -prozesse beobachtet, um Veränderungen von Waldfunktionen durch Umwelteinflüsse zu detektieren. Die Erhebungen auf WÖSSH-Flächen beinhalten folgende Indikatoren:
  - Deposition, Bodenlösung, Nadel-/Blatternährung, Baumwachstum, Kronen- und Baumzustand, abiotische und biotische Faktoren, chemischer und physikalischer Bodenzustand sowie Bodenvegetation.
- Zu den *Experimentalflächen (Level III)* gehören Forsthydrologische Forschungsgebiete, Flächen zur Bodenschutzkalkung und zur Nährstoffergänzung sowie zur wasser- und stoffhaushaltsbezogenen Bewertung von Nutzungsalternativen.

Anhand von Übersichtserhebungen (Level I) können frühzeitig Entwicklungen und Störungen aufgezeigt und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Als erfolgreiches Beispiel ist hier die Bodenschutzkalkung zu nennen, die im Waldboden wesentlich anthropogenen Säureeinträgen entgegenwirkt und zum Nährstoffhaushalt der Wälder positiv beiträgt. Das Intensive Monitoring ermöglicht einen detaillierteren Blick auf die Abläufe im Ökosystem, als es Übersichtserhebungen leisten könnten, und trägt somit wesentlich zum Verständnis der Entwicklungen bei. Im Falle von umweltpolitischen Maßnahmen ermöglicht das Forstliche Monitoring eine wirksame Kontrolle der Erfolge.

Die im Forstlichen Umweltmonitoring verwendeten Instrumente der Ökosystemüberwachung stehen europaweit harmonisiert nach den Grundsätzen des ICP Forests (Methoden: <http://icp-forests.net>; Manual: <http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual>), der BDF-Arbeitsanleitung (BARTH et al. 2000), der BZE-

Arbeitsanleitung (WELLBROCK et al. 2006) sowie des Handbuchs Forstliche Analytik (GAFA 2005, 2014) zur Verfügung. Qualitätssichernde und -prüfende Maßnahmen sind danach verbindlich vorgeschrieben. Sie garantieren die Qualität und die Nutzbarkeit der Ergebnisse.

Das Untersuchungsdesign der Forstlichen Umweltkontrolle in der NW-FVA für die Bereiche Level I, Intensives Monitoring (Level II) und Experimentalflächen (Level III) für die Länder Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt, Bremen und Schleswig-Holstein zeigen die Abbildungen 9 bis 11.

In Sachsen-Anhalt umfasst das Level I-Netz der BZE 78 Inventurpunkte, das Intensive Forstliche Umweltmonitoring 2 Monitoringflächen und 2 Experimentalflächen. Das sachsen-anhaltische Bodendauerbeobachtungsprogramm für Wälder fällt in die Zuständigkeit der NW-FVA, die sachsen-anhaltischen Bodendauerbeobachtungsflächen sind in Abbildung 10 mit dargestellt.

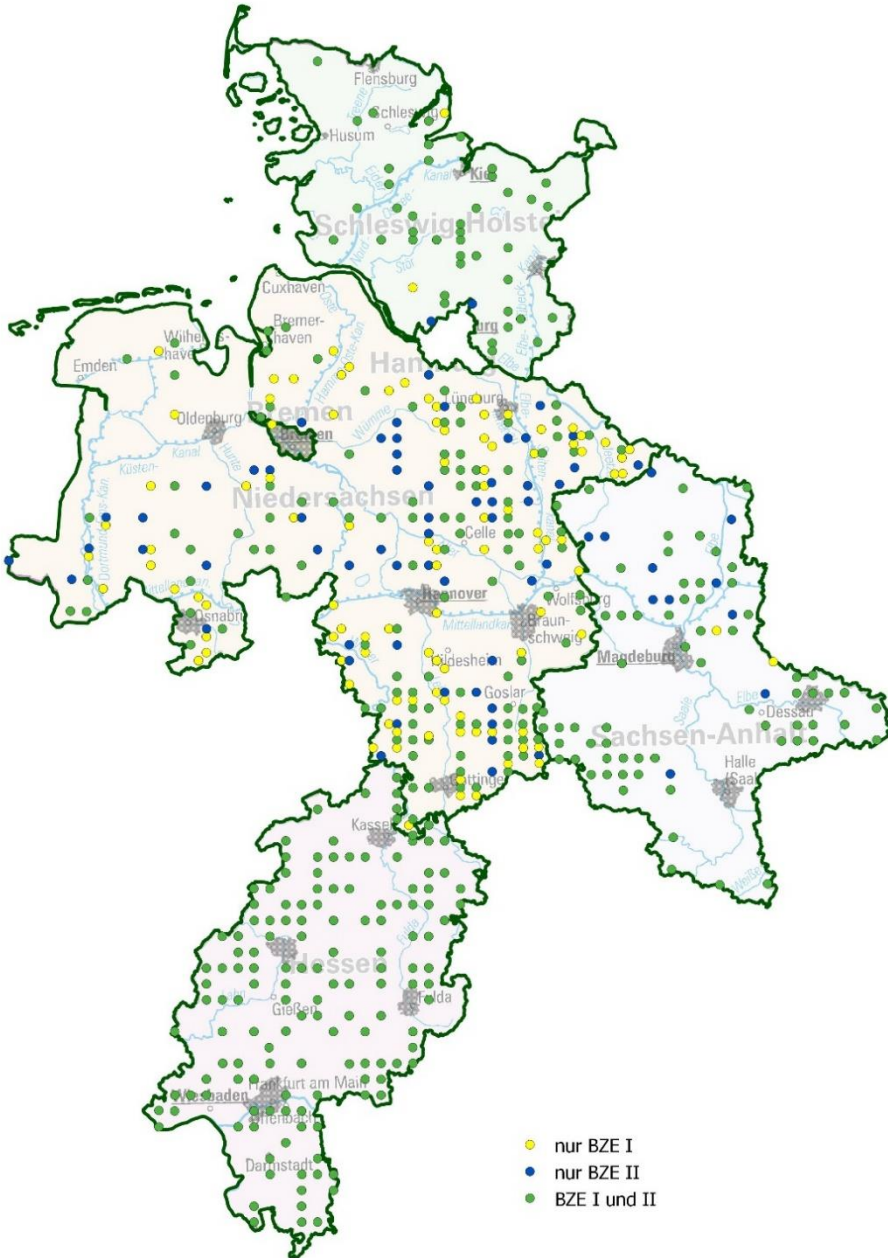


Abbildung 9: Lage der BZE-Punkte (Level I) in Niedersachsen und Bremen, Hessen, Sachsen-Anhalt, und Schleswig-Holstein

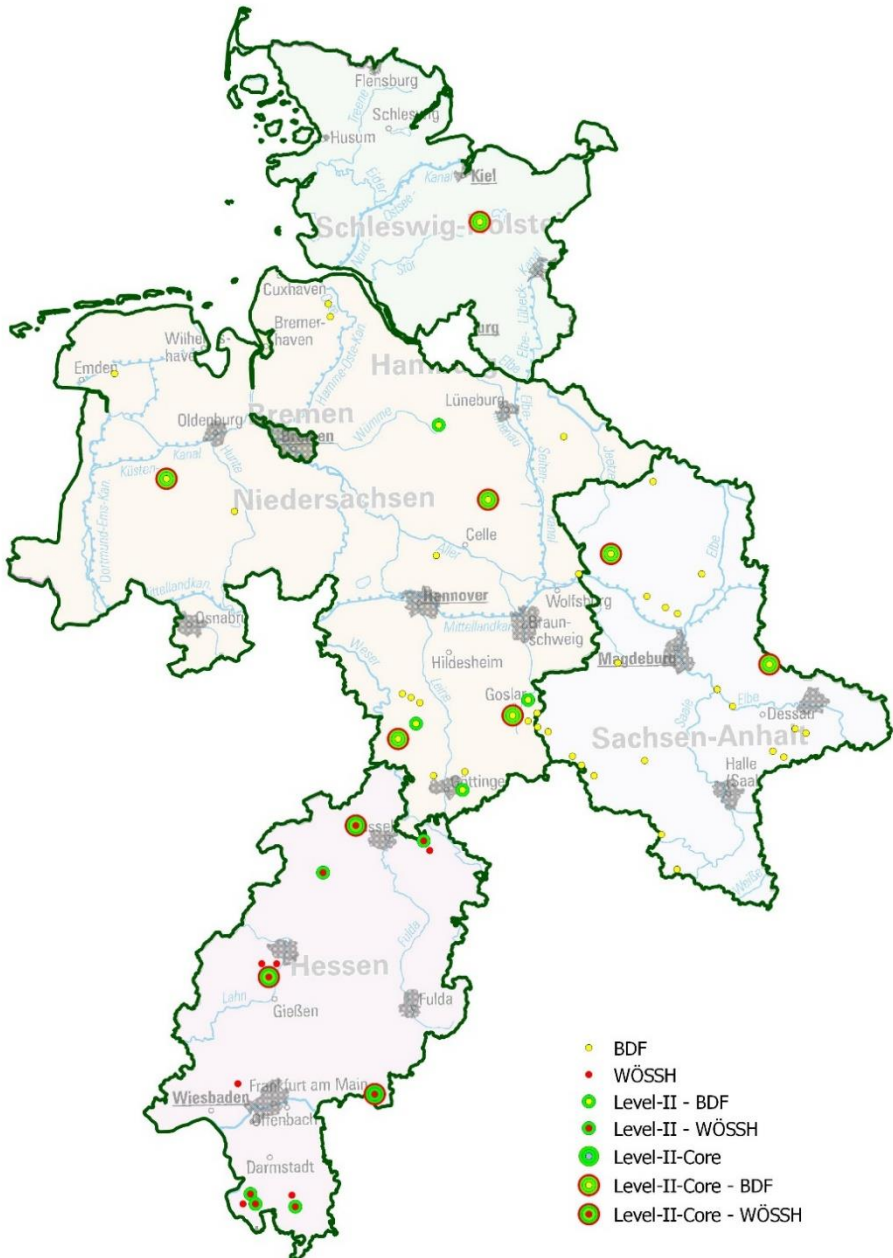


Abbildung 10: Lage der Flächen für das Intensive Monitoring in Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein (Level II)

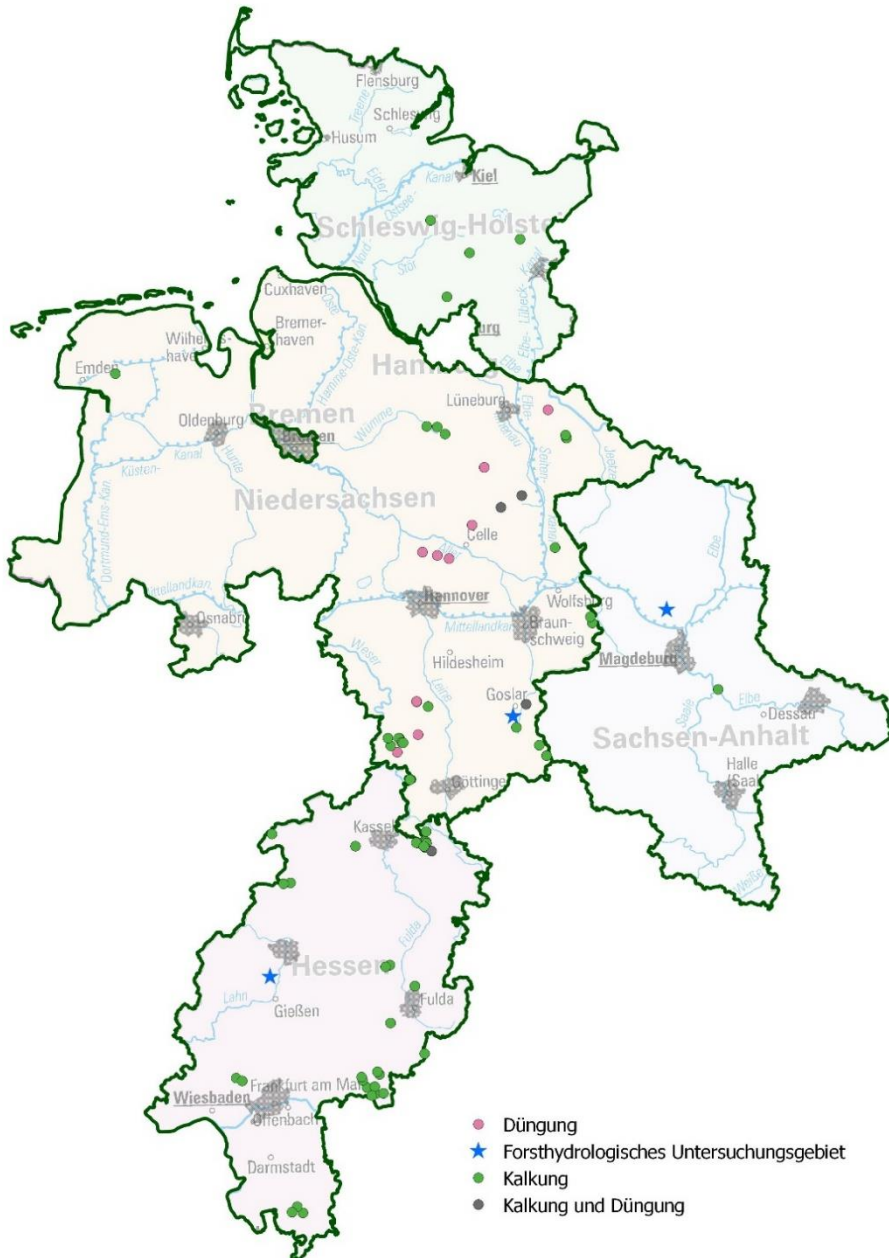


Abbildung 11: Lage der Experimentalflächen in Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein (Level III)

### 3.4 Befunde des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings zur Bewertung und Einordnung der Ergebnisse der BZE

*Birte Scheler, Henning Meesenburg*

Nachfolgend werden einige wesentliche Ergebnisse des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings (Level II) zur Entwicklung der Stoffeinträge, der chemischen Zusammensetzung der Bodenlösung sowie der Ernährungssituation dargestellt. Alle drei Flächen sind außerdem Flächen des Boden-Dauerbeobachtungsprogramms in Sachsen-Anhalt (BDF). Diese Befunde sind hilfreich für die Bewertung und Einordnung der Ergebnisse der BZE.

#### 3.4.1 Stoffeintrag – Belastungssituation der Wälder

Die weltweit längsten Zeitreihen der atmosphärischen Deposition liegen für Fichten- und Buchenbestände im Solling (Niedersachsen) vor und reichen bis 1969 zurück. In Sachsen-Anhalt wurde der Stoffeintrag in Kiefernbestände des nordostdeutschen Tieflands mit dem Niederschlag erstmals für die Jahre 1986 bis 1988 systematisch durch die Forschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Eberswalde erfasst (SIMON u. WESTENDORFF 1991). Mit Hilfe dieser Daten kann die spezielle Belastungssituation, die in den neuen Bundesländern durch die Braunkohle-Energiewirtschaft und andere verarbeitenden Gewerbe wie z.B. Kaliindustrie bis zur Wende vorlag, eingeschätzt und mit den Verhältnissen in den alten Bundesländern verglichen werden.

Im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings in Sachsen-Anhalt werden seit 1998 in zwei (BDF 5.1 Klötze Kiefer; BDF 11 Nedlitz), seit 2013 in drei Kiefernbeständen (zusätzlich Großlysimeter Colbitz) und einem Douglasienbestand (BDF 5.2 Klötze Douglasie) Stoffeinträge aus der Atmosphäre erfasst. Die Höhe der Einträge in den Waldboden ist von den Eigenschaften der Oberflächen abhängig, es wird von einer Akzeptorabhängigkeit der Einträge gesprochen. Die Einträge im Bestand sind deshalb regelmäßig höher als im Freiland. Beim Vergleich der Baumarten sind Fichten- und Douglasienbestände wegen der ganzjährigen und im Vergleich mit Kiefern dichteren Benadelung stärker durch Stoffeinträge belastet als Kiefernbestände und winterkahle Lärchen- und Laubwaldbestände.

Nachfolgend wird die zeitliche Entwicklung der Stoffeinträge auf vier Intensivmonitoringflächen in Sachsen-Anhalt sowie im Vergleich auf der Fichtenfläche im Solling in Niedersachsen dargestellt, auf denen aktuell der Stoffeintrag gemessen wird.

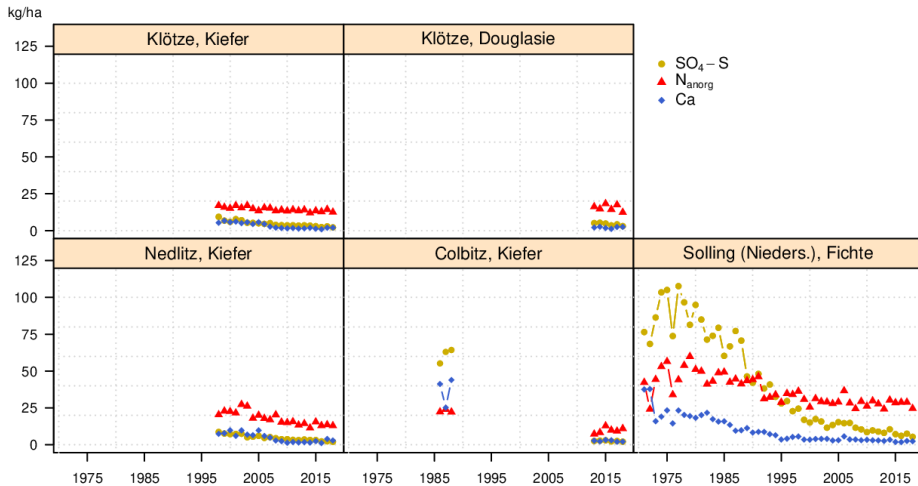


Abbildung 12: Zeitliche Entwicklung der atmosphärischen Deposition von Sulfatschwefel ( $SO_4-S$ ), Stickstoff ( $N_{anorg}$ : Summe aus Nitrat- und Ammonium-N) und Calcium ( $Ca$ ) [kg/ha] auf Flächen des Intensiven Umweltmonitorings in Sachsen-Anhalt

Die Analyse der Stoffeinträge zeigt eine extrem hohe Belastung der Waldökosysteme durch anthropogen bedingte Stoffeinträge bis Mitte/Ende der 1980er-Jahre in den alten und vermutlich bis Anfang/Mitte der 1990er Jahre in den neuen Bundesländern. Auf der Fichtenfläche im Solling wurde das Maximum der Sulfat-Schwefelbelastungen (Abb. 12;  $SO_4-S$ ; gelbe Linien) in den 1970er Jahren erreicht. Im Mittel der Jahre 1986–1988 betrug der Schwefeleintrag im Solling unter Fichte 72 kg je Hektar und Jahr, unter Buche 38 kg je Hektar und Jahr, unter Kiefer in Raum Colbitz zwischen 61 und 72 kg je Hektar und Jahr und im Raum Wittenberg sogar 173 kg je Hektar und Jahr. Trotz deutlich geringerer Niederschläge und geringerer Benetzungsdichte war die Sulfatbelastung im Raum Colbitz unter Kiefer genauso hoch wie unter Fichte im Solling. Durch das Ende der Kohlewirtschaft der ehemaligen DDR und Maßnahmen zur Luftreinhaltung sind die Emissionen von Schwefeldioxid in erheblichem Umfang zurückgegangen, auch in den neuen Bundesländern. Infolge dieser Maßnahmen ging der Schwefeleintrag in Wälder stark zurück. Unter der Annahme, dass die Ende der 1980er Jahre gemessenen Stoffeinträge repräsentativ für Kiefernbestände im Raum Colbitz waren, beträgt der Rückgang der Sulfateinträge im Vergleich zum Zeitraum 1986 - 1988 in diesem Gebiet unter Kiefer rund 95 %.

In der Diskussion um die positive Wirkung der Reduktion, insbesondere der Schwefeleinträge infolge der ergriffenen Luftreinhaltmaßnahmen, wird wenig berücksichtigt, dass die Deposition der Basen Calcium (Abb. 12;  $Ca$ ; blaue Linie), Magnesium, Kalium und Natrium (hier nicht dargestellt), die dem Säureeintrag neutralisierend gegenüberstehen und entlastend wirken, durch die Luftreinhaltmaßnahmen



ebenfalls stark reduziert wurden. In Colbitz hat der Calciumeintrag beispielsweise von 37 kg je Hektar und Jahr (Mittel 1986–1988) auf knapp 3 kg je Hektar und Jahr, d.h. um rund 90 %, abgenommen. In Colbitz wurden in den Jahren 1986–1988 im Mittel 43 % der eingetragenen Säuren durch ebenfalls eingetragene Basen neutralisiert, im Zeitraum 2013–2018 im Mittel noch 27 %. (Abb. 14, blaue Linie).

Während die Schwefelbelastung im Raum Colbitz in den Jahren 1986–1988 ähnlich hoch war wie unter Fichte im Solling, betrug die Gesamtd deposition von Stickstoff (Abb. 12; Summe aus Nitrat- und Ammonium-N; rote Linie) nur gut 50 % im Vergleich zur Fichtenfläche. Ausgehend von 23 bis 27 kg anorganischem Stickstoff im Mittel der Jahre 1986–1988 werden auf der Kiefernfläche Colbitz nunmehr knapp 10 kg je Hektar und Jahr (Mittel 2013–2018) gemessen, ein Rückgang um knapp 60 %. Auf den Kiefernflächen Nedlitz und Klötze betrug der Eintrag von anorganischem Stickstoff gut 13 kg je Hektar und Jahr (Mittel 2013–2018). Am höchsten war der Eintrag erwartungsgemäß mit rund 16 kg je Hektar und Jahr unter Douglasie (Klötze).

Da Stickstoffeinträge in der Größenordnung zwischen 10 und 16 kg je Hektar und Jahr den Stickstoffbedarf der Waldbäume nach wie vor überschreiten, kommt es zu einer weiter fortschreitenden Stickstoffsättigung. Hierdurch verändert sich der Stoffhaushalt von Wäldern großflächig und tiefgreifend. Dies kann zu Bodenversauerung, Nährelementverlusten und -imbalancen sowie Änderungen des Wuchs- und Konkurrenzverhaltens von Waldbäumen und Bodenorganismen führen (EICHORN 1995, ABER et al. 1998, DISE et al. 1998 a+b, GUNDERSEN et al. 1998a+b, ROTHE et al. 2002 a+b, BERNHARDT 2005, BERNHARDT 2005 et al., ETZOLD et al. 2020). Diese Befunde werden durch Ergebnisse Internationaler Langzeit-Monitoring-Programme, in die die Flächen aus Sachsen-Anhalt eingebunden sind, gestützt (BORKEN u. MATZNER 2004, WALDNER et al. 2015, JOHNSON et al. 2018).

Der Netto-Säureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtd deposition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid abzüglich der mit dem Niederschlag eingetragenen Basen Calcium, Magnesium und Kalium (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile; GAUGER et al. 2002). Natrium wird nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass es vollständig seesalzbürtig ist.

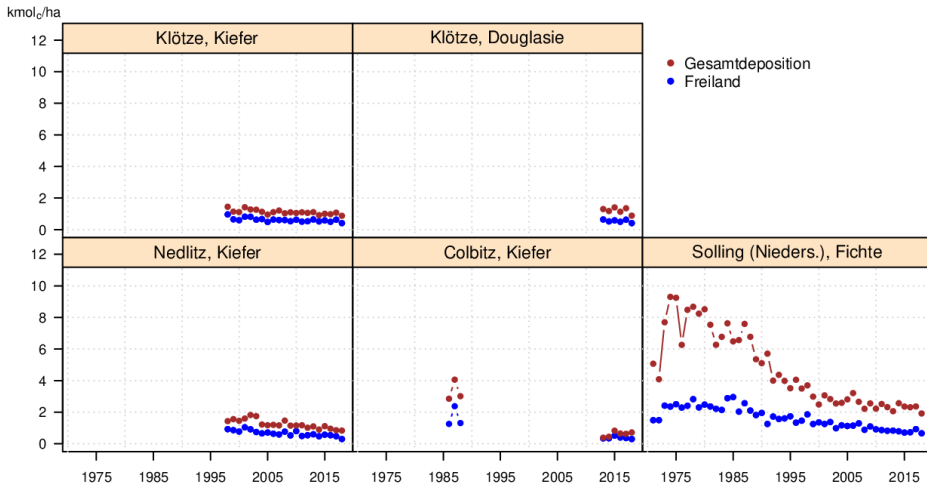


Abbildung 13: Zeitliche Entwicklung des Netto-Gesamtsäureeintrags (nach GAUGER et al. 2002) in  $\text{kmol}$ , je Hektar und Jahr auf den Flächen des Intensiven Monitorings (rot: Gesamtd deposition im Wald, blau: Freiland) in Sachsen-Anhalt

Trotz der beobachteten Abnahme der Stoffeinträge werden die Critical Loads für Säure- und für Stickstoffeinträge nach wie vor an einer Vielzahl von Standorten überschritten (MEESENBURG et al. 2015).

Die deutliche stärkere Abnahme beim Schwefeleintrag im Vergleich zum Stickstoffeintrag hat dazu geführt, dass sich die Bedeutung der einzelnen Säurebildner am Gesamtsäureeintrag deutlich verschoben hat. Während in den Jahren 1986–1988 die Schwefeldeposition für rund 60 %, die Stickstoffdeposition für rund 25 % und die Chloriddeposition (Einfluss der Kaliindustrie im Raum Colbitz; SIMON u. WESTENDORFF 1991) für rund 15 % des Gesamtsäureeintrags verantwortlich war, wird auf den Versuchsflächen in Sachsen-Anhalt heute mehr als 80 % des Gesamtsäureeintrags durch anorganische Stickstoffeinträge verursacht (Abb. 14). Chlorideinträge spielen heute hinsichtlich des Säureeintrags keine Rolle mehr.

Eine weitere Reduktion des Stickstoffeintrags ist deshalb auch unter dem Gesichtspunkt Säurebelastung dringend geboten.

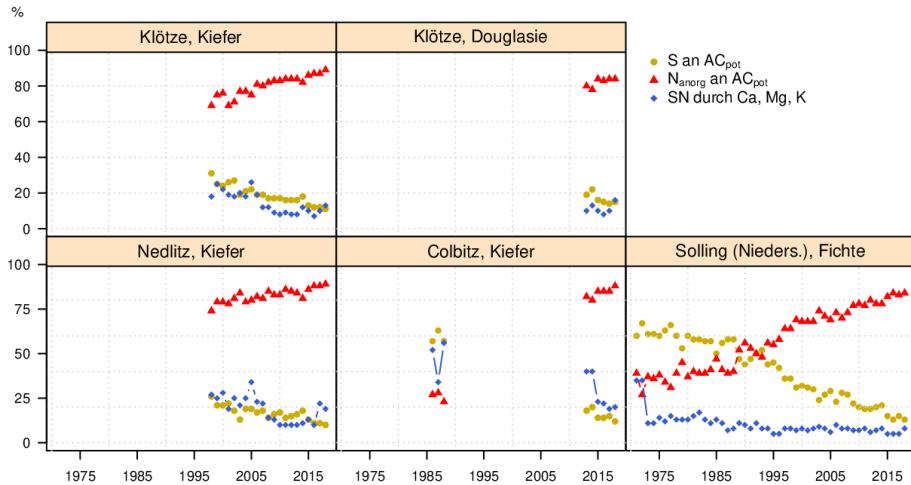


Abbildung 14: Zeitliche Entwicklung der relativen Anteile von Sulfatschwefel (gelbe Symbole) und Stickstoff (Summe aus Nitrat- und Ammonium-N, rote Symbole) am Gesamtsäureeintrag (AC<sub>pot</sub>) sowie des Anteils an AC<sub>pot</sub>, der durch eingetragene Basen neutralisiert wird, auf ausgewählten Flächen des Intensiven Monitorings (SN = Säureneutralisationskapazität, blaue Symbole auf Flächen des Intensiven Monitorings in Sachsen-Anhalt)

### 3.4.2 Chemische Zusammensetzung des Wasserflusses durch die Waldökosysteme

Die Analyse der Zusammensetzung der wichtigen Kationen und Anionen im Wasserfluss des Freilandniederschlags, der Kronentraufe sowie in der Bodenlösung verschiedener Tiefenstufen gibt Einblicke in die chemischen Veränderungen, die der Wasserfluss auf dem Weg durch das Ökosystem erfährt. Außerdem sind Rückschlüsse auf die chemischen Bodenverhältnisse möglich.

Die Wasserflüsse der beiden untersuchten Kiefernflächen zeigen eine ähnliche Stoffbefrachtung, während sich die Douglasienfläche deutlich unterscheidet (Abb. 15), trotz gleicher klimatischer Verhältnisse und chemischer Zusammensetzung des Freilandniederschlags wie auf der in der Nähe gelegenen Kiefernfläche. Wichtigstes Kation im Niederschlag (Freilandniederschlag und Kronentraufe) aller drei Flächen ist Ammonium (NH<sub>4</sub>), während Nitrat (NO<sub>3</sub>) das mengenmäßig bedeutendste Anion ist. Die stoffliche Befrachtung der Kronentraufe ist unter Kiefer 3,3-mal so hoch, unter Douglasie sogar 4,5-mal so hoch wie im Freilandniederschlag. In der Bodenlösung ist NH<sub>4</sub> kaum noch vorhanden; stattdessen gewinnt Aluminium (Al) mit einem Äquivalentanteil im Mineralboden von bis zu 59 % an Bedeutung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Al durch saure Lösungen aus den Bodenmineralien gelöst wird. Der hohe Säuregrad im Sickerwasser (erkennbar in Abb. 15 an

den Anteilen freier Säure H) ist u. a. auf die Aufnahme von  $\text{NH}_4$  durch die Vegetation oder die Umwandlung zu  $\text{NO}_3$  zurückzuführen, bei der ein bzw. zwei Säureäquivalente gebildet werden.

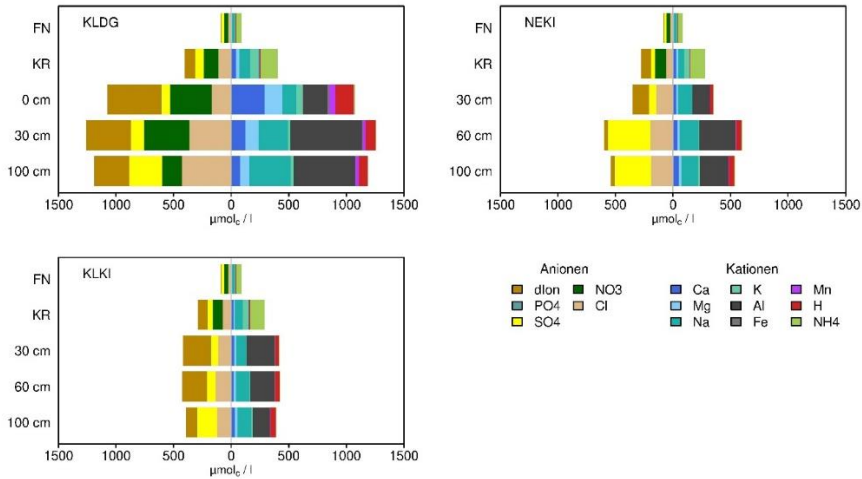


Abb. 15: Zusammensetzung der Wasserflüsse mit dem Freilandniederschlag (FN), der Kronentränfe (KR) und der Bodenlösung unter der Humusaufgabe (0 cm) sowie in 30, 60 und 100 cm des Mineralbodens auf BDF 5.1 Klötze Kiefer (unten links), BDF 5.2 Klötze Douglasie (oben links) und BDF 11 Nedlitz Kiefer (oben rechts) ( $\mu\text{mol/l}$ ;  $\text{dIon} = \Sigma\text{Kationen} - \Sigma\text{Anionen}$ , Mittelwerte 1/2013 bis 12/2019)

Obwohl im langjährigen Mittel je Hektar und Jahr mit ca. 14 kg unter Kiefer und 16 kg unter Douglasie mehr anorganischer Stickstoff in das System eingetragen wird, als der Wald für sein Wachstum benötigt, ist Nitrat im Sickerwasser nur auf BDF 5.2 Klötze Douglasie in größeren Mengen zu finden. Vermutlich wird Stickstoff in den beiden Kiefernwaldökosystemen sehr effektiv recycelt bzw. gespeichert. Das Douglasienökosystem kann hingegen offenbar nicht den gesamten eingetragenen Stickstoff verwerten. Zwar ist die Nitratkonzentration in den Tiefenstufen 0 und 30 cm deutlich höher als in 100 cm Tiefe, es besteht aber die Gefahr, dass es zu einem relevanten  $\text{NO}_3$ -Austrag in Richtung Grundwasser kommt.

Auf allen drei Flächen ist eine Zunahme der Sulfatgehalte ( $\text{SO}_4$ ) im Sickerwasser mit zunehmender Tiefe zu beobachten, die zwischen 30 und 100 cm Bodentiefe besonders ausgeprägt ist (Abb. 15). Dies deutet auf eine Remobilisierung von zwischengespeichertem Schwefel hin, die aufgrund der zurückgehenden Sulfateinträge eingesetzt hat. Aufgrund der mit der Remobilisierung von  $\text{SO}_4$  verbundenen Freisetzung von Säure wird somit der Effekt abnehmender Säureinträge teilweise kompensiert.

Insbesondere die Kiefern-BDF weisen sehr niedrige Gehalte an basischen (Nährstoff-)Kationen (Kalium, Magnesium, Calcium) in der Bodenlösung auf. Höhere Anteile finden sich nur auf der Douglasienfläche unmittelbar unter der Humusauf-lage (0 cm Tiefe).

Damit besteht das Risiko einer unzureichenden Versorgung der Waldbäume mit diesen Nährstoffen. Die BDF 11 Nedlitz wurde in der Vergangenheit vermutlich in deutlich stärkerem Ausmaß als die BDF 5.1 Klötze Kiefer durch Flugascheeinträge mit basischen Stäuben beeinflusst (HOFMANN & HEINSDORF 1990). Daher lagen die Gehalte der basischen Kationen in der Bodenlösung in Nedlitz zu Beginn der Beobachtung deutlich über denen in Klötze. Mittlerweile hat sich das Niveau der Konzentrationen auf beiden Flächen angeglichen.

### 3.4.3 Ernährungssituation

Die durch Nadelanalysen erfasste Ernährungssituation zeigt für BDF 5.1 Klötze Kiefer für Calcium, Magnesium und Phosphor eine sehr geringe, im Bereich der latenten Mangelernährung liegende Versorgung, während die Versorgung auf BDF 11 Nedlitz Kiefer für diese Elemente im unteren Normalbereich liegt. Die Ernährung mit Stickstoff ist auf allen Flächen aufgrund der hohen Stickstoffeinträge gut bis sehr gut, bei Kalium liegen die Gehalte in den meisten Jahren im für das Wachstum optimalen mittleren Normalbereich (GÖTTLEIN 2015). Für Calcium, Kalium, Phosphor und Stickstoff sind auf den Kiefernflächen abnehmende Trends festzustellen. Abnehmende Phosphorgehalte in Kiefernadeln in Europa wurden auch von JONARD et al. (2015) festgestellt. Der langjährige Trend kehrt sich für Kalium und Phosphor auf der BDF 11 Nedlitz in einen zunehmenden Trend um, wenn analog der Douglasienfläche der Zeitraum 2012 bis 2019 betrachtet wird, während sich der negative Trend auf der BDF 5.1 Klötze fortsetzt bzw. noch verstärkt. Wenn sich der Trend abnehmender Kaliumgehalte in Klötze weiter fortsetzt, ist in den nächsten Jahren eine defizitäre Kaliumernährung zu erwarten (Abb. 16).

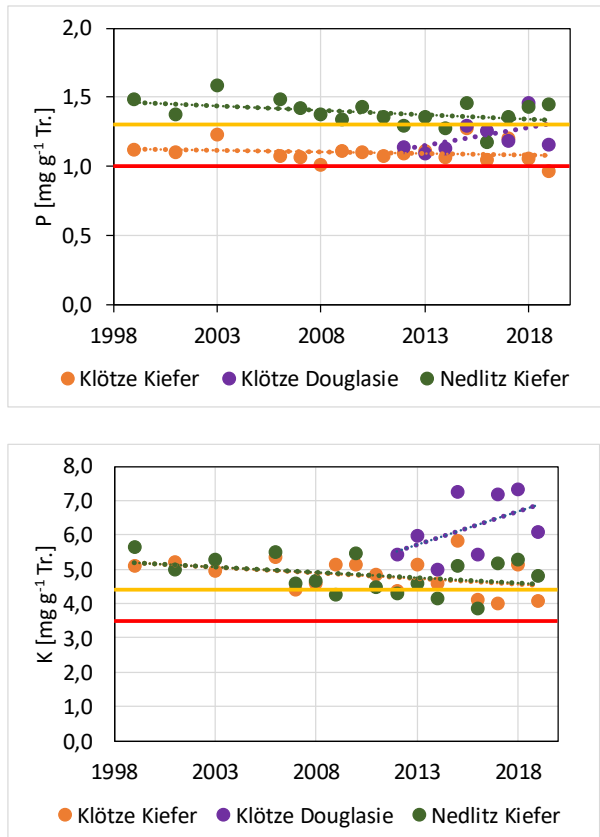


Abb. 16: Gebalte von Phosphor (P, oben) und Kalium (K, unten) im jeweils aktuellen Nadeljahrgang der BDF 5.1 Klötze Kiefer, BDF 5.2 Klötze Douglasie und BDF 11 Nedlitz im Zeitraum 1999 bis 2019. Die horizontalen Linien zeigen die untere Grenze des Normalbereichs (gelb) bzw. die Symptomgrenze (rot) bei der Ernährung bei Kiefer an (GÖTTLEIN, 2015). Die gepunkteten Linien, soweit dargestellt, zeigen einen signifikanten ( $p \leq 0,05$ ) linearen Trend an.

Die Douglasienfläche Klötze zeichnet sich im Vergleich mit den Kiefernflächen durch deutlich höhere Calcium-, Magnesium- und Kaliumgehalte aus. Hierin spiegeln sich vermutlich die deutlich höheren Konzentrationen dieser Elemente in der Bodenlösung wider. Außerdem weisen die Gehalte aller fünf Nährelemente unter Douglasie einen steigenden Trend auf.

#### 3.4.4 *Schlussfolgerung und Ausblick*

Das Monitoring auf den Intensiv-Beobachtungsflächen zeigt, dass die atmosphärischen Stoffeinträge in die Wälder Sachsen-Anhalts deutlich zurückgegangen sind. Es ist jedoch weiterhin eine Reduktion der Säure- und Stickstoff-Emissionen nötig, da die kritischen Belastungsgrenzen (Critical Loads) für Säure und eutrophierenden Stickstoff an vielen Standorten immer noch überschritten werden. Dies zeigt sich auch in den niedrigen pH-Werten der Bodenlösung. Diese liegen auf den Kiefernflächen im Mittel bei 4,4 (Klötze) bzw. 4,3 (Nedlitz), auf der Douglasienfläche sind sie mit 3,8 (0 cm Tiefe) resp. 4,1 (30 und 100 cm) noch deutlich niedriger. Trotz hoher anorganischer Stickstoffeinträge findet sich Nitrat in der Bodenlösung beider Kiefernflächen nur in sehr geringen Konzentrationen. Auf der Douglasienfläche ist Nitrat hingegen in nennenswertem Umfang gelöst, nimmt aber mit der Tiefe deutlich ab.

Die Phosphor- und Magnesiumernährung der Waldbestände ist meist defizitär. Rückläufige Trends sind auf den Kiefernflächen u.a. bei Calcium festzustellen. Waldkalkungen bieten sich daher als Option zur Stabilisierung des Bodenzustandes sowie der Calcium- und Magnesiumernährung an.

Das intensive Umweltmonitoring von Waldstandorten in Sachsen-Anhalt hat sich zu einem Instrument der integrierten Umweltbeobachtung entwickelt. Die Ergebnisse zum Zustand und zur Entwicklung der Waldböden eignen sich als Frühwarnsystem für ungünstige Umweltveränderungen sowie zur Entscheidungsunterstützung für umweltpolitische Maßnahmen und das forstliche Management.





## 4 Aufgaben und Ziele der Bodenzustandserhebungen

*Uwe Paar, Jan Evers*

Die Bodenzustandserhebungen sind im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings integraler Bestandteil der Übersichtserhebungen (Level I).

Die bundesweit systematische Stichprobeninventur zum Zustand der Waldböden liefert ein umfassendes und flächendeckendes Bild hinsichtlich des aktuellen Zustandes und der Veränderungen der Waldbodenfunktionen.

Die Sorge um eine flächendeckende Nährstoffverarmung und eine Versauerung der Waldböden durch luftbürtige Säurebildner sowie der Bedarf an bundesweit vergleichbaren Boden- und Standortinformationen gaben den Anlass für die erste Bodenzustandserhebung im Wald (BZE I). Dementsprechend wurde der Arbeitsauftrag formuliert (WOLFF u. RIEK 1997). Diese Zielsetzung gilt grundlegend auch für die zweite BZE (WELLBROCK et al. 2006).

Demnach hat die Bodenzustandserhebung in Ergänzung zur Waldzustandserhebung die Aufgabe, zuverlässige, flächenrepräsentative und bundesweit vergleichbare Informationen

- über den aktuellen Zustand der Waldböden und deren Veränderungen im Laufe der Zeit in Verbindung mit den Ergebnissen der Erhebung des Waldzustands,
- zur Übertragung der Ergebnisse der Waldbodenforschung auf größere Waldgebiete,
- zur Identifizierung von Ursachen der Veränderungen des Bodenzustandes sowie des Einflusses von Depositionen,
- zur Einschätzung von Gefahren, die sich für den derzeitigen Waldbestand und für die nächste Waldgeneration aus dem Bodenzustand ergeben,
- zur Einschätzung von Risiken für die Qualität von Grund-, Quell- und Oberflächenwasser
- sowie zur Planung und Durchführung von notwendigen Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung des Bodenzustandes sowie des Nährstoffangebotes im Boden und der Nährstoffaufnahme durch die Baumwurzeln

zu liefern.

Neue Erkenntnisse, politische Anforderungen und neue gesetzliche Aufgaben machten es notwendig, in der Zielsetzung der BZE II weiterführende Aspekte zu berücksichtigen, um Aussagen zu den derzeit wichtigsten Themen der Waldbodenforschung zu ermöglichen (KÖLLING 2005, WELLBROCK et al. 2006). Diese sind:

- der *Stickstoffstatus* von Waldböden und deren Sensitivität gegenüber weiteren Stickstoffeinträgen,
- die *aktuelle Kohlenstoffspeicherung* und Änderungen des Kohlenstoffvorrates in Waldböden (Klimarahmenkonvention und Kyoto-Protokoll),
- die *bodenchemische und waldernährungskundliche Wirkung von Maßnahmen zur Stabilisierung der Waldökosysteme* (Erfolgskontrolle, vor allem Bodenschutzkalkungen und naturnaher Waldbau),
- die Hintergrundbelastung von Böden *mit Schwermetallen und organischen Spurenstoffen* (BBODSCHG 1998),
- *der Wasserhaushalt unter veränderten Klimabedingungen*,
- die Beurteilung von *Waldböden als Produktionsgrundlage der Forstwirtschaft* und
- die Eigenschaften von *Waldböden als Lebensraum*.

Dementsprechend werden Bodeneigenschaften bestimmt, die Auskunft über den Säurezustand, die Belastung mit umweltgefährlichen Stoffen, den Stickstoffstatus, die Kohlenstoffbindung, die Wasserspeicherung und die Bedeutung des Bodens für die Baumernährung, das Baumwachstum und als Lebensraum geben.

## 5 Methoden

*Jan Evers, Uwe Paar, Inge Dammann, Marcus Schmidt*

### 5.1 Allgemeine Einführung

In der Zeit von 2006 bis 2008 fand in den Wäldern Sachsen-Anhalts die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung (BZE II) statt. Sie folgte der ersten Waldbodenzustandserhebung (BZE I), die in Sachsen-Anhalt in den Jahren 1992 bis 1994 durchgeführt und 1998 publiziert wurde (FORSTLICHE LANDESANSTALT SACHSEN-ANHALT 1998). Voraussetzung für die Ermittlung von Veränderungen bei Folgeinventuren ist die grundsätzliche Einhaltung gleicher Erhebungsprinzipien, wie insbesondere des Erhebungsrasters, des Stichprobenkonzepts und der Methoden. Bei der konzeptionellen Ausgestaltung der BZE II wurden daher möglichst viele methodische Vorgaben aus der BZE I übernommen. Im Hinblick auf länderübergreifende Vergleiche ist von Bedeutung, unterschiedliche Definitionen der Standortselemente der Länder zu vereinheitlichen. Das ist für die Partnerländer der NW-FVA 2015 von einer Expertengruppe erstmalig zusammengestellt worden (SCHMIDT et al. 2015). Darüber hinaus musste die Vergleichbarkeit von Analyseverfahren beachtet bzw. eine Angleichung unterschiedlicher Tiefenbeprobungen vorgenommen werden (s. a. EVERS et al. 2010).

Das BZE II-Stichprobennetz in Sachsen-Anhalt beruht auf einem systematischen 8 x 8 km-Raster als Teil des 4 x 4 km-Rasters der Waldzustandserhebung (WZE, FORSTLICHE LANDESANSTALT SACHSEN-ANHALT 1998) inklusive 19 EU-Punkten im 16 x 16 km-Raster. Insgesamt gibt es 65 BZE-Punkte, die sowohl zum Kollektiv der BZE I als auch der BZE II gehören. Im Rahmen der zeitgleichen Erhebungen des BioSoil-Projekts der EU sind zwischen 2006 und 2008 insgesamt 19 BZE-Punkte auch nach den BioSoil-Kriterien beprobt und analysiert worden (HIEDERER et al. 2011). Insgesamt gibt es 78 BZE I und/oder II-Punkte in Sachsen-Anhalt (s. Tab. 2).

*Tabelle 2: Anzahl BZE-Punkte der BZE I und II sowie des BioSoil-Projekts in Sachsen-Anhalt*

| BZE-Punkte     | nur BZE I | BZE I und II | nur BZE II | BZE I | BZE II | gesamt |
|----------------|-----------|--------------|------------|-------|--------|--------|
| Sachsen-Anhalt | 2         | 47           | 10         | 49    | 57     | 59     |
| BioSoil        | 0         | 18           | 1          | 18    | 19     | 19     |
| Summe          | 2         | 65           | 11         | 67    | 76     | 78     |

## 5.2 Merkmalsgruppen

Bei der BZE II wurden folgende Merkmalsgruppen erfasst:

- Forstliche Daten und allgemeine Angaben (Punktdata, raumbezogene Daten, Daten zur Aufnahmesituation und Angaben zu Boden verändernden Ereignissen)
- Boden (Profilbeschreibung, Bodenchemie inkl. Schwermetalle und Organika sowie Bodenphysik, jeweils getrennt nach Mineralboden und Humusauflage)
- Nadel-/Blatternahrung
- Bestandesdaten
- Vitalität (Waldzustandserhebung)
- Bodenvegetation

## 5.3 Untersuchungsdesign und -module am BZE II-Punkt

Das in Abbildung 18 dargestellte Design für die verschiedenen Untersuchungsobjekte wurde auf sämtlichen BZE II-Punkten in Sachsen-Anhalt umgesetzt.

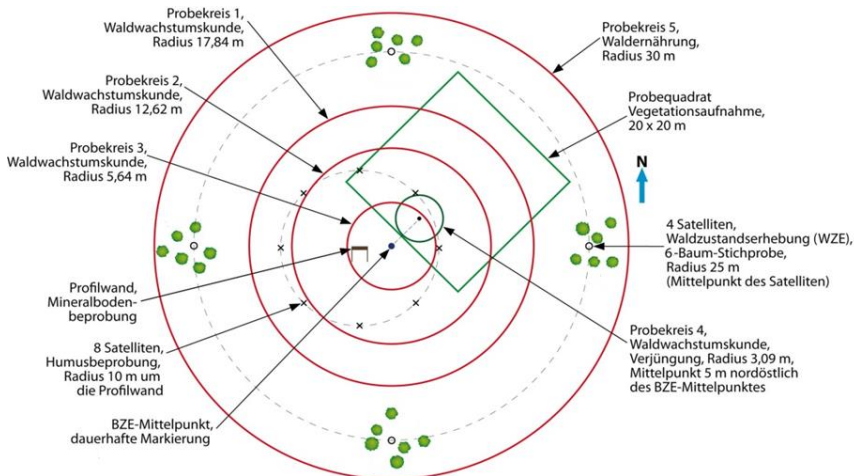


Abbildung 18: Inventurdesign an sachsen-anhaltischen BZE II-Punkten

In der Nähe des BZE-Mittelpunktes, der zugleich auch Mittelpunkt der Waldzustandserhebung (WZE, 4 x 6-Baum-Stichprobe, Radius 25 m (äußere gestrichelte Linie)) ist, wurde ein Bodenprofil angelegt und eingemessen. Der BZE-Mittelpunkt war zugleich Mittelpunkt der konzentrischen Probekreise für die waldwachstumskundlichen Aufnahmen. Die Vegetationsaufnahmen fanden i. d. R. in einem

20 x 20 m-Quadrat nordöstlich des BZE-Mittelpunktes statt, um möglichst ungestörte Vegetationsaufnahmen sicherzustellen. Dieses Quadrat konnte bei Bedarf um jeweils 90° gegen den Uhrzeigersinn verschoben werden. Die Ecken wurden verpflockt und eingemessen. Die Gesamtbeschreibung des BZE-Punktes (Bestand, Geländeform, Vegetationsarten, Bodenbearbeitung) bezog sich auf einen 30 m-Radius-Kreis (Probekreis 5). Die Satelliten der Bodenprobennahme wurden von der Profildwandmitte aus, jeweils 10 m entfernt, in den Haupt- und Zwischenhimmelsrichtungen eingemessen.

### *5.3.1 Beprobung und Analyse des Auflagehumus und des Mineralbodens*

Die 76 BZE II-Punkte wurden im Zeitraum vom 15.11.2005 bis 13.10.2006 im Schwerpunkt beprobt, eine erforderliche Nachbeprobung wurde 2012 durchgeführt.

Die Beprobung orientierte sich an der bundesweiten BZE II-Arbeitsanweisung (WELLBROCK et al. 2006). Der Auflagehumus und Mineralboden wurde nach den BZE-Tiefenstufen (0–5, 5–10, 10–30, 30–60, und 60–90) an den 8 Satelliten mit Stechrahmen verschiedener Größen (Auflagehumus) und Stechzylinder (Mineralboden) volumengerecht beprobt. In tieferen Bereichen ab 30 cm Bodentiefe wurde mit dem N-Min-Bohrerset für die bodenchemischen Analysen gearbeitet und die bodenphysikalische Beprobung mit Stechzylindern am Profil durchgeführt.

Die Beprobung des Auflagehumus und Mineralbodens erfolgte auf Ebene der Einzelprobe jeweils an derselben Stelle, um Fehler bei der Vorratsberechnung durch Standortwechsel zu vermeiden. Bei einer deutlichen Haupthorizontgrenze innerhalb einer Tiefenstufe wurde von der Tiefenstufenbeprobung abgewichen. Dies trat z. B. regelmäßig bei organisch geprägten Horizonten, wie z. B. Anmooren, auf. In den meisten dieser Fälle sind dann zusätzlich die BZE-Tiefenstufen unterteilt worden, sodass eine Rückführung in die betreffende Tiefenstufe problemlos (rechnerisch) möglich wurde. Um eine Verschleppung humosen Oberbodens in tiefere Schichten zu vermeiden, verlief die Beprobung stufenweise, indem immer die obere Schicht bei der Beprobung der darunterliegenden abgetragen wurde. Die Proben wurden in Probesäcken (Baumwolle) verpackt und zeitnah in das Umweltlabor der NW-FVA zur Analyse transportiert.

Zeitgleich sind Proben für das EU Forest Focus Programm (BioSoil), für die Bestimmung der Hintergrundwerte für Schwermetalle durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR Hannover) und für die Bestimmung persistenter organischer Schadstoffe durch das Umweltbundesamt (UBA Dessau) gewonnen worden. Diese Proben wurden zur Vorbereitung ebenfalls zum Umweltlabor der NW-FVA geliefert und anschließend an die o. g. Institutionen zur Analyse geschickt.

Die Probenvorbereitungen, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden erfolgten auf Basis des „Handbuches Forstliche Analytik“ (HFA inklusive Er-

gänzungslieferungen, GAFA 2005, 2014) und Methodendokumentationen des Umweltlabors der NW-FVA (KÖNIG u. FORTMANN 1996, 1999, 2012, KÖNIG et al. 2009). Die in den Laboren angewandten Methoden sind dem Kapitel 11 „Qualitätssicherung“ zu entnehmen. In der ECO-Datenbank der NW-FVA (SCHULZE u. EVERS 2013) ist für jeden Analysenwert auch der HFA-Code hinterlegt.

### 5.3.2 *Blatt- und Nadelernährung*

Die bei der BZE II angewandten Methoden und Zeitpunkte der Blatt- und Nadelbeprobung sind in Niedersachsen (inkl. Bremen), Hessen und Sachsen-Anhalt identisch. Die Analyse der Nadeln und Blätter wurde einheitlich im Umweltlabor der NW-FVA durchgeführt.

An 67 Inventurpunkten des systematischen BZE II-Rasters in Sachsen-Anhalt wurden Nadeln und Blätter aus der Oberkrone von drei Probebäumen je Baumart als Mischprobe chemisch analysiert. An neun BZE II-Punkten wurden keine Blatt- oder Nadelproben gewonnen, weil der Bestand durch Windwurf zerstört bzw. keine der Hauptbaumarten vertreten war (s. Tab. 3). Insgesamt umfasste die Beprobung der Laubbäume im Juli 2007 sowie der Fichten und Kiefern im Winter 2007/2008 67 BZE-Punkte. Da an vielen Erhebungspunkten mehrere Baumarten vorkommen, sind insgesamt 78 Beprobungen von jeweils drei Probebäumen in Sachsen-Anhalt erfolgt. Grundlage für die Erhebung war auch hier die Arbeitsanleitung zur Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) (WELLBROCK et al. 2006).

Bei der BZE I wurden 1992 nur an Nadelholzbeständen (40 BZE I-Punkte) Beprobungen und Analysen durchgeführt, Laubholzbestände blieben unberücksichtigt.

Tabelle 3: Übersicht der Blatt- und Nadelproben im Rahmen der BZE I in Niedersachsen (inkl. Bremen), Sachsen-Anhalt und Hessen

|  | Niedersachsen  |  |   |
|--|--|--|---|
|  | BZE I  | 1996 BZE Ib  | BZE II<br>(inkl. Bremen)  |
| Beprobte Inventurpunkte                                      | 146  | 204  | 162 (8 x 8 km-Raster)<br>+ 65 (BZE I-Raster)  |
| Baumarten*   | Bu, Ei, Fi, Ki, Dgl, Bi,<br>Erl, Stro                                  | Bu, Ei, Fi, Ki, Dgl, Bi,<br>Erl, Stro, Ta  | Bu, Ei, Fi, Ki  |
| Alter der Probebäume<br>(zum Zeitpunkt der Proben-<br>nahme) | > 40 Jahre (bis auf 3<br>Ausnahmen) 22–207                             | alle Alter<br>17–212   | alle Alter<br>10–189  |
| Zeitpunkt der Proben-<br>nahme                               | Laubholz: Juli–August<br>1990 (1991)<br>Nadelholz: Winter<br>1990/1991 | Laubholz und Lärche:<br>Juli–August 1996<br>Nadelholz: Februar–<br>März 1996       | Laubholz: Juli–August<br>2007<br>Nadelholz: Winter<br>2007/2008   |
| Mischproben  | Mischproben aus 3<br>Bäumen der jeweiligen<br>Baumart                  | Mischproben aus 3<br>Bäumen der jeweiligen<br>Baumart                              | Mischproben aus 3<br>Bäumen der jeweiligen<br>Baumart   |
| Anzahl der Proben  | 153<br>Bu 46, Ei 18, Fi 29,<br>Ki 53, Bi 2, Dgl 2,<br>Erl 2, Stro 1    | 215<br>Bu 51, Ei 22, Fi 43,<br>Ki 80, Bi 4, Dgl 5,<br>Erl 4, Stro 1, Lä 4,<br>Ta 1 | 206 (8 x 8 km-Raster)<br>Bu 44, Ei 28,<br>Fi 52, Ki 82<br>+ 71 (BZE I-Raster)<br>Bu 25, Ei 10<br>Fi 11, Ki 25 |
| Analysierte Nadeljahr-<br>gänge                              | Ki, Str: 1+2;<br>Fi, Dgl: 1–3  | Ki, Str: 1;<br>Fi, Dgl, Ta: 1–3  | Ki: 1+2; Fi: 1–3  |

|  | Sachsen-Anhalt                                       |   |
|--|--|---|
|  | BZE I  | BZE II  |
| Beprobte Inventurpunkte                                      | 40   | 67  |
| Baumarten*   | Fi, Ki   | Bu, Ei, Fi, Ki  |
| Alter der Probebäume<br>(zum Zeitpunkt der Proben-<br>nahme) | alle Alter<br>5–191                                  | alle Alter<br>18–206                                      |
| Zeitpunkt der Proben-<br>nahme                               | Winter 1992  | Laubholz: Juli–August 2007<br>Nadelholz: Winter 2007/2008 |
| Mischproben  | Mischproben aus 3 Bäumen der je-<br>weiligen Baumart | Mischproben aus 3 Bäumen der je-<br>weiligen Baumart      |
| Anzahl der Proben  | 40<br>Ki 32, Fi 8                                    | 78<br>Bu 11, Ei 13, Fi 10, Ki 44                          |
| Analysierte Nadeljahr-<br>gänge                              | Ki: 1; Fi: 1+3                                       | Ki: 1+2; Fi: 1–3  |

(Fortsetzung Tabelle 3)

|   | Hessen         |   |
|---|----------------|---|
|   | BZE I          | BZE II  |
| Beprobte Inventurpunkte                                 | Keine Erhebung | 137   |
| Baumarten*  |                | Bu, Ei, Fi, Ki  |
| Alter der Probestämme<br>(zum Zeitpunkt der Probenahme) |                | alle Alter<br>12–216                                      |
| Zeitpunkt der Probenahme                                |                | Laubholz: Juli–August 2007<br>Nadelholz: Winter 2007/2008 |
| Mischproben   |                | Mischproben aus 3 Bäumen der jeweiligen Baumart           |
| Anzahl der Proben                                       |                | 238<br>Bu 80, Ei 44, Fi 67, Ki 47                         |
| Analysierte Nadeljahrgänge                              |                | Ki: 1+2; Fi: 1–3  |

\* Baumarten: Bi (Birke), Bu (Buche), Dgl (Douglasie), Ei (Eiche), Erl (Erle), Fi (Fichte), Ki (Kiefer), Lä (Lärche), Stro (Strobe), Ta (Tanne)

Die Beprobungen auf den Flächen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings entsprachen der Methodik des ICP Forests-Manuals (ICP FORESTS 1998) mit ein- bis zweijährigem Beprobungssturnus. Pro Fläche wurden 6 bis 9 Bäume beprobt.

Bei der BZE I in Sachsen-Anhalt wurden die Probestämme gefällt, daher wurden bei der BZE II andere Probestämme ausgewählt. In Hessen fand im Rahmen der BZE I keine waldernährungskundliche Untersuchung statt.

### 5.3.3 Vegetationsaufnahmen

Haupterfassungszeitraum für die Bodenvegetation waren die Monate Mai bis September 2008. Auf basen- und kalkreichen Böden (Vorinformation aus der BZE I) wurde eine erste Erhebung bereits im April/Mai 2008 vorgenommen, um Frühjahrs-Geophyten zu erfassen. Ein zweiter Aufnahmedurchgang erfolgte bei voller Entwicklung der Waldgräser ab Mitte Juni. Die Waldvegetation bodensaurer Standorte wurde von Mai bis September (notfalls noch im Oktober) aufgenommen. Um eine zeit- und kostenaufwändige zweimalige Begehung zu vermeiden, wurde die Aufnahmereihenfolge an die Gegebenheiten angepasst.

Die Flächengröße der Vegetationsaufnahme am BZE-Punkt beträgt einheitlich 400 m<sup>2</sup>. Die Aufnahmefläche hat immer eine quadratische Form (20 x 20 m). Sie befindet sich möglichst nahe am Bodenprofil, damit eine enge Verbindung von Boden-Kenngrößen und Vegetation gewährleistet ist, und wurde an allen 4 Eckpunkten oberirdisch mit Holzpflocken sowie unterirdisch mit Dauermagneten markiert.



Die Flächenauswahl erfolgte nicht nach Homogenität wie bei pflanzensoziologischen Untersuchungen, sondern nach Kriterien einer systematischen Stichprobe. Ausgehend vom BZE-Mittelpunkt liegt die Mittelachse des Quadrates auf der nordöstlichen Linie. Dabei befindet sich der Mittelpunkt der Grundseite (profilnahe Seite) in 1,91 m Entfernung vom BZE II-Mittelpunkt auf dieser Linie (s. Abb. 18). In begründeten Fällen konnte von diesem Schema abgewichen werden. Ausgangspunkt blieb dann der BZE-Mittelpunkt, von dem aus die Fläche durch Drehung nach Südosten verlegt werden kann. War auch die dabei erreichte Fläche ungeeignet, so konnte durch „freies Drehen“ eine geeignete Alternative ausgewählt werden. Als massive Störungen der Bodenvegetation, die ein Abweichen vom Schema rechtfertigten, wurden hier insbesondere angesehen: Erdaushub des Bodenprofils, Waldrandlage, Bestandeswechsel, Fahrwege und Rückelinien.

Auf den so ausgewählten Flächen erfolgte die Erfassung aller Arten der Moos-, Kraut-, Strauch- und Baumschicht mit Schätzung der Deckungsgrade der Gefäßpflanzen in Prozent. Für die Moose, die teilweise erst nachbestimmt werden mussten, erfolgte keine Deckungsgrad-Schätzung. Aufgenommen wurde schließlich noch die Höhe der Vegetationsschichten. Zusätzlich zu dieser Vegetationsaufnahme wurde eine vollständige Artenliste der Gefäßpflanzen für den gesamten 30-m-Projektbereich erstellt.

#### *5.3.4 Waldwachstumskundliche Aufnahmen*

Der methodische Ansatz und die Ergebnisse der waldwachstumskundlichen Aufnahmen werden in diesem Band nicht aufgeführt, sondern gesondert veröffentlicht.



## 6 Ergebnisse der Bodenuntersuchungen

### 6.1 Repräsentativität des Erhebungsnetzes

*Jan Evers, Martin Buresch, Swen Hentschel*

Die BZE des Landes Sachsen-Anhalt mit dem systematischen 8 x 8 km Rasternetz erfasst alle flächenhaft wichtigen Standorts- oder Bestockungseinheiten (BZE I-Bericht, FORSTLICHE LANDESANSTALT SACHSEN-ANHALT 1998). Die prozentualen Baumartengruppenanteile in der BZE-Stichprobe decken sich relativ gut mit den Angaben für den Gesamtwald in Sachsen-Anhalt. Dabei sind die Kiefern- und Eichenbestände in der BZE-Stichprobe leicht unterrepräsentiert, die Buchen und sonstigen Nadelbäume (Küstentanne) überrepräsentiert. Die Fichtenbestände sind jeweils in beiden Verteilungen mit 15 % identisch. Auch die Altersstruktur wird im BZE I-Bericht als ausreichend gut mit der BZE repräsentiert angegeben. Hinsichtlich der Verteilung nach Klimafeuchte und Nährkraftstufen und vor allem deren Kombinationen deckt die BZE knapp 70 % der durch die Standortkartierung erfassten Stamm-Standortsformen ab. Dies liegt in der hohen standörtlichen und klimatischen Vielfalt des Landes Sachsen-Anhalt begründet, zumal auch der Großteil der Standortkonstellation nur geringe Flächenanteile aufweist. Als Fazit werden im BZE I-Bericht nur die häufigeren Bodenformen als ausreichend repräsentativ erfasst für Sachsen-Anhalts kartierte Waldstandorte angesehen.

Im Folgenden wird die Repräsentativität des Stichprobennetzes der BZE II hinsichtlich der vorkommenden Substratgruppen und Trophiestufen in Sachsen-Anhalt geprüft.

#### 6.1.1 Vergleich BZE II und BÜK 1000

Die Bodenübersichtskarte 1:1 Mio (BÜK 1000, BGR 2007) stellt bundesweit flächendeckend die Verbreitung typischer Böden dar. Den 69 bundesweit typisch vorkommenden Böden der BÜK 1000 wurden die in der BZE II verwendeten Substratgruppen zugewiesen. Die sich daraus ergebende Verteilung der Substratgruppen nach den Legenden/Bodeneinheiten der BÜK 1000 bezogen auf die Koordinaten der BZE II-Punkte lässt sich für die Einschätzung der Repräsentativität mit der Verteilung der Substratgruppen nach der BZE II heranziehen. Weiterhin liefert eine Verschneidung der BÜK 1000 mit dem ATKIS-Walddecker die Verteilung aller Flächen der BÜK 1000-Legendeneinheiten für Sachsen-Anhalt und damit eine Abschätzung der flächenhaften Verteilung der BZE II-Substratgruppen in den Wäldern Sachsens-Anhalts.

Die Legendeneinheiten der BÜK 1000 orientieren sich an Regionen, wie z. B. Küstenraum oder Hochgebirge, an der Geländeform sowie den Bodentypen und Ausgangssubstraten. Die Zuweisungen zu bestimmten BZE-Substratgruppen sind teilweise unscharf, wie z. B. zu den BZE-Substratgruppen Grauwacke und Tonschiefer, da diese beiden Substrate in der BÜK 1000 bei den Braunerden mit verschiedenen basenarmen Substraten (z. B. mit Sandstein, Quarzit und Phyllit bzw. Schluffschiefern und Gneis) zusammenstehen. Die Abgrenzung der Sande nach Verlehmungsgraden wie in der BZE II ist ebenfalls nicht eindeutig. Für den Vergleich mit der BÜK 1000 wurden die Substratgruppen verlehmtter und schwach verlehmtter Sand daher zusammengefasst, um die Zuordnung mit den Legendeneinheiten der BÜK zu vereinfachen. Die jeweilige prozentuale Verteilung ist in Tabelle 4 angegeben.

Die große Gruppe der unverlehmtten Sande in den Waldböden Sachsen-Anhalts mit 53 % Anteil in der BZE II findet sich mit 48 % in der BÜK an den BZE-Punkten und mit 47 % flächenbezogen aus der Verschneidung der ATKIS-Waldfläche mit der BÜK 1000 in ähnlichen Größenordnungen wieder. Auch die Anteile der schwach- und verlehmtten Sande sind mit 11 % in der BZE II relativ gut mit den Werten der BÜK (8 und 13 %) vergleichbar. Die Lösslehme sind in der BZE II mit 11 %, in der BÜK 1000 mit 9 und 11 % ebenfalls vergleichbar repräsentiert. Die Anteile der Tonschiefer-Standorte liegen in der ATKIS-BÜK Verschneidung unter den Verteilungen an den BZE-Punkten, die Granite und Grauwacken sind in der BÜK gegenüber der BZE II stärker vertreten. Dies wird durch den Sachverhalt erklärt, dass unterschiedliche Ausgangssubstrate in den BÜK 1000 Einheiten teilweise in einer Legendeneinheit zusammengefasst sind und diese Substrate in der BZE seltener vorkommen (z. B. Granit).

Zusammenfassend ergibt sich zwischen der BZE II und der BÜK 1000 für Sachsen-Anhalt hinsichtlich der Verteilung der Substratgruppen sowohl punkt- als auch flächenbezogen eine relativ gute Übereinstimmung und damit eine gute Repräsentativität des BZE II-Rasters. Abweichungen von wenigen Prozentpunkten können auf den bestehenden Unschärfen bei der Zuordnung der Substratgruppen zu den Legendeneinheiten der BÜK 1000 beruhen.

*Tabelle 4: Verteilung [%] der Substratgruppen in der BZE II nach BZE II-Koordinaten auf der BÜK 1000 und nach Flächen aus der Verschneidung mit ATKIS und BÜK 1000 (Basis Substratgruppen zugewiesen auf die BÜK-Legendeneinheiten; Grt: Granit, Grw: Grauwacke, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte; Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand; ToS: Tonschiefer)*

| Substratgruppe | BZE II<br>[%] | BÜK 1000 an den<br>BZE-Punkten<br>[%] | ATKIS-Verschneidung<br>mit BÜK 1000<br>[%] |
|----------------|---------------|---------------------------------------|--|
| Suv            | 53            | 48                                    | 47   |
| Ssv/Sve        | 11            | 8                                     | 13   |
| Loe            | 10            | 9                                     | 11   |
| ToS            | 9             | 9                                     | 6  |
| Leh            | 4             | 4                                     | 6  |
| Org            | 3             | 5                                     | 3  |
| Grw            | 3             | 4                                     | 6  |
| Grt            | 3             | 8                                     | 6  |
| andere         | 4             | 5                                     | 2  |

### 6.1.2 Vergleich BZE II und Standortskartierung

Für diesen Vergleich wird die Verteilung der Trophiestufen an den Profilen der BZE II unter Einbeziehung der Bodenchemie mit der Trophieeinschätzung der Forstlichen Standortskartierung (punkt- und flächenbezogen) gegenübergestellt.

Die prozentuale Verteilung der Trophiestufen aller Polygone der Standortskartierung in den Wäldern Sachsen-Anhalts (Landeszentrum Wald, Halberstadt, Stand 2017) ergibt mit 42 % den Schwerpunkt bei den mittleren, mesotrophen Standorten, gefolgt von den kräftigen, gut mesotrophen Standorten mit 28 % Anteil. Die schwach mesotrophen (ziemlich armen) Standorte liegen nach den Polygonen der Standortskartierung bei 18 %, die eutrophen (reich) und oligotroph (arm) bei jeweils 6 % (Tabelle 5, erste Spalte).

Tabelle 5: *Verteilung [%] der Trophiestufen gemäß der Standortkartierung der Waldfläche Sachsen-Anhalts, den Polygonen der Standortkartierung an den BZE II-Punkten sowie der Trophieeinschätzung an den BZE II-Punkten unter Berücksichtigung der BZE-Bodenchemie*

| Trophiestufe                       | Nach digitaler Standortkarte für Sachsen-Anhalt [%]* | Trophiestufen nach der Standortkarte an den BZE-Punkten** [%] | Trophieeinschätzung an BZE-Punkten mit BZE-Bodenchemie [%] |
|------------------------------------|--|---|--|
| R-reich (eutroph)                  | 6  | 3   | 16   |
| K-kräftig (gut mesotroph)          | 28   | 32  | 20   |
| M-mittel (mesotroph)               | 42   | 42  | 23   |
| Z-ziemlich arm (schwach mesotroph) | 18   | 16  | 38   |
| A-arm (oligotroph)                 | 6  | 7   | 3  |

\* Flächenanteile in %; Auswertung der digitalen Standortkarte; Datensatz (2017)

\*\* nach digitaler Standortkarte (Lage im Polygon); Stand 2017; relative Häufigkeiten in %

Diese Verteilung wird mit den BZE-Punkten in Sachsen-Anhalt gut getroffen, wenn jeweils die Trophiestufe desjenigen Polygons zugrunde gelegt wird, in dem der BZE-Punkt liegt (Tabelle 5, mittlere Spalte). Damit repräsentiert die Verteilung der BZE-Punkte die Verteilung der Trophiestufen in Sachsen-Anhalts Wäldern sehr gut.

Wird dagegen die Verteilung der Trophiestufen an den BZE-Punkten unter Berücksichtigung der bodenchemischen Analyseergebnisse gegenübergestellt, ergibt sich eine sehr abweichende Verteilung (Tabelle 5, Spalte 3): Der Schwerpunkt liegt nun bei den schwach mesotrophen, ziemlich armen Standorten mit 38 %. Die mittleren, mesotrophen Standorte erreichen lediglich 23 % und liegen damit 19 %-Punkte unter den Werten nach der Standortkartierung. Auch die gut mesotrophen Standorte sind bei Berücksichtigung der Bodenchemie mit 20 % deutlich geringer vertreten. Die Einstufung eutroph wurde mit den Analysedaten der BZE II viel häufiger vergeben, die Anteile stiegen auf 16 %.

Die Verteilung der Calciumvorräte an den Trophiestufen der BZE II und der Standortkartierung belegt diesen Sachverhalt beispielhaft (s. Abb. 19). Bei der Standortkartierung decken die vorkommenden Calciumvorräte vor allem im gut mesotrophen und mesotrophen Bereich fast alle vorkommenden Bewertungsbereiche ab. Die Balken selber schneiden mit 50 % aller vorkommenden Calciumvorräte drei Bewertungsbereiche. Die Verteilungen der BZE II sind wesentlich enger. Die Balken schneiden maximal zwei Bewertungsbereiche und die Verteilungen sind deutlich enger. Im gut mesotrophen Bereich der Standortkartierung liegen viele BZE-Punkte dem Calciumvorrat nach deutlich im eutrophen, aber auch im mittelhohen und mittleren Bereich. Im mesotrophen Bereich der Standortkartierung liegt der Median schon im gering-mittleren Bereich, viele BZE-Punkte sind in ihrer Trophieeinschätzung hinsichtlich Calcium überschätzt. Entsprechend höher liegt der

Median bei der BZE II im mesotrophen und niedriger im schwach mesotrophen Bewertungsbereich.

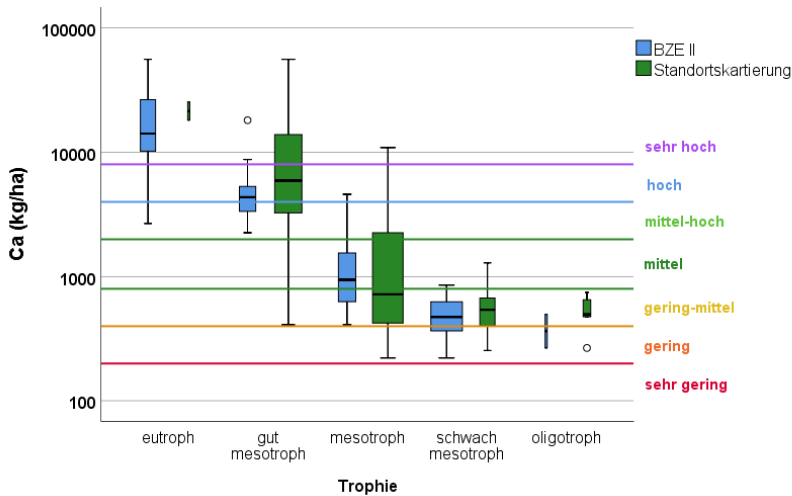


Abbildung 19: Calciumvorräte [kg/ha, logarithmierte Darstellung] an den BZE II-Punkten (Anlagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe) nach Trophiestufen der BZE II und Standortskartierung; die Balkenbreite symbolisiert die Anzahl. Als horizontale Linien sind die Bewertungsbereiche für Calcium nach der AK STANDORTSKARTIERUNG (2003) angegeben.

Zusammenfassend ergibt sich aus dem Vergleich der Trophiestufen Standortskartierung versus BZE II, dass häufig mittlere Standorte in der Standortskartierung mit ihren Nährstoffvorräten überschätzt und bessere Standorte unterschätzt wurden. Die Einbeziehung der Bodenchemie in die Trophieeinschätzung ermöglicht grundsätzlich eine gesicherte Differenzierung der Trophiestufen. Insbesondere der höhere Anteil mesotropher Standorte nach der digitalen Standortskarte differenziert sich unter Einbeziehung bodenchemischer Kenngrößen deutlich feiner, was in der BZE II zu einer Umverteilung von mesotrophen zu schwach mesotrophen Standorten führt. Die Absicherung, Überprüfung und Korrektur der Geländeeinschätzung in der Standortskartierung durch bodenchemische Untersuchungen erweist sich als sehr sinnvoll, was auch durch die höheren Anteile eutropher Standorte bei der BZE II im Vergleich zur Standortskartierung gut erkennbar wird.

## 6.2 Bodenmorphologische Kenngrößen

*Jan Evers, Uwe Paar, Jörg Weymar*

Eine Zielsetzung im Rahmen der Analyse der BZE II für die Trägerländer der NW-FVA ist es, länderübergreifend Muster zur zeitlichen Veränderung von bodenchemischen Kennwerten aufzuzeigen. Als länderübergreifende Stratifizierungseinheiten wurden daher Substratgruppen und Substrat-Lagerungstypen generiert. Zudem wurde eine Synopse der Hauptmerkmale der Forstlichen Standortkartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer erarbeitet (SCHMIDT et al. 2015). Die Überprüfung der Trophieeinstufungen mit metrischen Größen (z. B. Basenvorräte) anhand der BZE II-Ergebnisse ist bereits erfolgt und wurde gesondert veröffentlicht (EVERS et al. 2013a, EVERS u. PAAR 2013).

### 6.2.1 Substratgruppen

Durch eine Expertengruppe, bestehend aus Bodenkundlern und erfahrenen Standortkartierern, wurde jedem der 388 BZE-Punkte (Niedersachsen, Bremen, Hessen und Sachsen-Anhalt) eine Substratgruppe zugeordnet (EVERS et al. 2013b). Die Einteilung der länderübergreifenden Substratgruppen erfolgte nach den Merkmalen Ausgangssubstrat (Ausgangsgestein), Lagerung (Substrat-Lagerung), Bodenart, Bodenmorphologie und Bodenphysik. Insgesamt werden 16 Substratgruppen unterschieden (s. Tab. 6).

*Tabelle 6: Beschreibung der Substratgruppen der nordwestdeutschen Bundesländer nach EVERS et al. 2013b*

| Substratgruppe          | Substrate  | Kriterien/Merkmale/Herkunft   |
|-------------------------|--|---|
| Buntsandstein           | reine Sande bis schluffig, lehmige Sande, tlw. mit Tonsteinwechsellagerung                       | kalkfreie Buntsandsteinformationen  |
| Lösslehm                | feinsandig lehmige Schluffe bis schluffig-schwach tonige Lehme                                   | Mächtigkeit > 70 cm (auch Kolluvien); über silikatarmem oder -reichem Ausgangssubstrat; Pleistozän und tlw. Holozän                           |
| Basalt/Diabas           | überwiegend schluffige Lehme   | silikatreiche tertiäre Ergussgesteine und devonische Diabase  |
| Tonschiefer             | überwiegend lehmige Tone   | z. B. devonische Schieferformationen, Hunsrückschiefer  |
| unverlehnte Sande       | Sande und Kiese, Reinsande, schwach schluffige Sande, geringmächtige schluffige Bänder toleriert | Flugsande, Talsande; Wasserabsätze; Rheinweiß- (Kalk) und Flugaschenstandorte; Mergelsande und -kiese; Pleistozän und Holozän                 |
| schwach verlehnte Sande | schwach lehmige Sande, schluffige Sande  | Geschiebedecksande, Sandlöße; Wasserabsätze > 20 cm Rheinweiß- (Kalk) und Flugaschenstandorte, Mergelsande und -kiese; Pleistozän und Holozän |



| Substratgruppe               | Substrate   | Kriterien/Merkmale/Herkunft   |
|------------------------------|---|---|
| verlehnte Sande              | verlehnte Sande, schluffige Sande, tonige Sande       | Geschiebedecksande, Lösssande; Wasserabsätze > 50 cm<br>Rheinweiß- (Kalk) und Flugaschenstandorte, Mergelsande und -kiese; Pleistozän und Holozän |
| Grauwacke                    | sandige bis tonige Lehme                              | z. B. unterkarbonische Grauwacken, Kulmgrauwacken   |
| Ton(stein)                   | sandige, schluffige, lehmige Tone bis reine Tone      | Röt, tertiäre Tone, Marschen, Beckenablagerungen; hier werden auch schluffige Feinsande toleriert   |
| Kalkstein                    | überwiegend lehmige Tone bis tonige, schluffige Lehme | z. B. Muschelkalk, Keuper, Jura, Geschiebemergel, Kalkgehalt mindestens c4 (carbonatreich)  |
| Lehm                         | stark lehmige Sande bis tonige Lehme                  | Hochflutlehme, Auenlehme, Geschiebelehme; Pleistozän und Holozän  |
| Quarzit                      | schluffige Lehme; sandige, tonige Schluffe            | devonische Quarzite   |
| Zechstein/<br>Rotliegendes   | verlehnte Sande bis tonige Lehme                      | Perm: Dolomite, Kalksteine bzw. Sandsteine, Konglomerate  |
| Granit                       | grusig, sandig, schluffige Lehme                      | Plutonite   |
| Kreidesandstein              | schwach verlehnte bis verlehnte Sande                 | z. B. Hilssandstein, untere Kreidezeit  |
| organisch geprägte Standorte | organisch geprägte Standorte über diversen Substraten | Hochmoortorf, Niedermoortorf, Übergangsmoor bis Quellmoor, auch Anmoor; Spätpleistozän und Holozän  |

In Sachsen-Anhalt kommen an den 76 BZE-Punkten der BZE II 13 der für Nordwestdeutschland insgesamt nach EVERS et al. (2013b) definierten 16 Substratgruppen vor. Für 39 BZE-Punkte (51 %) wurde die Substratgruppe unverlehnte Sande ausgewiesen. An 8 (11 %) BZE-Punkten ist standörtlich der Lösslehm bestimmend. Bei 7 BZE-Punkten (9 %) bildet Tonschiefer das Ausgangssubstrat. Es folgen die Substratgruppen schwach verlehnter Sand (5 BZE-Punkte, 7 %) und verlehnter Sand (4 BZE-Punkte, 5 %) sowie Lehm (3 BZE-Punkte, 4 %). Mit nur noch jeweils 2 BZE-Punkten sind die Substratgruppen organisch geprägte Standorte (v. a. ehemalige Moore), Grauwacke und Granit vertreten (insgesamt 8 %). Vereinzelt mit jeweils einem BZE-Punkt treten noch die Substratgruppen Grauwacke, Kreidesandstein, Quarz und Zechstein mit insgesamt 5 % Anteil auf (s. Abb. 20).

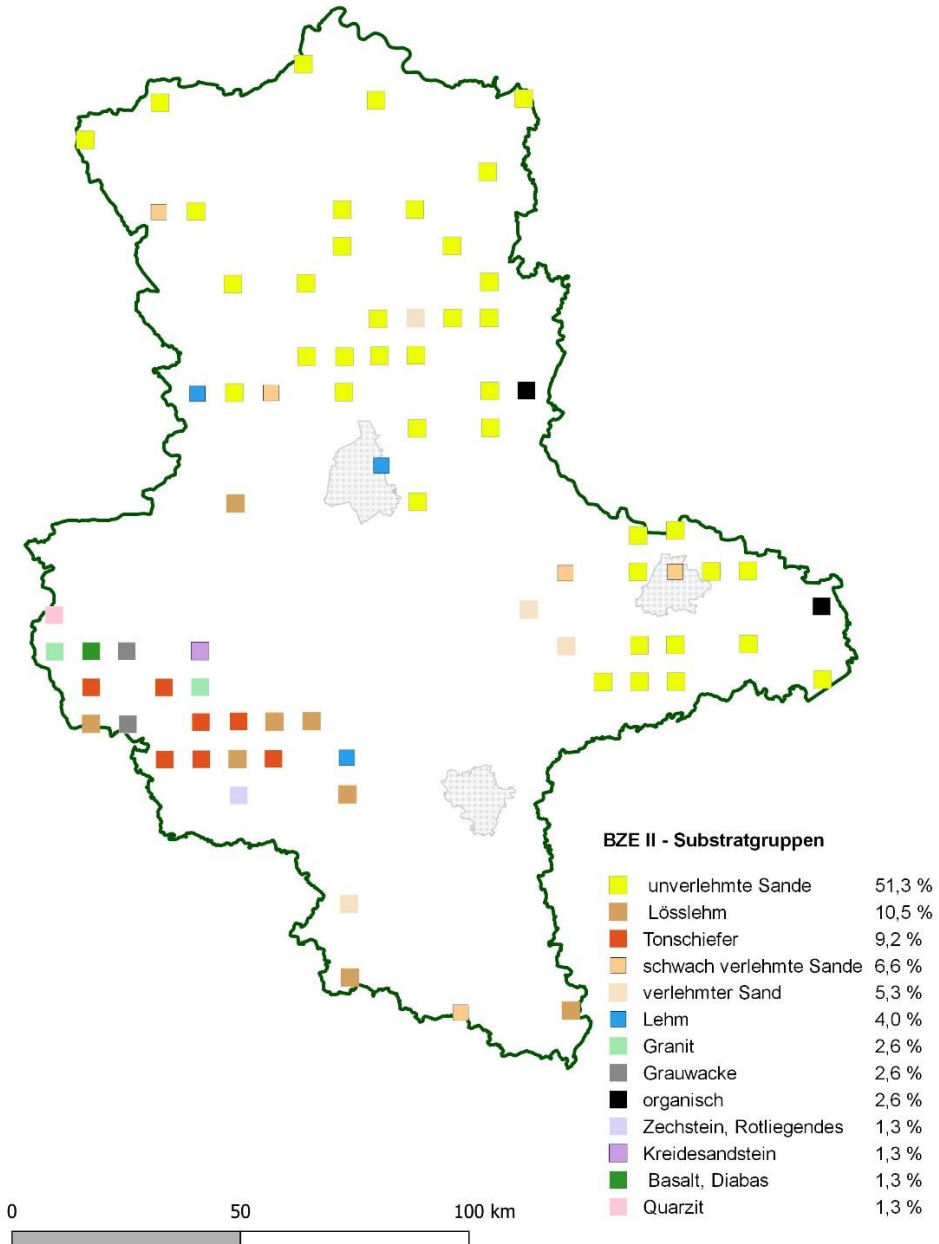


Abbildung 20: Zuordnung der 76 sachsen-anhaltischen BZE II-Punkte zu den Substratgruppen

Die Standorte der unverlehmtten Sande liegen alle im sachsen-anhaltischen Tiefland. Dort befinden sich auch die beiden ehemaligen Moore sowie überwiegend die schwach verlehmtten und verlehmtten Sande sowie die Lehmstandorte. Diese Substratgruppen repräsentieren die für diese Region typischen glazialen und fluvioglazialen Ablagerungen der letzten Eiszeiten mit pleistozänen Decken von Grund- und Endmoränen, Sandern und Talsanden, überwiegend aus der Warthevereisung. Damit gehört das Tiefland zum Altmoränengebiet und ist im Unterschied zur Jungmoräne durch intensiver verwitterte und stärker eingeebnete, eher nährstoffarme, sandige Böden geprägt (SCHWANECKE u. KOPP 1994).

Die in der BZE II vertretenen Festgesteine wie z. B. Tonschiefer, Diabas, Grauwacke, Quarzit und Granit liegen alle im Harz in der Standortsregion Mittelgebirge. In dem schmalen, zur sachsen-anhaltischen Mittelgebirgsregion gehörenden Kyffhäuser entfiel kein Punkt des BZE II-Rasters.

Die zwischen dem Mittelgebirge und Tiefland liegenden BZE-Punkte in der Standortsregion des Hügellandes sind vom Lösslehm und Lehmen geprägt, vereinzelt finden sich auch Sande unterschiedlichen Verlehmungsgrades. Aufgrund der geringen Bewaldung dieses überwiegend landwirtschaftlich genutzten Gebietes hat diese Standortsregion die geringste Anzahl an BZE-Punkten.

### 6.2.2 Bodentypen

Bodentypen unterscheiden sich nach charakteristischen Horizonten und Horizontfolgen, die spezifische pedogene Prozesse in den Ober- und Unterbodenhorizonten widerspiegeln (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Bodentypen lassen sich nach qualitativen Kriterien in Subtypen mit spezifischer Horizontabfolge untergliedern. Es werden drei Arten von Subtypen unterschieden:

- Normsubtyp
- Abweichungssubtyp
- Übergangssubtyp

Der Normsubtyp wird durch eine charakteristische Horizontabfolge gekennzeichnet, die der regulären Horizontabfolge des Typs entspricht. Abweichungstypen müssen prinzipiell die Horizonte des Typs (bzw. des Normsubtyps) aufweisen, besitzen jedoch zusätzliche abweichende Merkmale. Bei Übergangstypen treten stark ausgeprägte Merkmale anderer Typen hinzu. Zur Bezeichnung von Übergängen können die Namen zweier Typen bzw. eines Typs und eines Abweichungstyps kombiniert werden, wobei der zuletzt genannte die Zuordnung bestimmt. Für die Auswertung wurde der Bodentyp je BZE-Profil auf der Basis der Subtyp-Informationen ggf. bis zur Varietät abgeleitet.

Bei den sachsen-anhaltischen Waldstandorten dominiert mit Abstand der Bodentyp der Braunerde. Insgesamt 59 % der vorkommenden Böden der BZE II in

Sachsen-Anhalt entfallen auf diesen Bodentyp (siehe Abb. 21). Im Tiefland und Mittelgebirge sind jeweils rund zwei Drittel aller Bodentypen der BZE II-Punkte Braunerden, im Hügelland rund 20 %. Vereinzelt sind Podsol-, Gley-, Pseudogley- und Parabraunerde-Braunerden angesprochen worden, doch nur die Podsol-Braunerden kommen im Tiefland häufiger vor. Parabraunerden sind in Sachsen-Anhalts Wäldern mit 10 % vertreten. Sie stellen im Hügelland den am häufigsten vorkommenden Bodentyp und sind mit 2 BZE-Punkten auch im Mittelgebirge vertreten. Podsole (9 %) sind neben den Braunerden im Tiefland typisch, ein Podsol liegt im Harz. Mit 7 % Anteilen in der BZE II sind Pseudogleye ausgewiesen. Dieser Bodentyp kommt in allen drei Wuchsregionen vereinzelt vor. Weitere vorkommende Bodentypen sind Vega-Gleye, Moore, Ranker, Regosole, Fahlerden und ein Tschernosem, die aber mit jeweils 1–3 Punkten in der BZE II Sachsen-Anhalt eher selten sind.

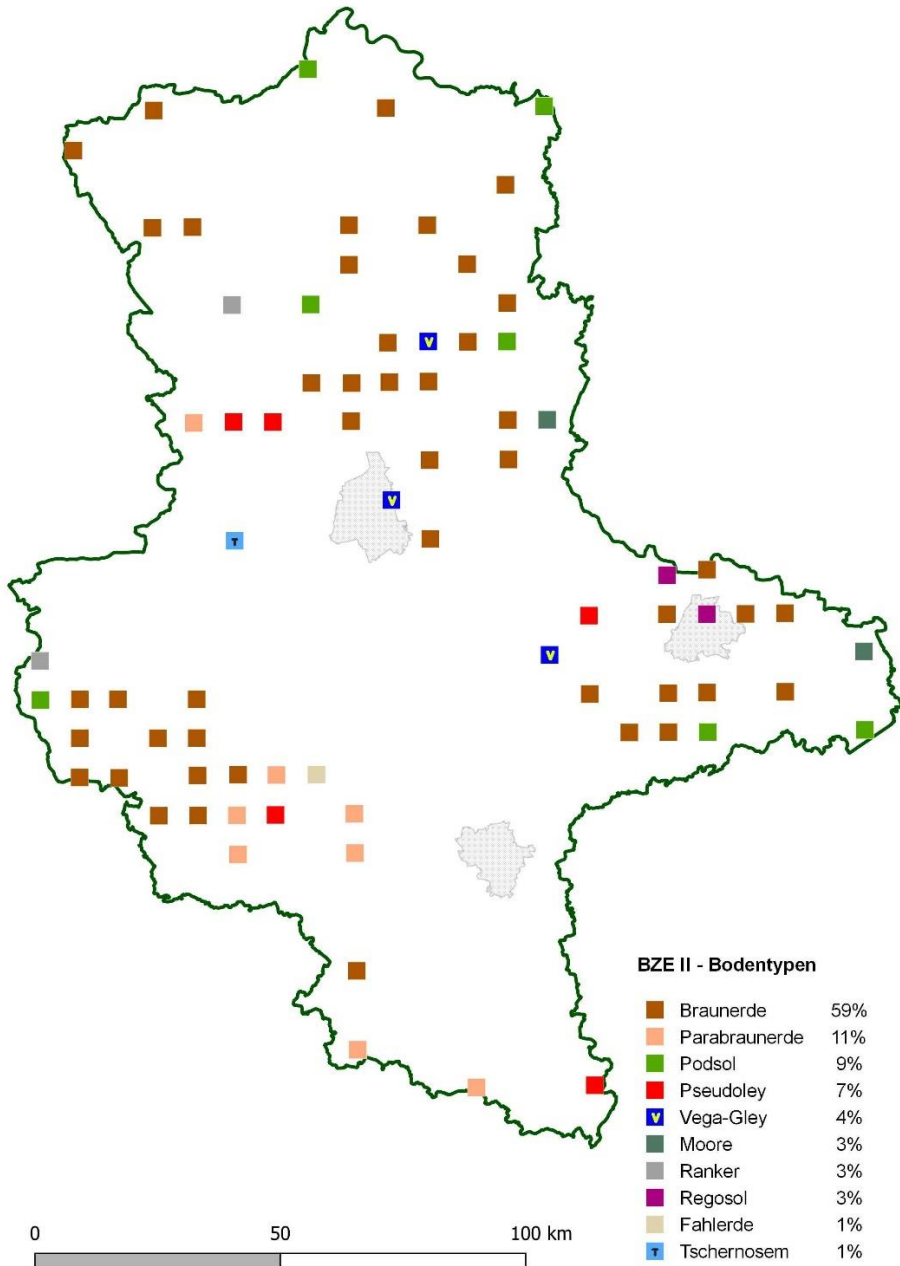


Abbildung 21: Bodentypen der BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt (BZE II)

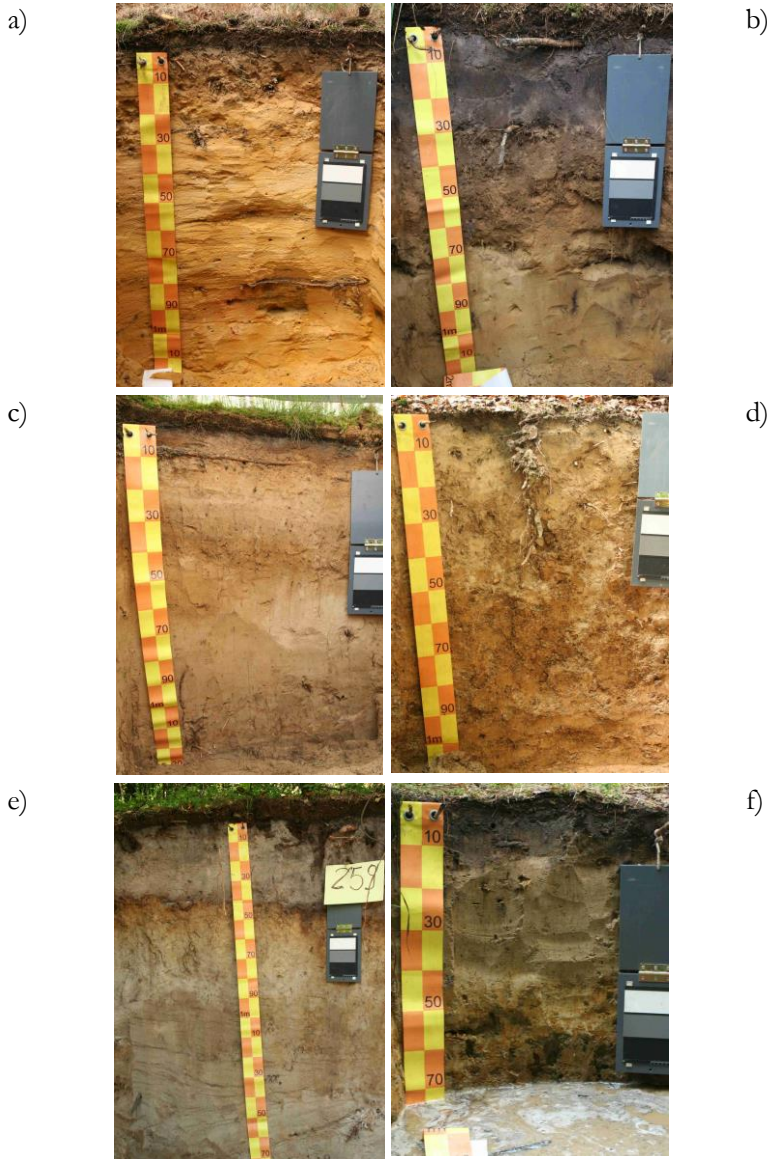


Abbildung 22: Die häufigsten Bodentypen in Sachsen-Anhalt: Braunerde aus Feinsand (Sandstein aus der Oberkreide) (a), Podsol-Braunerde aus Schmelzwasserablagerungen (b), Braunerde aus Terrassen-Flussablagerungen (c), Parabraunerde aus Lösslehm (d), Podsol aus Geschiebedecksand (e), Pseudogley (Fahlerde-Pseudogley) aus Geschiebedecklehm über Moränenablagerungen (f)

### 6.2.2.1 *Bodentypen nach Substratgruppen*

Ordnet man das Vorkommen von Bodentypen den Substratgruppen zu, so zeigen sich die folgenden Ergebnisse:

Auf 77 % der BZE-Standorte mit unverlehmtem Sand als Substratgruppe sind Braunerden ausgebildet. Weitere 15 % der Standorte dieser Substratgruppe sind durch Podsole gekennzeichnet, ansonsten gibt es noch vereinzelt jeweils einen Pseudogley, einen Ranker und einen Regosol.

In der Substratgruppe Lösslehm dominiert mit 50 % die Parabraunerde, zu jeweils gleichen Teilen gibt es noch Braunerde, Pseudogley, Fahlerde und Schwarzerde als Bodentyp.

Die Substratgruppe Tonschiefer wird durch überwiegend Braunerden geprägt.

In den weiteren Substratgruppen überwiegen insgesamt die Braunerden; es kommt jeweils in diesen Substratgruppen kein Bodentyp auffallend gehäuft vor.

### 6.2.3 *Humusformen*

Als Humus bezeichnet man die zersetzten und umgeformten Bodenbestandteile pflanzlicher oder tierischer Herkunft. Die organische Substanz kann als Auflagehumus (Humusdecke) dem Mineralboden aufliegen oder im mineralischen Boden verteilt sein. Die Humusdecke lässt sich in die Streulage (L), die Vermoderungslage (Of) und die Humifizierungslage (Oh) unterteilen (HOFMEISTER 2004). Humusformen, die noch keinen durchgehenden Oh mit mehr als 5 mm Mächtigkeit entwickelt haben, heißen Mineralbodenhumusformen. Alle Humusformen, die einen Oh-Horizont mit mehr als 5 mm besitzen, werden als Auflagehumusformen bezeichnet (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003).

Die Einordnung der Humusform erfolgte in Anlehnung an die Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005). Die Humusform wurde an den acht Satellitenpunkten pro BZE-Punkt erhoben. Auf der Basis dieser Einzelerhebungen wurde für jeden BZE-Punkt eine dominante Humusform abgeleitet. Die Aufnahme erfolgte auf der Ebene Subtyp und Varietät (WELLBROCK et al. 2006, s. Tab. 7).

#### 6.2.3.1 *Verteilungen der Humusformen*

Insgesamt 24 % der sachsen-anhaltischen BZE II-Punkte weisen den Humustyp Mull auf, wobei der Typische Mull auf 6 und der F-Mull auf 16 Punkten vorkamen.

Moder-Standorte haben mit Abstand den größten Anteil mit insgesamt 68 % in Sachsen-Anhalts Wäldern. Davon hat der Graswurzelfilzmoder als Subtyp mit 21 % den höchsten Anteil. Diese Humusform findet sich nur im Tiefland Sachsen-Anhalts (siehe Abb. 23). Es folgt der Typische Moder als Subtyp des Moders mit insgesamt 27 %, wobei die Varietäten feinhumusarmer und feinhumusreicher Moder ungefähr

zu gleichen Anteilen vertreten sind. Mit 16 % Anteilen kommt im Humustyp Moder noch der Subtyp rohhumusartiger Moder in den Varietäten feinhumusreich (11 %) und feinhumusarm (5 %) noch relativ häufig vor. Diese Humusform befindet sich bereits im Übergang zum Humustyp Rohhumus, ist biologisch aber noch aktiver. Der Mullartige Moder als Subtyp im Moder ist mit 4 % vertreten. Diese Humusform kennzeichnet bereits bessere Zersetzungsbedingungen im Übergang zum Mull.

Die ungünstigsten Humusformen im Rohhumus (Subtyp Typischer Rohhumus in den Varietäten feinhumusarm und feinhumusreich) sind in der BZE II in Sachsen-Anhalt auf nur 2 % der ausgeprägt (s. Abb. 23).

In der BZE II kommen noch ein Feuchtmoder, ein Feuchtrohhumus und zwei Standorte mit nicht klassifizierbaren Humusformen vor (ein Erdniedermoor und eine Erstaufforstung).

Gegenüber der Humustypverteilung der BZE II mit 24 % Mull, 68 % Moder und 3 % Rohhumus sowie 5 % anderen Humusformen war die Verteilung zum Zeitpunkt der BZE I deutlich abweichend: Auf den Humustyp Mull entfielen lediglich 8 %, den Moder 58 % und Rohhumus 28 % (andere 6 %). Damit zeigt sich eine deutlich qualitative Verbesserung der Humusformen hin zu den günstigeren Humusformen Moder und Mull.



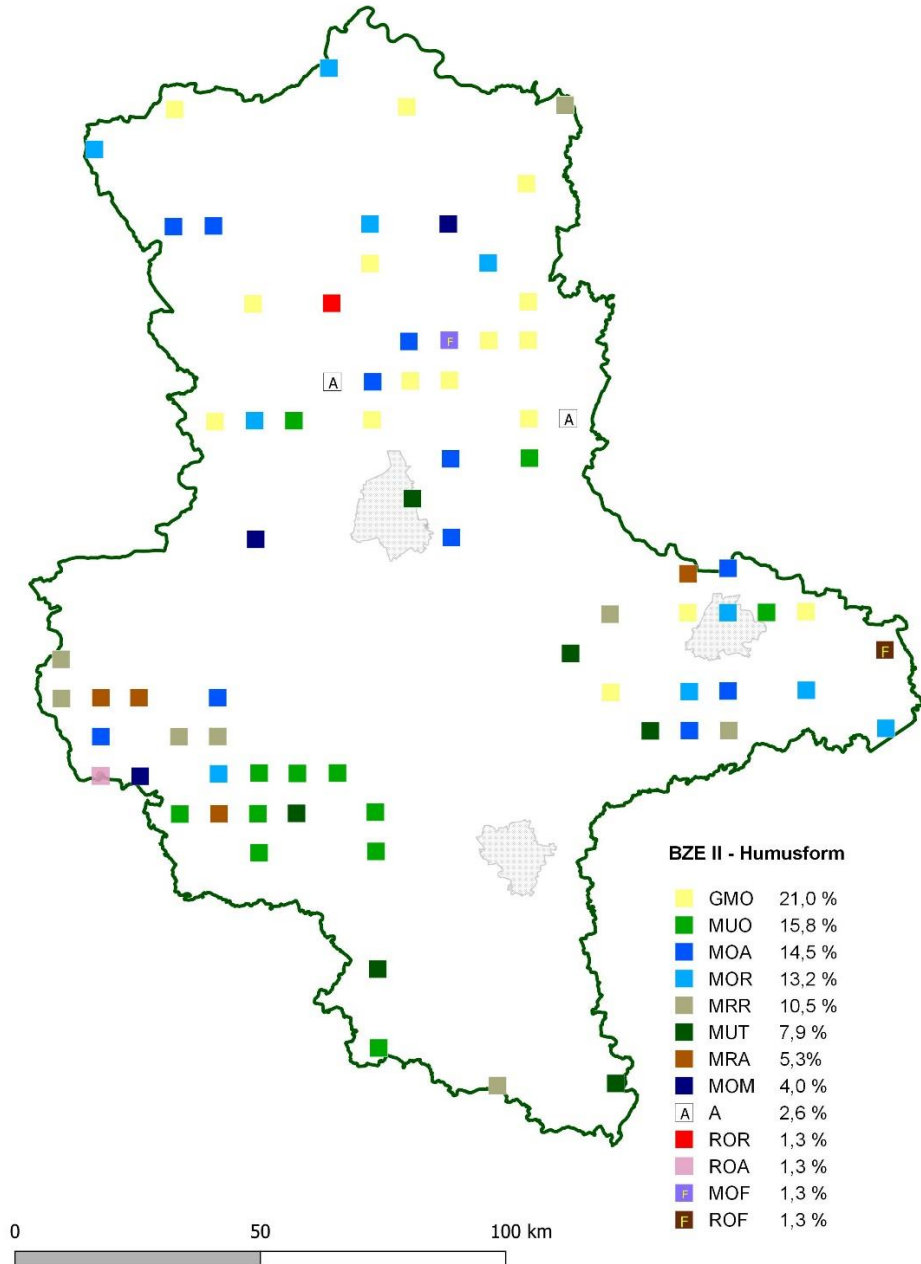


Abbildung 23: Humusform der BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt (BZE II), Abkürzungen der Humusformen s. Tab. 7

Bei dem Vergleich nur der BZE-Punkte, bei denen sowohl bei der BZE I als auch bei der BZE II ein Humustyp angesprochen wurde ( $n=62$ ), zeigt sich die in Abb. 24 dargestellte Entwicklung:

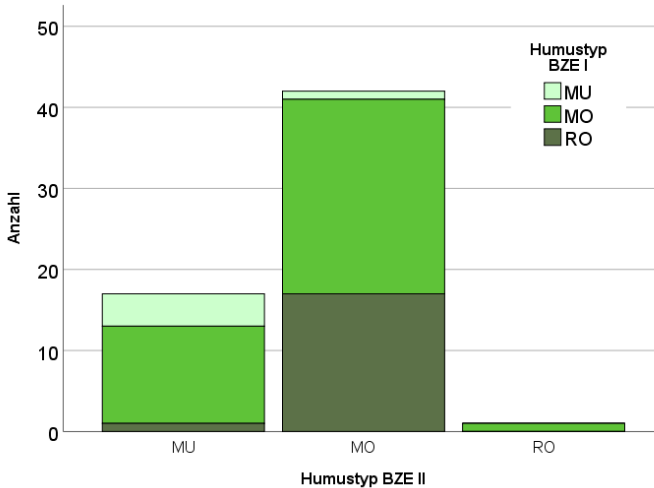


Abbildung 24: Humusform der BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt (BZE II), Abkürzungen der Humusformen s. Tab. 7

Die BZE-Punkte, die zum Zeitpunkt der BZE I als Rohhumus angesprochen wurden, entwickelten sich zum Zeitpunkt der BZE II zu Moderhumusformen. Ebenso veränderten sich die damaligen Moderhumusformen in vielen Fällen zum Mull. Verschlechtert haben sich dagegen nur 2 Standorte, ein Standort von Mull zu Moder und einer vom Moder zum Rohhumus.

Die Flugascheinträge hatten keinen erkennbaren Einfluss auf die Verteilung des Humustyps. Im unverlehmten Sand ergab sich in der BZE II unter Flugascheinfluss eine ähnliche Verteilung des Humustyps (Mull 8 %, Moder 92 %, Rohhumus 0 %) wie bei den Standorten des unverlehmten Sandes, die nicht von Flugasche beeinflusst sind (Mull 8 %, Moder 88 %, Rohhumus 4 %). Allerdings wurden in der BZE II deutlich weniger Graswurzelfilzmoder auf Flugasche beeinflussten Standorten (18 % der Moder) des unverlehmten Sandes gefunden als bei von Flugasche unbeeinflussten Standorten (52 % der Moder).

Detailliertere Auswertungen zur zeitlichen Entwicklung auf Ebene des Humussubtyps oder der -varietät zwischen der BZE I und II sind schwierig, da die Humusformansprache in der BZE I nur bedingt mit der der BZE II vergleichbar ist. Der häufigste Subtyp Graswurzelfilzmoder in der BZE II bestand z. B. noch nicht bei der Ansprache in der BZE I. Ein Vergleich der Verteilungen des Humussubtyps zwischen der BZE I und II ist schon aus diesem Grund wenig aussagekräftig.

Tabelle 7: Humusformen (nach WELLBROCK et al. 2006), Legende zu Abb. 23

| Typ   | Subtyp        | Varietät   | BZE I                  | Bedeutung              | Bemerkung                    |           |
|---|---------------|------------|------------------------|------------------------|------------------------------|-----------|
|   | Kürzel BZE II |            |                        |                        |                              |           |
| <b>Aeromorphe Humusformen</b>   |               |            |                        |                        |                              |           |
| MU  | MUT           |            | mu, mup, muk,<br>muw   | Mull<br>Typischer Mull | Ah basenreich                |           |
|   | MUO           |            | muf, mus               | F-Mull                 |                              |           |
| MO  | MOM           | MOA<br>MOR | mou                    | Mullartiger Moder      | Oh locker, bröckelig         |           |
|   | MOT           |            | mot                    | Typischer Moder        |                              |           |
|   | GMO           |            | mota                   | - feinhumusarm         |                              | Oh < 2 cm |
|   |               |            | motr                   | - feinhumusreich       |                              | Oh ≥ 2 cm |
|   | TA            | MRA<br>MRR | SHGM                   | Graswurzelfilzmoder    | Sonderform                   |           |
|   | MR            |            | ta                     | Tangel                 | Oh unscharf,<br>brechbar     |           |
|   |               |            | mor                    | Rohhumusartiger Moder  |                              |           |
| RO  | ROT           | ROA<br>ROR | rot                    | Rohhumus               | Oh scharfkantig,<br>brechbar |           |
|   |               |            | rota                   | Typischer Rohhumus     |                              | Oh < 4 cm |
|   | HMO<br>SRO    | ror        | - feinhumusarm         | Oh ≥ 4 cm              |                              |           |
|   |               | SHHA, SHMO | Hagerhumus             | Sonderform             |                              |           |
|   |               | SHRO       | Streunutzungs-Rohhumus | Sonderform             |                              |           |
| <b>Hydromorphe Humusformen</b><br>(L-, Of-, Oh-Horizonte schmierig feucht, A-Horizonte hydromorph (Sw-Ah, Go-Ah)) |               |            |                        |                        |                              |           |
| MUF   |               |            | amu                    | Feuchtmull             | Aa-Horizont,<br>Oh fehlend   |           |
| MOF   |               |            | amo                    | Feuchtmoder            |                              |           |
| ROF   |               |            | aro                    | Feuchtrohumus          |                              |           |
| AMO   |               |            | am                     | Anmoor                 |                              |           |
| NA = Nicht angesprochen (Humusform konnte nicht bestimmt werden)  |               |            |                        |                        |                              |           |
| A = Andere (nicht zu kategorisierende Humusform)  |               |            |                        |                        |                              |           |

### 6.2.3.2 Trockenmasse im Auflagehumus

Die durchschnittliche Trockenmasse des Auflagehumus für alle BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt hat sich von 47,5 t/ha bei der BZE I rechnerisch um 28,5 t/ha auf 71,6 t/ha erhöht (s. Tab. 8). Da in Sachsen-Anhalt 11 BZE-Punkte im BZE II-Raster gegenüber der BZE I hinzukamen, basiert diese rechnerische Differenz auf unterschiedlichen Kollektiven von BZE-Punkten. Exakter für die Beschreibung von Veränderungen der Trockenmasse im Auflagehumus sind die Differenzen nur der BZE-Punkte, die auch in beiden Erhebungen beprobt wurden. Diese Differenz ist in Tabelle 8 angegeben und weist immerhin noch eine Zunahme von 18,0 t/ha im Mittel auf. Die hohen Standardabweichungen spiegeln die weiten Spannen der Trockenmassen im Auflagehumus vom Mull zum Rohhumus der BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt wider. Der wesentlich geringere Standardfehler zeigt jedoch, dass der jeweilige Mittelwert als relativ gut belastbar angesehen werden kann. Sowohl die Unterschiede zwischen den Mittelwerten (t-Test) als auch Medianen (Wilcoxon Test) waren signifikant.

Die C/N-Verhältnisse nahmen von der BZE I zur BZE II in den Humustypen Mull, Moder und Rohhumus zu, blieben aber mit Werten zwischen 20–25 im mäßig weiten Bewertungsbereich (s. Tab. 8a). Nur beim Rohhumus wurden in der BZE II weite mittlere C/N-Verhältnisse mit 28 festgestellt. Auch die mittleren C/P-Verhältnisse der genannten Humustypen erhöhten sich von der BZE I zur BZE II und bewegen sich zwischen 300 und 600 im mittleren bis mäßig weiten Bewertungsbereich (nach AK STANDORTSKARTIERUNG 2016). Signifikante Unterschiede ergaben sich im jeweiligen Gesamtergebnis und beim Humustyp Moder sowie beim C/P-Verhältnis im Mull.

Tabelle 8: Durchschnittliche Trockenmasse des Auflagehumus bei der BZE I und II in Sachsen-Anhalt sowie Veränderungen [t/ha], \*\*\*signifikant auf dem 0,1 % Signifikanzniveau

| Trockenmasse des Auflagehumus |        | BZE I | BZE II | Differenz<br>(nur gepaarte Stichprobe) | p   |
|-------------------------------|--------|-------|--------|--|-----|
| insgesamt                     | Mittel | 47,5  | 71,6   | 18,0                                   | *** |
|                               | Median | 42,5  | 71,2   | 18,4                                   | *** |
|                               | n      | 64    | 76     | 62                                     |     |
|                               | SE     | 4,5   | 6,3    | 4,8                                    |     |
|                               | SD     | 35,7  | 54,9   | 37,64                                  |     |

n = Anzahl, SE = Standardfehler des Mittelwertes, SD = Standardabweichung des Mittelwertes

*Tabelle 8a: C/N- und C/P-Verhältnisse im Auflagehumus der BZE I und II nach Humustyp in Sachsen-Anhalt (n=Anzahl, fett = signifikante Unterschiede auf 5 % Signifikanzniveau, Mann-Whitney U-Test)*

|            | Mull<br>(n)     | Moder<br>(n)    | Rohhumus<br>(n) | Andere<br>(n) | Gesamt<br>(n)   |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| C/N BZE I  | 22 (5)          | <b>21</b> (38)  | 23 (18)         | 22 (1)        | <b>21</b> (62)  |
| C/N BZE II | 25 (18)         | <b>24</b> (52)  | 28 (2)          | 20 (4)        | <b>24</b> (76)  |
| C/P BZE I  | <b>303</b> (5)  | <b>322</b> (37) | 477 (18)        | 501 (1)       | <b>369</b> (61) |
| C/P BZE II | <b>400</b> (18) | <b>471</b> (52) | 581 (2)         | 316 (4)       | <b>449</b> (76) |

Die Trockenmasse im Auflagehumus wird i. d. R. von der Baumartenzusammensetzung der jeweiligen Bestände (Bestandestyp) beeinflusst. Mit zunehmendem Anteil von Nadelholz erhöht sich die Trockenmasse (s. Abb. 25): In den von Laubholz bestimmten Bestandestypen Buche, Eiche und sonstiges Laubholz (z. B. Birke, Erle, Roteiche, Ahorn oder Esche) liegen die durchschnittlichen Trockenmassen des Auflagehumus bei der BZE II überwiegend zwischen 20 und 50 t/ha. In den von Nadelholz bestimmten Bestandestypen Kiefer und Fichte dagegen zwischen 80 und 90 t/ha.

Die Trockenmassen im Auflagehumus sind in den Substratgruppen sehr unterschiedlich (s. Abb. 26). Die geringsten Auflagen finden sich auf den besser versorgten Standorten des Lösslehms (Loe) mit durchschnittlich 23 t/ha. Es folgt die Substratgruppe Tonschiefer (ToS) mit 48 t/ha, diese BZE-Punkte liegen im Harz mit teilweiser Fichtenbestockung und mächtigeren Moder-Humusformen. Es gibt unter den Tonschiefer-Standorten jedoch auch F-Mull mit geringeren Aufagemächtigkeiten. Die Auflagen mit der höchsten Trockenmasse finden sich in Sachsen-Anhalt jedoch im Tiefland überwiegend unter Kiefer bei den (un)verlehmten und schwach verlehmten Sanden mit Trockenmassen zwischen 60 und 100 t/ha.

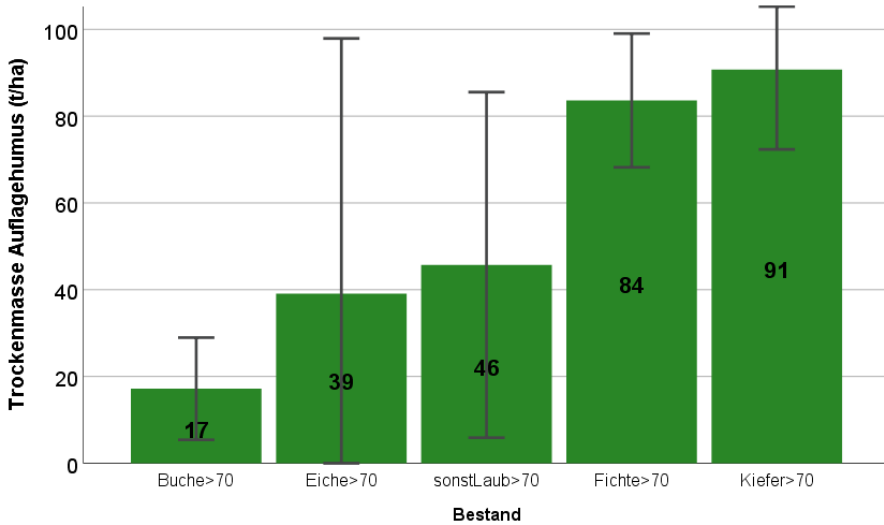


Abbildung 25: Trockenmasse im Auflagehumus [t/ha] bei der BZE II in Sachsen-Anhalt nach Bestandestypen (mit  $n > 3$  je Typ, eingeblendet sind die Konfidenzintervalle)

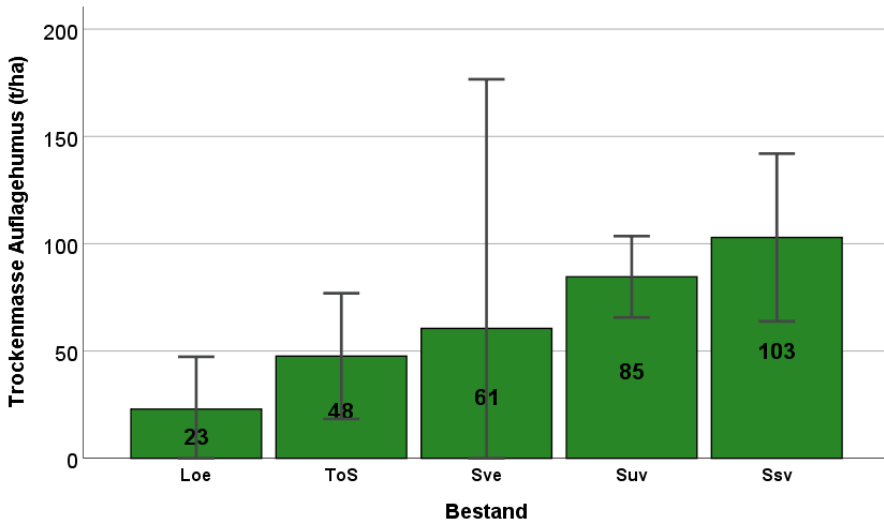


Abbildung 26: Trockenmasse im Auflagehumus [t/ha] bei der BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen mit  $n > 3$  (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

### 6.3 Bodenphysikalische Kenngrößen

*Jan Evers, Uwe Paar*

Eine zentrale Größe für die Bewertung der Ergebnisse der BZE II ist der jeweilige Elementvorrat im Auflagehumus und Mineralboden von Wäldern. So spielen z. B. der Kohlenstoffvorrat und seine Veränderung eine wichtige Rolle im Klimaschutz. Die Vorräte der wichtigsten Nährelemente im Mineralboden und ihre Veränderung sind außerdem wichtige Indikatoren einer nachhaltigen Nutzung von Wäldern, gerade vor dem Hintergrund von Vollbaumnutzungen und Waldkalkungen.

Definitionsgemäß sind im Mineralboden Korngrößen unter 2 mm Siebdurchmesser als Feinboden und ab 2 mm als Grobboden definiert (AD-HOC ARBEITSGRUPPE BODEN 2005). Bei der Vorratsberechnung ist zunächst der Vorrat des Feinbodens zu bestimmen, der dann multipliziert mit der jeweiligen Elementkonzentration den Elementvorrat ergibt. Der Feinbodenvorrat (t/ha) ergibt sich aus seiner Trockenrohddichte ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) abzüglich des Grobbodenanteils (Vol.-%) bezogen auf die jeweilige Schichtmächtigkeit (cm).

Im Rahmen der BZE II wurden die bodenphysikalischen Kenngrößen Trockenrohddichte des Feinbodens und der Grobbodenanteil jeweils gemäß der BZE-Tiefenstufen in den BZE-Profilen Sachsen-Anhalts analytisch bestimmt. (GAFA 2005, 2014). Aus diesen Messdaten und der jeweiligen Schichtmächtigkeit wird der Feinbodenvorrat programmgestützt berechnet und für die Berechnung der Elementvorräte verwendet. Die in der BZE I gemessenen Trockenrohddichten bezogen sich nicht auf die Tiefenstufen, sondern auf die beprobten Bodenhorizonte, außerdem wurden kleinere Steine nicht ausgesiebt. Diese Werte entsprechen eher einer Trockenrohddichte des Gesamtbodens, nicht des Feinbodens wie in der BZE II gefordert. Um Auswertungen auf möglichst einheitlicher Datenbasis mit möglichst genauen und vergleichbaren Messwerten sicherstellen zu können, wurden die in der BZE II gemessenen Trockenrohddichten des Feinbodens und Grobbodenanteile auch für die BZE I verwendet.

#### 6.3.1 *Trockenrohddichten des Feinbodens*

Die Trockenrohddichten des Feinbodens (s. Abb. 27) steigen im Allgemeinen mit zunehmender Bodentiefe kontinuierlich an, unterscheiden sich aber in Abhängigkeit von den Substratgruppen. Die geringsten Trockenrohddichten finden sich beim Tonschiefer und verlehnten Sand mit Werten von unter  $1,0 \text{ g}/\text{cm}^3$  in 0–5 cm. Sie sind Ausdruck der hohen Humusgehalte und des lockeren Mineralbodens direkt unterhalb des Auflagehumus. Mit zunehmender Bodentiefe steigen die Trockenrohddichten des Feinbodens aller Substratgruppen bis auf Werte zwischen  $1,4$ – $1,9 \text{ g}/\text{cm}^3$  an. Die Böden in den Substratgruppen der Sande weisen insgesamt höhere Trockenrohddichten auf als die der Lösslehme und Tonschiefer. Absolut die geringsten Trockenrohddichten traten bei den organisch geprägten Standorten mit Werten unter

0,5 g/cm<sup>3</sup> auf. Die Böden der Substratgruppen Granit, Grauwacke und Basalt/Diabas liegen mit ihren Trockenrohdichten ungefähr bei dem Werten des Tonschiefers, Quarzit, Lehm, Zechstein und Kreidesandstein eher bei den Sanden mit höheren Trockenrohdichten (nicht dargestellt).

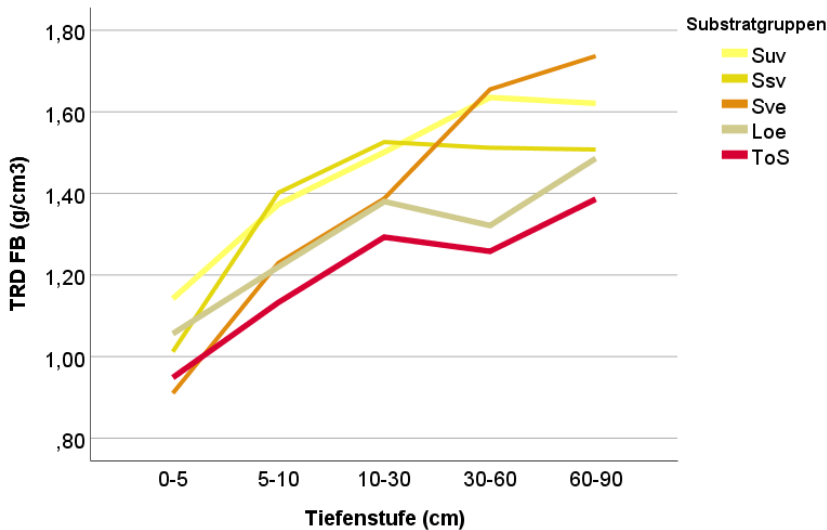


Abbildung 27: Trockenrohdichten des Feinbodens (TRD FB) [g/cm<sup>3</sup>] in Sachsen-Anhalt nach Tiefenstufen [cm] und Substratgruppen mit  $n > 3$  (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer)

### 6.3.2 Grobbodenanteile

Die Grobbodenanteile in den Substratgruppen organisch geprägte Standorte, der Sande und des Lösslehms sind in allen Tiefenstufen überwiegend gering mit mittleren Werten unter 8 Vol%. Vereinzelt können auch höhere Grobbodenanteile bis maximal 40 Vol% auftreten. Bei den Lehmen und im Kreidesandstein liegen die Grobbodenanteile etwas höher mit mittleren Werten zwischen 5–15 Vol%. In den Substratgruppen Granit und Tonschiefer liegen die Grobbodenanteile im Oberboden bis 30 cm zwischen 10 und 20 Vol%, im Unterboden steigen sie auf 30–40 Vol%, beim Tonschiefer auf 65 % Vol% in 60–90 cm Bodentiefe an. Die Grobbodenanteile in den Substratgruppen Zechstein, Grauwacke Basalt/Diabas und Quarzit haben schon im Oberboden Werte zwischen 10–60 Vol%, im Unterboden sind die Grobbodenanteile häufig noch höher.



### 6.3.3 Feinbodenvorrat

Entsprechend der unterschiedlichen Trockenrohdichten des Feinbodens, der Grobbodenanteile und der Gründigkeit ergeben sich für die BZE II-Punkte in den jeweiligen Substratgruppen deutliche Differenzierungen hinsichtlich der Feinbodenvorräte (s. Abb. 28).

Die Spanne der mittleren Feinbodenvorräte bis 90 cm Bodentiefe je Substratgruppe reicht von 2000 t/ha bei Quarzit und organisch geprägten Standorten bis zu 14.000 t/ha bei den verlehmtten Sanden. Diese weite Spanne erklärt sich einerseits durch geringe Trockenrohdichten bei den organisch geprägten Standorten und zusätzlich hohen Grobbodenanteilen bei den Substratgruppen Quarzit, Grauwacke, Granit und Tonschiefer, andererseits durch relativ hohe Trockenrohdichten und geringe Grobbodenanteile bei Lösslehm, Sand und Lehm. Die Böden mit hohen Grobbodenanteilen (Quarzit, Grauwacke, Granit und Tonschiefer) haben häufig auch geringe Trockenrohdichten und daher relativ geringe Feinbodenvorräte, wohingegen die Böden mit hohen Trockenrohdichten (z. B. Sande und Lehme) geringe Grobbodenanteile und damit höhere Feinbodenvorräte aufweisen. Diese Unterschiede werden bedeutend bei der Beurteilung von Elementvorräten, die – wie beschrieben – schon aufgrund der unterschiedlichen Feinbodenvorräte in Abhängigkeit vom Substrat sehr verschieden sind.

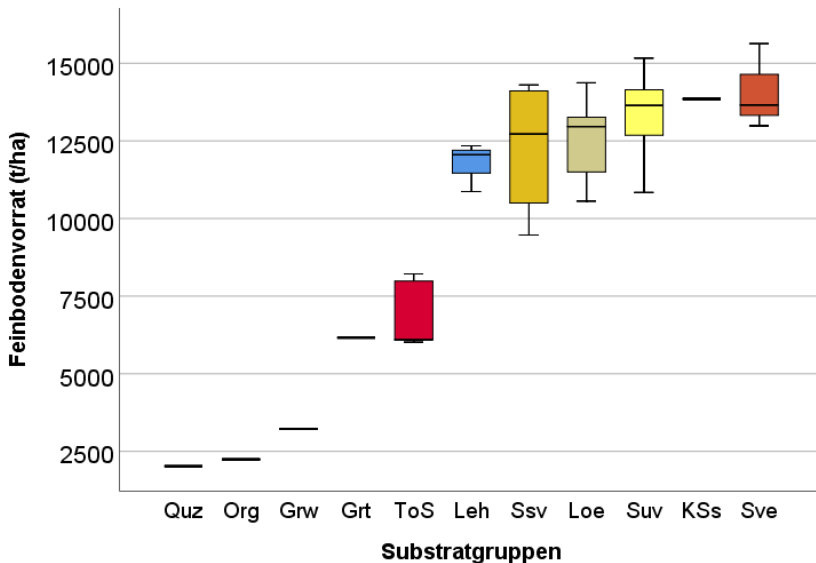


Abbildung 28: Feinbodenvorräte [t/ha] der BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen bis 90 cm Bodentiefe (Grt: Granit, Grw: Grauwacke, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

### 6.3.4 Nutzbare Feldkapazität

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) ist ein Maß für den pflanzennutzbaren Bodenwassergehalt<sup>1</sup> und eine grundlegende Größe zur Beschreibung des Wasserhaushaltes an den BZE-Punkten. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel und der Beurteilung der Baumarteneignung am jeweiligen Standort ist von entscheidender Bedeutung, wie hoch der für Pflanzen nutzbare Wasserspeicher (nFK) im Boden maximal ist und wie weit er tatsächlich zu Beginn der Vegetationsperiode im Boden gefüllt ist und damit den Pflanzen in der Vegetationsperiode zur Verfügung steht. Die nFK wurde anhand der Feinbodenart, der Trockenrohdichte des Feinbodens, des Grobbodenanteils und des Humusgehalts in Abhängigkeit von der Schichtmächtigkeit für die Tiefenstufen der BZE II programmgestützt (SCHULZE u. EVERS 2013) berechnet. Als Grundlage wurde die Pedotransferfunktion (KA 5, dort Tab. 70, AD HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005). Wie die Trockenrohdichte und der Grobbodenanteil folgt auch die nFK in Abhängigkeit vom Substrat bestimmten Mustern. In Abbildung 29 ist die mittlere nFK nach den BZE-Tiefenstufen auf Basis des BZE II-Datensatzes für die Substratgruppen in Sachsen-Anhalt dargestellt.

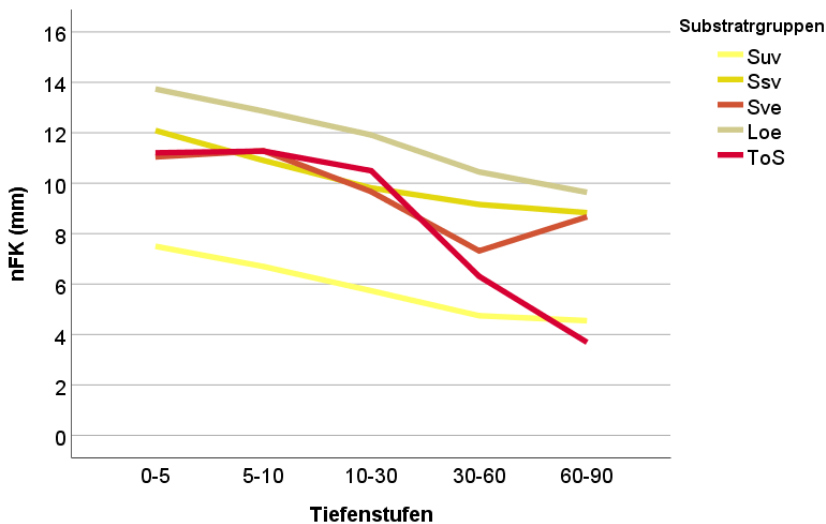


Abbildung 29: Mittlere nutzbare Feldkapazität (nFK) [mm], berechnet nach Stufenmitten der BZE-Tiefenstufen [cm] für die Substratgruppen in Sachsen-Anhalt anhand der BZE II-Daten (nur Substratgruppen mit mind. 4 BZE-Punkten) (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

<sup>1</sup> Die nFK ist die Menge des Bodenwassers, die in Poren mit Äquivalentdurchmesser zwischen 50 µm und 0,2 µm oder bei einer definierten Saugspannung zwischen pF 1,8 und 4,2 gebunden ist. Sie berechnet sich aus der Differenz zwischen Feldkapazität und permanentem Welkepunkt (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005).

Grundsätzlich nimmt die nFK schichtbezogen mit der Bodentiefe ab, da mit zunehmender Bodentiefe die Trockenrohdichten und Grobbodenanteile zunehmen und die Humusgehalte abnehmen. Die geringste durchschnittliche nFK weist der unverlehmte Sand auf, die höchste der Lösslehm. Dies liegt an der besonderen Korngrößenzusammensetzung des Lösslehms mit relativ wenig Feinporen und Grobporen, aber vielen Mittelporen und dem weitgehend fehlenden Grobboden, sodass dieser verhältnismäßig viel pflanzenverfügbares Wasser speichern kann. Beim unverlehmten Sand dagegen ist das Porenverhältnis besonders ungünstig. Die (schwach) verlehnten Sande und der Tonschiefer liegen mit ihren Werten der nFK zwischen dem Lösslehm und dem unverlehmten Sand.

Für die Beurteilung der Standorte hinsichtlich ihrer Wasserspeicherkapazität ist die nFK bis maximal 90 cm Bodentiefe aufsummiert und nach Substratgruppen getrennt in Abbildung 30 dargestellt. Die mittlere nFK in den Waldböden Sachsen-Anhalts in der BZE II bis 90 cm Bodentiefe liegt mit 115 mm nach der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) im mittleren Bereich. Die höchsten Werte werden von der Substratgruppe Lösslehm mit durchschnittlich 192 mm erreicht. Diese Standorte sind überwiegend der sehr hohen Bewertungsstufe zugeordnet. Die geringste durchschnittliche nFK hat der Quarzit mit rund 50 mm. Er fällt damit in die sehr geringe Bewertungsstufe. Die Standorte der unverlehmten Sande verteilen sich mit ihrer mittleren nFK bis 90 cm Bodentiefe hauptsächlich im geringen bis mittleren Bereich zwischen 60 und 120 mm, Tonschiefer, Lehm, verlehmt und schwach verlehmt Sand sowie Granit im hohen nFK Bereich zwischen 120–180 mm.

BZE-Punkte mit nFK-Summen von unter 30 mm (sehr geringe Bewertungsstufe) treten im BZE-Kollektiv von Sachsen-Anhalt nicht auf.

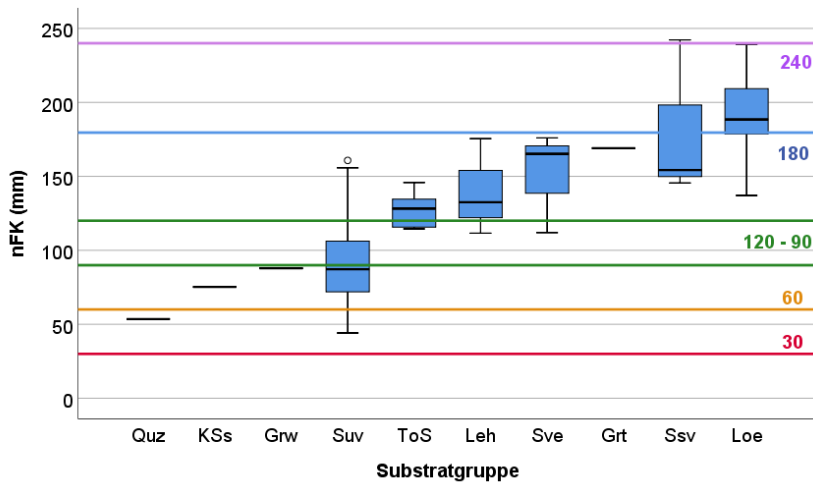


Abbildung 30: Nutzbare Feldkapazität [mm] bis maximal 90 cm Bodentiefe nach Substratgruppen anhand der BZE II-Daten in Sachsen-Anhalt (ohne organisch geprägte Standorte), als Linien sind die Bewertungsgrenzen nach der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003; s. Tab. 11, S. 148) angegeben (Grt: Granit, Grw: Grauwacke, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

## 6.4 Bodenmorphologische und bodenphysikalische Kenngrößen im Ländervergleich Nordwestdeutschlands

Jan Evers, Uwe Paar

Da in den nachfolgenden Ergebnisdarstellungen zur Bodenchemie auch die Mittelwerte für die Länder Hessen und Niedersachsen dargestellt sind, wird in diesem Kapitel auf einige grundsätzliche Unterschiede hinsichtlich der Verteilung der Substratgruppen in den Bundesländern und damit ihrer bodenphysikalischen Kenngrößen eingegangen.

Für die Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt insgesamt bilden die Sande mit knapp 40 % das größte Kollektiv. Dabei sind die unverlehmtten Sande mit gut einem Viertel die am häufigsten vorkommende Substratgruppe. Es folgen die Buntsandstein-Standorte mit 13 % und Lösslehme mit 12 %. Mit deutlich geringeren Anteilen schließen sich die Tonschiefer- (8 %), Basalt/Diabas- (6 %) und Kalk-Standorte (5 %) an. Mit jeweils 3 bis 4 %-Anteilen an allen BZE-Punkten in den drei Bundesländern sind die organisch geprägten Standorte sowie die Grauwacke-, Lehm- und Ton(stein)-Standorte trotz regional höherer Bedeutung deutlich seltener. Die Quarzit-, Zechstein(Rotliegendes)-, Granit- und Kreidesandstein-Standorte treten mit jeweils 1 % nur vereinzelt auf (s. Abb. 31).

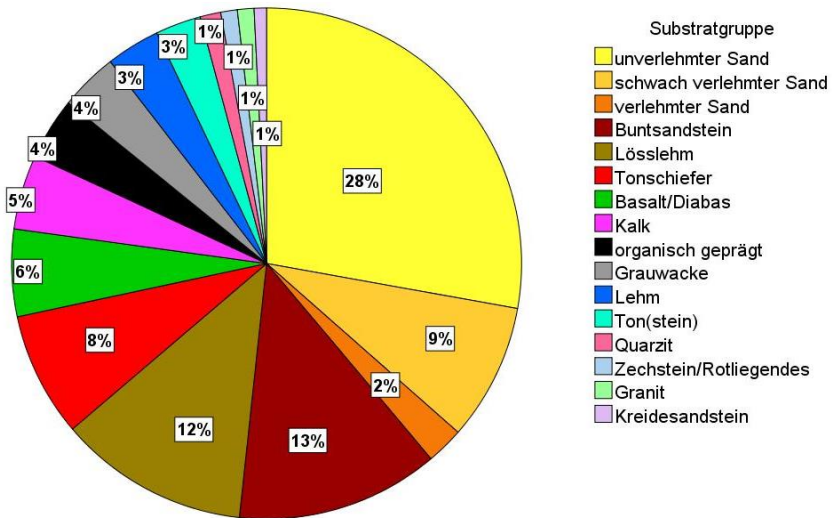


Abbildung 31: Verteilung der BZE-Punkte nach Substratgruppen (Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt)

Die Verteilungen der Substratgruppen im BZE-Kollektiv sind entsprechend der naturräumlich-standörtlichen Verhältnisse in den Bundesländern Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt unterschiedlich.

Der Ländervergleich zeigt Folgendes (s. Tab. 9):

Tabelle 9: *Anzahl und prozentuale Verteilung der BZE II-Punkte auf die Substratgruppen in den Bundesländern*

| Substratgruppe           | Niedersachsen |     | Hessen |     | Sachsen-Anhalt |     |
|--------------------------|---------------|-----|--------|-----|----------------|-----|
|                          | n             | %   | n      | %   | n              | %   |
| Buntsandstein            | 10            | 6   | 39     | 28  | 0              | 0   |
| Lösslehm                 | 18            | 11  | 20     | 14  | 8              | 11  |
| Basalt/Diabas            | 0             | 0   | 20     | 14  | 1              | 1   |
| Tonschiefer              | 7             | 4   | 16     | 11  | 7              | 9   |
| unverlehmter Sand        | 59            | 36  | 8      | 6   | 39             | 51  |
| Ton(stein)               | 4             | 2   | 7      | 5   | 0              | 0   |
| Grauwacke                | 5             | 3   | 7      | 5   | 2              | 3   |
| schwach verlehmter Sand  | 23            | 14  | 5      | 4   | 5              | 7   |
| Quarzit                  | 0             | 0   | 4      | 3   | 1              | 1   |
| Lehm                     | 6             | 4   | 4      | 3   | 3              | 4   |
| Kalk                     | 14            | 8   | 4      | 3   | 0              | 0   |
| Zechstein (Rotliegendes) | 0             | 0   | 3      | 2   | 1              | 1   |
| verlehmter Sand          | 4             | 2   | 1      | 1   | 4              | 5   |
| Granit                   | 1             | 1   | 1      | 1   | 2              | 3   |
| organisch geprägt        | 13            | 8   | 0      | 0   | 2              | 3   |
| Kreidesandstein          | 2             | 1   | 0      | 0   | 1              | 1   |
| Summe                    | 166           | 100 | 139    | 100 | 76             | 100 |

n = Anzahl

In Hessen dominieren die Buntsandstein-Standorte mit gut einem Viertel aller Punkte, in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt jedoch die unverlehmten Sande des Tieflandes, die in Sachsen-Anhalt sogar die Hälfte aller Punkte ausmachen. Buntsandstein kommt bei der BZE II in Sachsen-Anhalt nicht vor, ist aber in der niedersächsischen BZE II mit zehn Punkten (6 %) vertreten. Nur der Lösslehm ist über alle drei Bundesländer relativ gleichmäßig im BZE-Kollektiv verteilt (11 % jeweils Niedersachsen und Sachsen-Anhalt, 14 % Hessen). Basalt/Diabas-Standorte sind besonders typisch für Hessen. Sie kommen im Rahmen der BZE II in Niedersachsen gar nicht und in Sachsen-Anhalt nur mit einem Punkt vor. Tonschiefer-Standorte haben ihren Schwerpunkt mit 16 Punkten in Hessen, es kommen aber auch jeweils sieben Punkte dieser Substratgruppe in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt vor. Neben den Sanden bilden in Niedersachsen die Lösslehme, Kalk-Standorte und organisch geprägte Standorte regionale Schwerpunkte. In Sachsen-Anhalt sind es neben den Sanden und Lösslehm die Tonschiefer-Standorte im Harz. Granit-, Kreidesandstein-, Zechstein (Rotliegendes)- und Quarzit-Standorte kommen jeweils

in den drei Bundesländern nur vereinzelt oder gar nicht vor. Mit geringen Anteilen sind die Lehme in jedem Bundesland vertreten. Organisch geprägte Standorte haben ihren Schwerpunkt in Niedersachsen. In Hessen kommen diese Standorte im BZE-Kollektiv gar nicht und in Sachsen-Anhalt zweimal vor.

Die länderspezifischen Muster in der Verteilung der Substratgruppen erklären die Unterschiede zwischen den Ländern in den weiteren Auswertungen.

Im Vergleich der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt gibt es hinsichtlich der durchschnittlichen Trockenrohdichten des Feinbodens in Abhängigkeit der Tiefenstufen länderbezogene Unterschiede (s. Abb. 32): In allen Tiefenstufen sind die Trockenrohdichten in Hessen am geringsten, in Niedersachsen etwas höher (mit Ausnahme der Tiefenstufe 60–90 cm) und in Sachsen-Anhalt mit deutlichem Abstand am höchsten. Diese Abstufung ergibt sich aus der bundeslandspezifischen Verteilung der Substratgruppen, hier vor allem der stärkeren Beteiligung der Sande an den Waldstandorten in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt. So fallen in Hessen 11 %, in Niedersachsen 52 % und in Sachsen-Anhalt 63 % auf diese Substratgruppen.

Im Vergleich der Bundesländer Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt weisen die Waldböden Hessens mit Abstand die höchsten Grobbodenanteile auf (s. Abb. 33).

Mit Ausnahme der Tiefenstufe 0–5 cm sind die Grobbodenanteile in Hessen am höchsten. In den Tiefenstufen 10–30 cm und 30–60 cm sind sie fast doppelt so hoch und in der Tiefenstufe 60–90 cm mehr als doppelt so hoch wie in den Bundesländern Niedersachsen und Sachsen-Anhalt. Auch dies hängt unmittelbar mit der Verteilung der unterschiedlichen Substrate in den Bundesländern zusammen. In Hessen sind die steinigen Mittelgebirgs-Standorte aus Buntsandstein, Basalt/Grauwacke sowie Tonschiefer prägend, in Niedersachsen und vor allem in Sachsen-Anhalt dominieren die weitgehend steinfreien Standorte der Sande und Lösslehme.

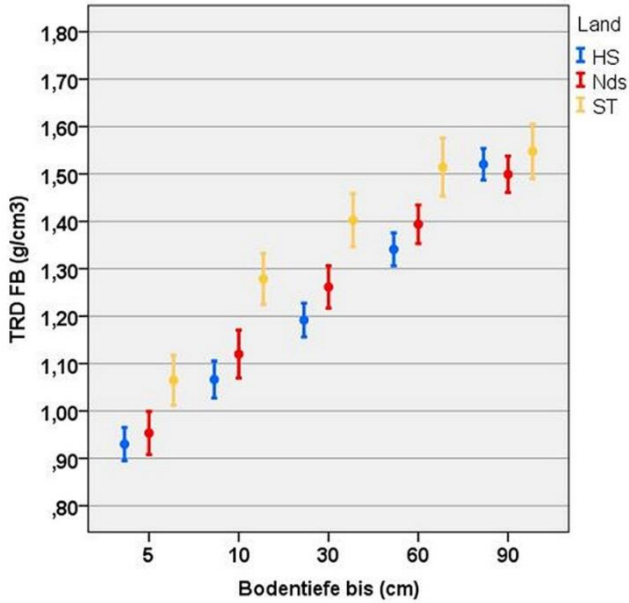


Abbildung 32: Durchschnittliche Trockenrohdichten des Feinbodens (TRD FB)  $[g/cm^3]$  nach Tiefenstufen  $[cm]$  für Niedersachsen (Nds), Hessen (HS) und Sachsen-Anhalt (ST); dargestellt ist der Mittelwert und das 95 %-Konfidenzintervall

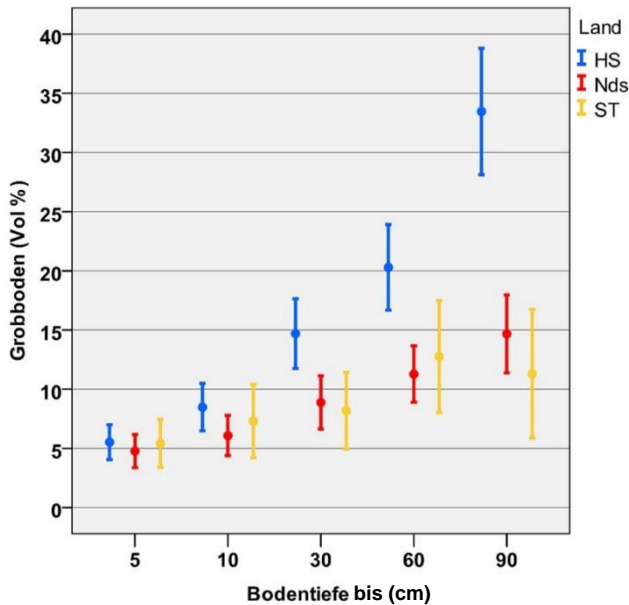


Abbildung 33: Durchschnittliche Grobbodenanteile  $[Vol.-%]$  nach Tiefenstufen  $[cm]$  für Niedersachsen (Nds), Hessen (HS) und Sachsen-Anhalt (ST); dargestellt ist der Mittelwert und das 95 %-Konfidenzintervall



Für Hessen ergibt sich der geringste durchschnittliche Feinbodenvorrat in allen Tiefenstufen, es folgt Niedersachsen und dann Sachsen-Anhalt (s. Abb. 34).

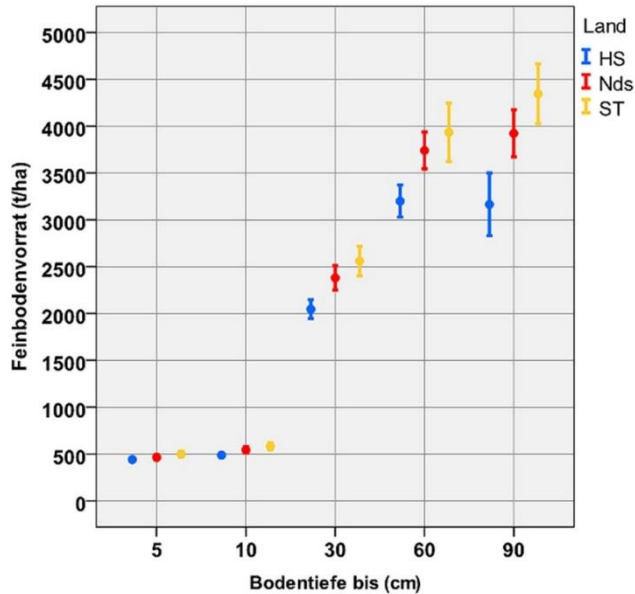


Abbildung 34: Durchschnittlicher Feinbodenvorrat [t/ha] nach Tiefenstufen [cm] für Niedersachsen (Nds), Hessen (HS) und Sachsen-Anhalt (ST); dargestellt ist der Mittelwert und das 95 %-Konfidenzintervall

In der vergleichenden Auswertung dieser Bundesländer zeigt sich, dass innerhalb der Substratgruppen die durchschnittlichen Feinbodenvorräte gut vergleichbar sind. Die Sande und Lehme haben mit Feinbodenvorräten von 10.000–14.000 t/ha immer die höchsten Werte. Die Feinbodenvorräte nehmen dann über Ton(stein), Buntsandstein, Kalk, Tonschiefer bis hin zur Grauwacke auf rund 4.000 t/ha kontinuierlich ab (s. Abb. 35).

Der durchschnittliche Feinbodenvorrat der Waldböden liegt in Hessen mit 8.500 t/ha deutlich niedriger als in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt mit rund 11.000 t/ha (s. Tab. 10). Aufgrund der unterschiedlichen durchschnittlichen Feinbodenvorräte werden sich die daraus berechneten durchschnittlichen Elementvorräte in den Ländern unterscheiden. Den Boden mit den geringsten Feinbodenvorräten gibt es in Hessen (ein flachgründiger, steinreicher Braunerde-Ranker aus Tonschiefer bei Bischoffen). Der Boden mit den höchsten Feinbodenvorräten ist ein Vega-Gley aus verlehmttem Sand bei Tangerhütte in Sachsen-Anhalt mit 26-mal so hohem Feinbodenvorrat wie der feinbodenärmste Boden in Hessen. Grundsätzlich sind die Spannen zwischen dem leichtesten und schwersten Boden in den drei Bundesländern ähnlich. Die Unterschiede der durchschnittlichen Feinbodenvorräte in den Ländern erklären sich aus der unterschiedlichen Verteilung der Substratgruppen

in den Ländern: In Niedersachsen und Sachsen-Anhalt sind es vor allem die am häufigsten vorkommenden Sande, die aufgrund ihrer hohen Trockenrohdichten und geringen Grobbodenanteile mit 10.000–16.000 t/ha Feinbodenvorrat bis 90 cm Bodentiefe für den höheren Durchschnitt im Vergleich zu anderen Substratgruppen verantwortlich sind. Die Sande sind in Hessen selten, hier kommen hingegen überwiegend Böden mit Buntsandstein, Basalt/Diabas, Lösslehm sowie Tonschiefer vor, die deutlich geringere Feinbodenvorräte zwischen 4.000 und 14.000 t/ha aufweisen (s. Abb. 36).

Bei der Berechnung von Elementvorräten und ihrer Veränderung ist die Kenntnis der zugrunde liegenden Feinbodenvorräte ein wichtiges Kriterium bei der Interpretation, da sich die Feinbodenvorräte zeitlich nicht oder nur unwesentlich ändern können. Weiterhin können Unterschiede von Elementvorräten in den Bundesländern oder auch Regionen wesentlich mit der Ausstattung an Substraten mit unterschiedlichen Feinbodenvorräten zusammenhängen.

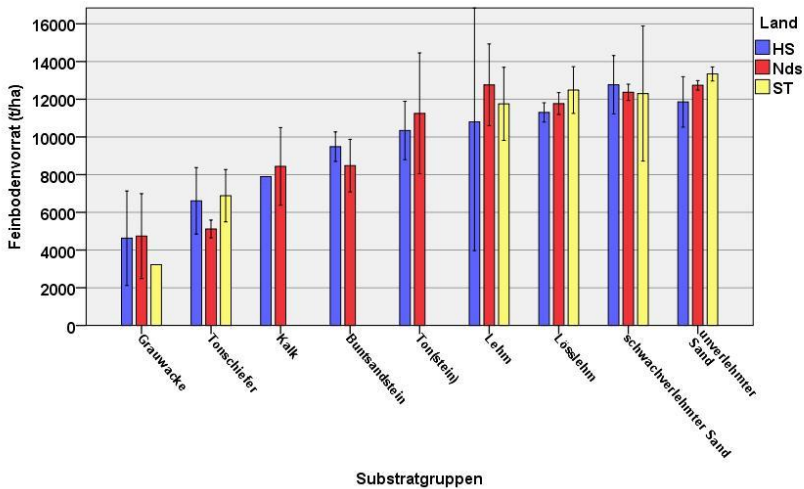


Abbildung 35: Mittlere Feinbodenvorräte [t/ha] in Niedersachsen (Nds), Hessen (HS) und Sachsen-Anhalt (ST) nach Substratgruppen bis 90 cm Bodentiefe ( $n > 3$  je Bundesland, als Streumaß ist das Konfidenzintervall angegeben)

Tabelle 10: Durchschnittliche Feinbodenvorräte [t/ha] bis max. 90 cm Bodentiefe in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt

| Feinbodenvorrat | n   | Mittel [t/ha] | SD [t/ha] | Median [t/ha] | Min [t/ha] | Max [t/ha] |
|-----------------|-----|---------------|-----------|---------------|------------|------------|
| Niedersachsen   | 166 | 10.738        | 3.271     | 12.075        | 918        | 14.774     |
| Hessen          | 139 | 8.501         | 3.311     | 8.760         | 622        | 14.372     |
| Sachsen-Anhalt  | 76  | 11.077        | 3.844     | 12.703        | 1.026      | 15.631     |

n = Anzahl, SD = Standardabweichung

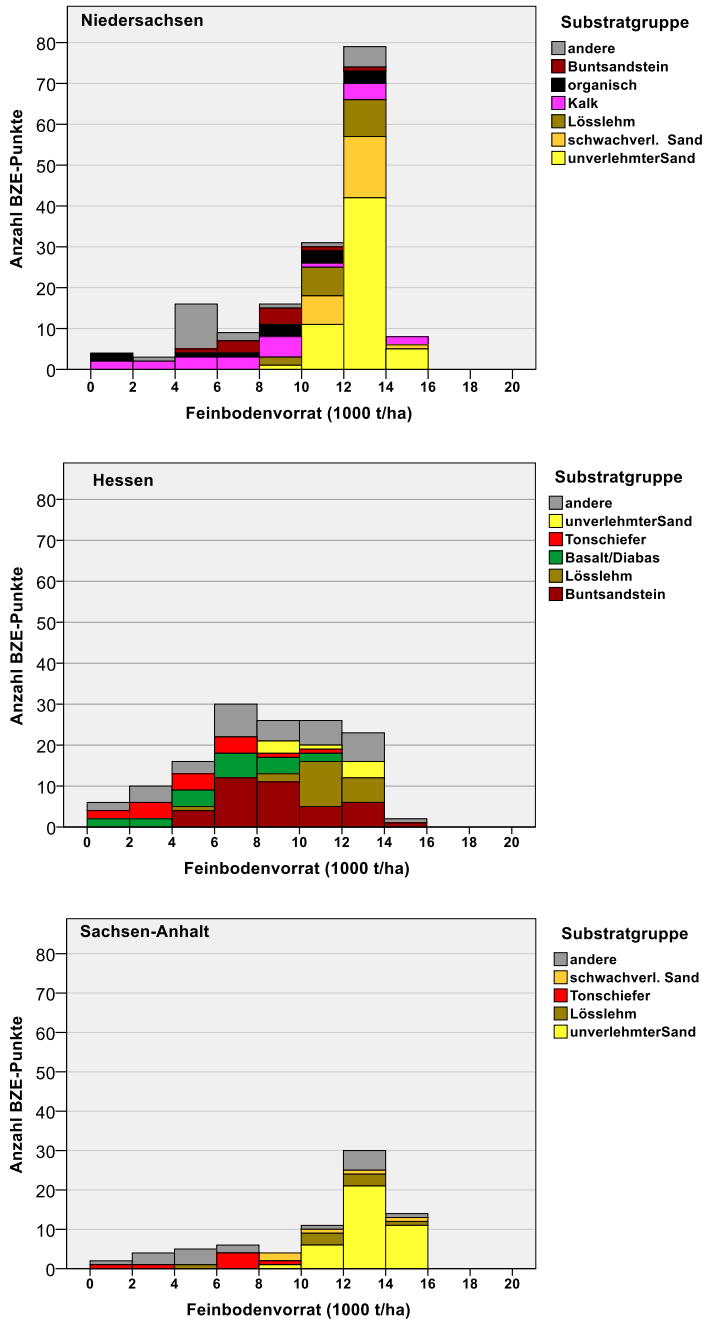


Abbildung 36: Verteilung der Feinbodenvorräte [1.000 t/ha] in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt nach den wichtigsten Substratgruppen bis 90 cm Bodentiefe

## 6.5 Bodenchemische Kenngrößen im Waldboden Sachsen-Anhalts

*Jan Evers, Uwe Paar, Egbert Schönfelder*

Die wichtigsten bodenchemischen Kenngrößen für den Auflagehumus und den Mineralboden werden anhand der Referenzwerte für die Bewertung von forstlichen Standorten mit „sehr gering“ bis „sehr hoch“ gemäß Tabelle 11 eingestuft (nach AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Die Grenzwerte für die verschiedenen Bewertungsbereiche sind als Orientierung mit fließenden Übergängen zu verstehen und nicht als scharfe Trennung. Die farbliche Hinterlegung in den folgenden Abbildungen basiert auf diesen Bewertungsbereichen und soll die Interpretation erleichtern. Die Angaben beziehen sich auf die Auflage und den effektiven Wurzelraum im Mineralboden. Die folgenden Auswertungen basieren auf der Annahme, dass der effektive Wurzelraum mit der am tiefsten einheitlich beprobten Tiefenstufe (60–90 cm) der BZE erfasst wird. Dies trifft für die intensivere Durchwurzelung (mittlere bis extreme Durchwurzelung) i. d. R. zu, nur vereinzelt wurden diese Durchwurzelungsstufen für Grob- und Feinwurzeln in tieferen Bodenschichten im BZE-Kollektiv gefunden. Im Bergland wurde in 90 cm Bodentiefe häufig bereits das anstehende Gestein erreicht, im Tiefland traten unter 90 cm Bodentiefe intensivere Durchwurzelungsstufen nur mit weniger als einem 10 %-Anteil auf. Schwache und vor allem sehr schwache Durchwurzelung konnte aber, sofern das Substrat durchwurzelbar war, auch in tieferen Schichten im Tiefland festgestellt werden. Für die Einschätzung der Standortpotenziale von Waldbäumen sollten gerade im Tiefland auch tiefere Bodenschichten einbezogen werden (EVERS et al. 2015).

Tabelle 11: *Bewertungsrahmen der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) (Ake, Basensättigung und Pufferbereiche: ohne Auflagehumus)*

| (eff. Wurzelraum mit Auflagehumus) | sehr gering | gering | gering mittel | mittel      | mittel hoch         | hoch     | sehr hoch |
|------------------------------------|-------------|--------|---------------|-------------|---------------------|----------|-----------|
| <b>Ake (kmolc/ha)</b>              | 50          | 100    | 250           | 500         | 1000                | 2000     |           |
| <b>Basensättigung (%)</b>          | 7           | 20     | 30            | 50          | 70                  | 85       |           |
| <b>Ca (kg/ha)</b>                  | 200         | 400    | 800           | 2000        | 4000                | 8000     |           |
| <b>Mg (kg/ha)</b>                  | 50          | 100    | 200           | 500         | 1000                | 2000     |           |
| <b>K (kg/ha)</b>                   | 200         | 400    | 600           | 800         | 1200                | 1600     |           |
| <b>C (t/ha)</b>                    | 50          |        | 100           | 200         |                     | 400      |           |
| <b>N (t/ha)</b>                    | 2,5         |        | 5,0           | 10,0        |                     | 20,0     |           |
| <b>C/N</b>                         | 35          | 25     | 20            | 16          | 12                  | 10       |           |
| <b>Pufferbereiche</b>              | Fe          | Al-Fe  | Al            | Austauscher | Kohlensäure/Silikat | Carbonat |           |
| <b>pH (H<sub>2</sub>O)</b>         | 3,0         | 3,8    | 4,2           | 5,0         | 6,2                 |          |           |

### 6.5.1 *Austauschkapazität*

Die Kenntnis der Kationenaustauschkapazität, kurz Austauschkapazität, spielt bei der standörtlichen Bewertung des Nährstoffhaushaltes von Waldböden eine bedeutende Rolle (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Die Austauschkapazität ist die bestimmende Größe zur Beschreibung von Speicherung und Austausch von pflanzenverfügbaren Nährstoffen (vor allem von Calcium, Magnesium und Kalium) an den negativ geladenen Oberflächen der Tonminerale. Weiterhin werden aus der Austauschkapazität abgeleitete Größen, wie z. B. die Basensättigung, zur Beurteilung des Säure-Basenzustandes herangezogen (BLOCK et al. 2000, RIEK u. WOLFF 2007, EVERS et al. 2013a, EVERS et al. 2013b). Die Austauschkapazität wird bei  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten unter 6,2 als effektive Austauschkapazität (Ake) bestimmt, wobei der Austausch im Perkolat annähernd bei bodeneigenem  $\text{pH}$  vollzogen wird. Die Kationenkonzentrationen werden im Perkolat gemessen, in Ionenäquivalente umgerechnet und auf die Bodenmenge bezogen. Bei  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten von über 6,2 wird die potenzielle Austauschkapazität (Akt) bestimmt (GAFA 2005, 2014). In den folgenden Auswertungen sind Ake und Akt vereinfachend gemeinsam betrachtet und werden als Austauschkapazität bezeichnet.

Die Austauschkapazität wird stark von der Tonmineralzusammensetzung, dem Humusgehalt und dem  $\text{pH}$ -Wert des Bodens bestimmt. Hohe Tonmineral- und Humusgehalte führen zu hohen Werten der Austauschkapazität und entsprechend positiver standörtlicher Bewertung. Bei fortgeschrittener Versauerung des Bodens bei  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten unter 4,2 lagern sich Al-Hydroxy-Polymere in die Tonmineral-Zwischenschichten ein. Es kommt langfristig zur Tonmineralzerstörung und damit zu einer Verringerung der Austauschkapazität. Je geringer die Austauschkapazität im Waldboden ist, umso weniger Kationen stehen den Waldbäumen austauschbar zur Verfügung und umso empfindlicher sind diese Waldböden gegenüber Veränderungen durch Säurebelastung oder intensiver Nutzung.

In Abbildung 37 ist die mittlere Austauschkapazität für den Auflagehumus und die Mineralboden-Tiefenstufen der BZE I und II für Sachsen-Anhalt mit Konfidenzintervallen (orange) und Mittelwerten der Länder Niedersachsen (inkl. Bremen), Hessen und Sachsen-Anhalt (rote Kreise) dargestellt.

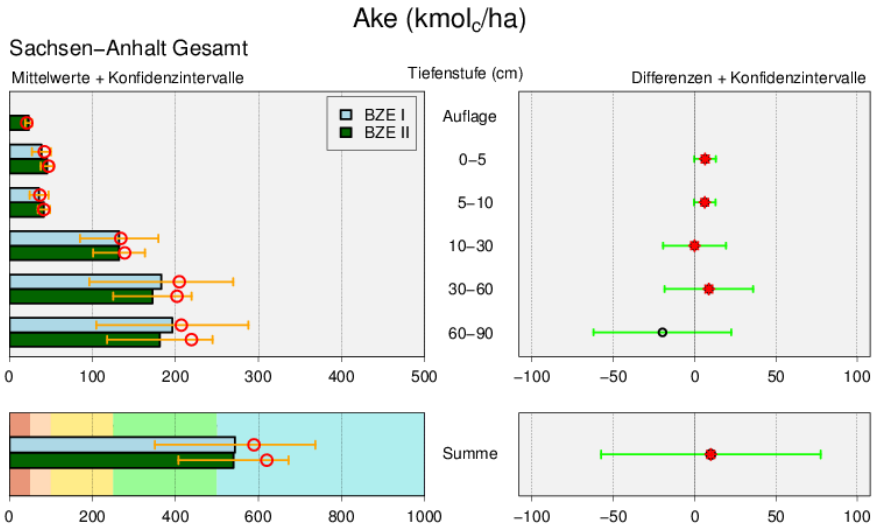


Abbildung 37: Austauschkapazität (Ake) [kmol<sub>o</sub>/ha] in den Waldböden Sachsens-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I, (n = 63) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm

Abbildung 38 gibt einen Überblick über den schematischen Aufbau der vorigen und der folgenden Abbildungen mit identischem Layout.

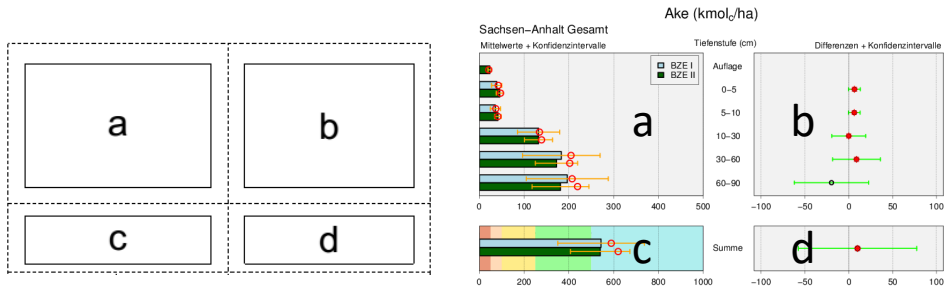


Abbildung 38: Schematischer Aufbau der Abbildungen zu bodenchemischen Kenngrößen am Beispiel der Austauschkapazität (Ake). Die Erläuterungen der Teilgrafiken sind jeweils im Text zu finden.

Im Folgenden werden die Teilgrafiken erläutert:

*Teilgrafik a:* Mittlerer Vorrat der BZE I (hellblau) und BZE II (dunkelgrün) für die Auflage und die BZE-Tiefenstufen 0–5, 5–10, 10–30, 30–60 und 60–90 cm für Sachsen-Anhalt. In Orange sind die 95 %-Konfidenzintervalle und mit roten Kreisen der Gesamtmittelwert der Länder Niedersachsen (inkl. Bremen), Hessen und Sachsen-Anhalt für die jeweilige Tiefenstufe angegeben.

*Teilgrafik b:* Bewertung der zeitlichen Unterschiede eines Merkmals zwischen der BZE II und I als mittlere Differenzen (BZE II minus BZE I) für Profile, die bei der BZE I und BZE II mit gleichen (!) Tiefenstufen vorliegen (Schnittmenge beider Inventuren). 95 %-Konfidenzintervall. Roter Stern: signifikant gegen 0 verschieden (5 %-Niveau, Wilcoxon).

*Teilgrafik c:* Mittlerer Profilverrat (Summe Auflage und aller jeweiligen Tiefenstufen auf Profilebene) aller BZE I- und BZE II-Profile mit 95 %-Konfidenzintervall (orange) und Gesamtmittelwert der Länder Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt (roter Kreis). Farblich hinterlegt sind für den jeweiligen Parameter die Bewertungsstufen nach der Forstlichen Standortaufnahme (AK Standortkartierung 2003): rot = sehr gering, orange = gering, gelb = gering-mittel, grün = mittel, hellblau = mittel-hoch, dunkelblau = hoch, violett = sehr hoch (s. a. Tab. 11).

*Teilgrafik d:* Mittlere Unterschiede zwischen der BZE II und BZE I aller bei der BZE I und BZE II beprobten BZE-Punkte auf Profilebene, wenn eine Auflage und jede Tiefenstufe bei der BZE I und II vorhanden sind. 95 %-Konfidenzintervall. Roter Stern: signifikant gegen 0 verschieden (5 %-Niveau, Wilcoxon).

Insgesamt liegt die Austauschkapazität in den Waldböden Sachsen-Anhalts im Mittel aller BZE-Punkte bei der BZE II mit rund 540 kmol<sub>c</sub>/ha im Mineralboden nach der Forstlichen Standortaufnahme (s. Tab. 11, S. 148 in diesem Band) noch im mittelhohen Bewertungsbereich. Damit haben die Waldböden in Sachsen-Anhalt im Vergleich zum Mittel der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt die geringste mittlere Austauschkapazität (s. Abb. 37, Teilgrafik c). Dies folgt insbesondere aus den hohen Anteilen von sandigen Standorten in Sachsen-Anhalts Wäldern, die grundsätzlich eine relativ geringe Austauschkapazität aufweisen.

Substratabhängig streuen die Werte der Austauschkapazität summiert auf Profilebene bis maximal 90 cm Bodentiefe von 133 kmol<sub>c</sub>/ha in einem Ranker aus sandig lehmigen Schluff mit hohen Grobbodenanteilen zwischen 80–90 Vol% bei Ilsenburg im Ostharz und bis 3.740 kmol<sub>c</sub>/ha in einem tiefgründigen Vega-Gley bei Magdeburg aus tonigen Substraten einer Hochflutablagerung. Dies zeigt die große Spanne der Austauschkapazität der forstlichen Waldböden in Sachsen-Anhalt und verdeutlicht, weshalb eine Auswertung nach Substratgruppen sinnvoll ist.

Mit durchschnittlich 23 kmol<sub>c</sub>/ha trägt der Auflagehumus etwa 4 % zur gesamten Austauschkapazität bis 90 cm Bodentiefe bei. In den oberen Bodentiefen (0–30 cm) sind mit rund 219 kmol<sub>c</sub>/ha etwa 40 %, in den mittleren (30–60 cm) und unteren (60–90 cm) Bodenschichten mit jeweils um 175 kmol<sub>c</sub>/ha jeweils 30 % der Austauschkapazität des Gesamtbodens bis 90 cm verteilt. Die höchste Austauschkapazität (bezogen auf jeweils 5 cm Bodenschicht) mit 45 kmol<sub>c</sub>/ha findet sich vor allem aufgrund hoher Humusgehalte in den oberen 5 cm des Mineralbodens (s. Abb. 37, Teilgrafik a).

Die durchschnittliche Austauschkapazität hat sich in den Tiefenstufen 0–10 cm gegenüber der BZE I um knapp 13 kmol<sub>c</sub>/ha erhöht. Dies entspricht einer Zunahme von 16 % bezogen auf die entsprechenden BZE I-Werte (s. Abb. 37, Teilgrafik b). Auch in 30–60 cm gab es eine signifikante Zunahme um 5 %. Diese Zunahmen wirkten sich auch auf die Gesamtprofilsumme der Austauschkapazität aus, hier wurde eine geringfügige Zunahme um 10 kmol<sub>c</sub>/ha (+2 %) festgestellt.

#### 6.5.1.1 Austauschkapazität in den Substratgruppen

Die mittlere Austauschkapazität auf Profilebene in den Substratgruppen sachsen-anhaltischer Waldböden ist sehr verschieden. Sie reicht von durchschnittlich 133 kmol<sub>c</sub>/ha in einem steinreichen Quarzit im Harz bis zu über 2300 kmol<sub>c</sub>/ha im tonhaltigen Lehm. Der Quarzit und die unverlehmten Sande sind mit ihren mittleren Austauschkapazitäten zumeist im gering-mittleren Bewertungsbereich verteilt (Abb. 39, zwischen oranger und unterer grüner Linie). Die Kreidesandsteine, Granite, Basalt/Diabase, Grauwacken und Tonschiefer fallen mit ihren durchschnittlichen Austauschkapazitäten bis 90 cm Bodentiefe in den mittleren Bewertungsbereich (zwischen den grünen Linien).

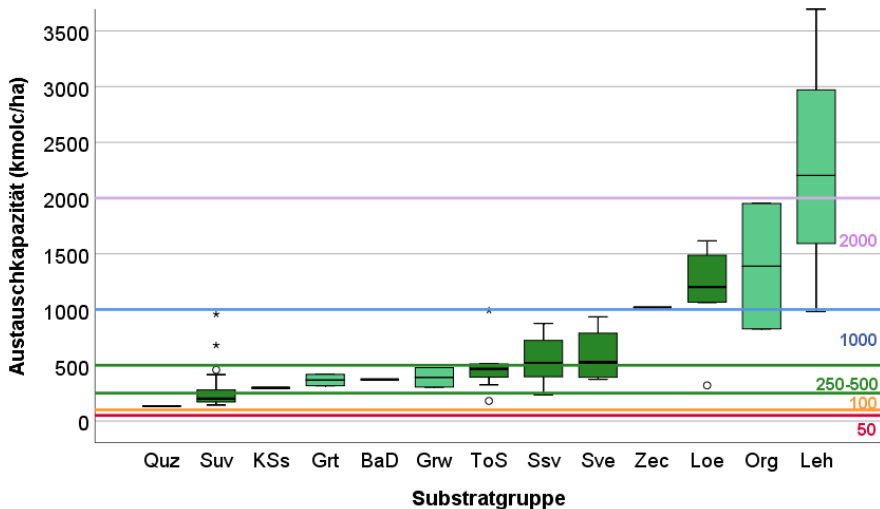


Abbildung 39: Austauschkapazität [kmol<sub>c</sub>/ha] im Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe bei der BZE II nach Substratgruppen in Sachsen-Anhalts Waldböden (BaD: Basalt/Diabas, Grt: Granite, Grw: Grauwacke, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer, Zec: Zechstein; Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148; hellgrün: n<=3, dunkelgrün n>3)



Die BZE-Punkte in den Substratgruppen schwach verlehmt Sand und verlehmt Sand liegen im Durchschnitt mit ihren mittleren Austauschkapazitäten im mittleren, aber auch schon mittel-hohen Bereich (zwischen oberer grüner und blauer Linie), Zechstein, Lösslehm, organisch geprägte Standorte und Lehme befinden sich im hohen Bewertungsbereich (zwischen blauer und pinkfarbener Linie) bis sehr hohen Bereich (Lehme). Dabei sind die Streuungen innerhalb der einzelnen Substratgruppen, vor allem in den besseren Bewertungsstufen, erheblich.

Im Vergleich der fünf wichtigsten Substratgruppen bei Sachsen-Anhalts Waldböden weisen die unverlehmt Sande auf Grund des geringen Tonmineralgehaltes die geringsten Austauschkapazitäten auf. Die höchsten Anteile kommen aus dem Oberboden, was mit den relativ hohen Anteilen organischer Substanz zusammenhängt. Bei den schwach verlehmt Sanden liegen die mittleren Austauschkapazitäten wegen der höheren Lehmgehalte mehr als doppelt so hoch. Dies geht vor allem auf die höheren Lehmgehalte in den Schichten 30–60 und 60–90 cm zurück (vgl. Abb. 40). Diese Substratgruppen übertreffen mit ihrer Austauschkapazität noch den Tonschiefer. Wie beim unverlehmt Sand ist die Austauschkapazitätssumme im Oberboden 0–30 cm am höchsten, was hier ebenfalls mit höheren organischen Anteilen, aber auch mit höheren Anteilen von Tonmineralen begründet werden kann. Die unteren Schichten im Tonschiefer haben wegen der relativ hohen Steingehalte geringere Anteile an der Austauschkapazität. Tonige Böden mit hohen Anteilen an Tonmineralen und geringen Grobbodengehalten kennzeichnen die Lehme, die die höchsten Austauschkapazitäten aufweisen und im Profil gut verteilt vorliegen. Die Anteile des Auflagehumus an der Austauschkapazität sind relativ gering. Sie haben nur auf den ärmeren Standorten mit maximal 9 % nennenswerte Anteile an der gesamten Austauschkapazität im Profil.

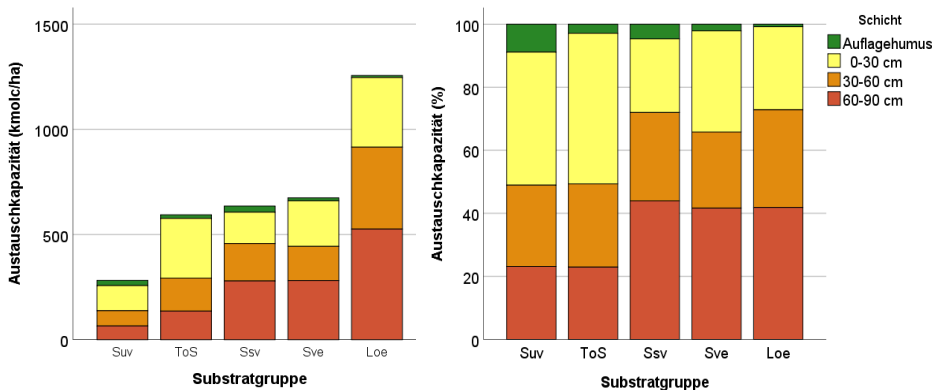


Abbildung 40: Austauschkapazität (Ake) im Auflagehumus und Mineralboden nach Bodenschichten (0–30, 30–60, 60–90 cm) in den Substratgruppen in kmol./ha (links) und % (rechts) bei der BZE II in Sachsen-Anhalt, dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmt Sand, Suv: unverlehmt Sand, Sve: verlehmt Sand, ToS: Tonschiefer)

## 6.5.1.1.1 Unverlehmte Sande

In Abbildung 41 ist die Austauschkapazität für die Substratgruppe unverlehmter Sand dargestellt.

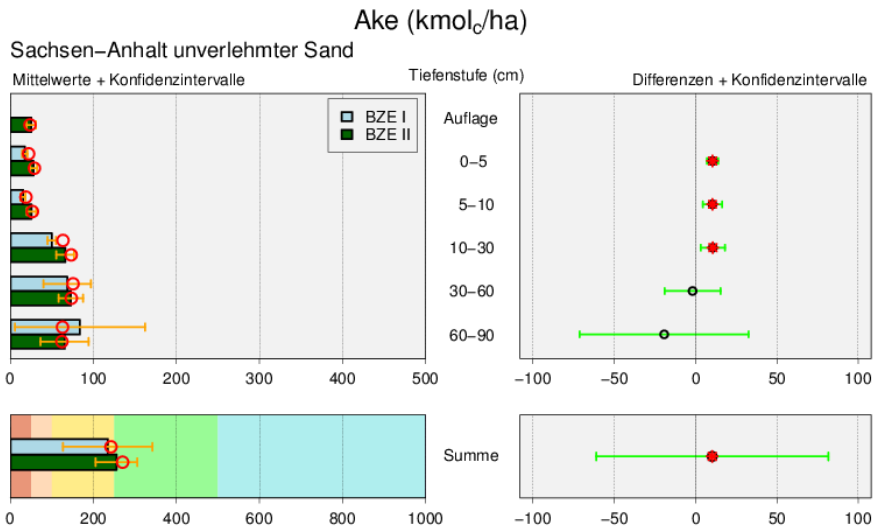


Abbildung 41: Austauschkapazität (Ake) [kmol<sub>c</sub>/ha] der Substratgruppe unverlehmte Sande in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 33) und II (n = 39) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 31) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Mit rund 255 kmol<sub>c</sub>/ha Austauschkapazität (summiert bis 90 cm Bodentiefe) liegen die BZE-Punkte der Substratgruppe unverlehmter Sand noch gerade im mittleren Bewertungsbereich (s. Abb. 41). Dieser Durchschnitt liegt zwischen den mittleren Vergleichswerten in Hessen (220 kmol<sub>c</sub>/ha) und Niedersachsen (340 kmol<sub>c</sub>/ha) (s. Abb. 41, Teilgrafik c). Die geringste Austauschkapazität in dieser Substratgruppe beträgt 144 kmol<sub>c</sub>/ha, die höchste 958 kmol<sub>c</sub>/ha (BZE II). Im ersten Fall handelt es sich um eine Braunerde aus aufgeschwemmten Feinsand in der Altmark, beim zweiten um einen Fahlerde-Pseudogley im Flechtinger Forst mit tonigen Beckenablagerungen im Untergrund, die für die ungewöhnlich hohe Austauschkapazität verantwortlich sind.

Die mittlere Zunahme der Austauschkapazität bezogen auf die BZE I auf Profilebene ist mit rund 10 kmol<sub>c</sub>/ha (4 %) moderat, jedoch signifikant (s. Abb. 41, Teilgrafik d). Diese Veränderung ergibt sich vor allem aus den relativ hohen Zunahmen in den Tiefenstufen 0–5, 5–10 und 10–30 cm Bodentiefe um insgesamt gut 30 kmol<sub>c</sub>/ha, was bezogen auf die BZE I knapp 40 % Zunahme bedeutet.

6.5.1.1.2 Schwach verlehmt Sande

Mit 550 kmol<sub>c</sub>/ha Austauschkapazität summiert bis 90 cm Bodentiefe liegen die BZE-Punkte der Substratgruppe schwach verlehmt Sande im mittel-hohen Bewertungsbereich der Austauschkapazität (s. Abb. 42). Damit liegen sie bei mehr als dem Doppelten über den Werten der unverlehmt Sande.

Der geringste Wert in dieser Substratgruppe liegt mit 230 kmol<sub>c</sub>/ha bei einer schwach podsoligen Parabraunerde-Braunerde aus Geschiebedecksand in der Nähe von Klötze, der höchste mit 876 kmol<sub>c</sub>/ha bei einem Braunerde-Pseudogley mit einer schwach tonigen Moränenablagerung unterlagert bei Haldensleben. Signifikante Veränderungen der Austauschkapazität zwischen den beiden BZE-Zeitpunkten traten nicht auf.

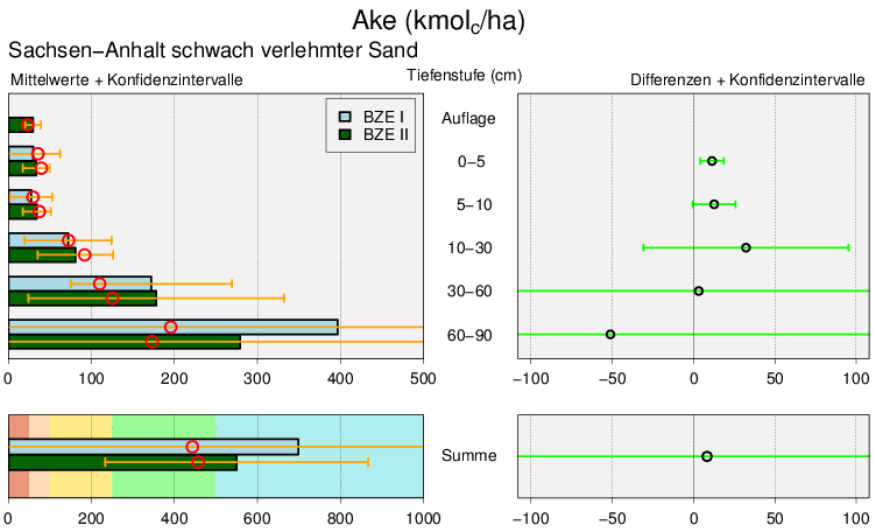


Abbildung 42: Austauschkapazität (Ake) [kmol<sub>c</sub>/ha] der Substratgruppe schwach verlehmt Sande in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 3) und II (n = 5) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 3) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

### 6.5.1.1.3 Verlehmte Sande

Mit rund 590 kmol<sub>e</sub>/ha in der BZE II erreichen die verlehmtten Sande innerhalb der Sande die höchste durchschnittliche Austauschkapazität und liegen damit im mittelhohen Bewertungsbereich (s. Abb. 43). Die BZE-Punkte streuen mit zunehmender Bodentiefe im Unterboden bei den Summen der Austauschkapazität erheblich. Dafür sind vor allem unregelmäßig unterlagerte Ton- und Lehmschichten verantwortlich. Dies führt zu teilweise hohen Abweichungen zwischen der BZE I und BZE II in den betreffenden Tiefenstufen, die aber als ungerichtet anzusehen sind. Signifikante Unterschiede konnten nicht nachgewiesen werden.

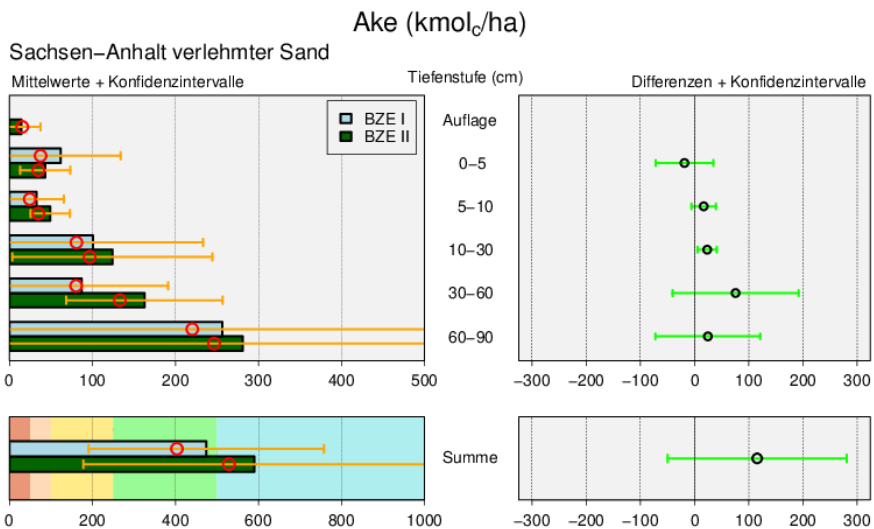


Abbildung 43: Austauschkapazität (Ake) [kmol<sub>e</sub>/ha] der Substratgruppe verlehmtte Sande in den Waldböden Sachsens-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 4) und II (n = 4) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 4) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.1.1.4 Lösslehm

Mit 1.180  $\text{kmol}_c/\text{ha}$  mittlerer Austauschkapazität summiert bis 90 cm Bodentiefe liegen die BZE-Punkte der Substratgruppe Lösslehm schon im hohen Bewertungsbereich der Austauschkapazität (s. Abb. 44). Lösslehm-Standorte verfügen im Mittel über eine mehr als vierfach so hohe Austauschkapazität wie ein durchschnittlicher Standort auf unverlehmten Sand.

Die Spanne der vorkommenden Austauschkapazitäten ist bezogen auf die Profilsummenebene hoch: Der BZE-Punkt mit dem geringsten Wert liegt mit 319  $\text{kmol}_c/\text{ha}$  im Osthartz, der höchste mit 1.616  $\text{kmol}_c/\text{ha}$  bei Lutherstadt Eisleben mit freiem Kalk im Unterboden. Signifikante Veränderungen zwischen den beiden BZE-Erhebungen traten bei der Austauschkapazität nicht auf.

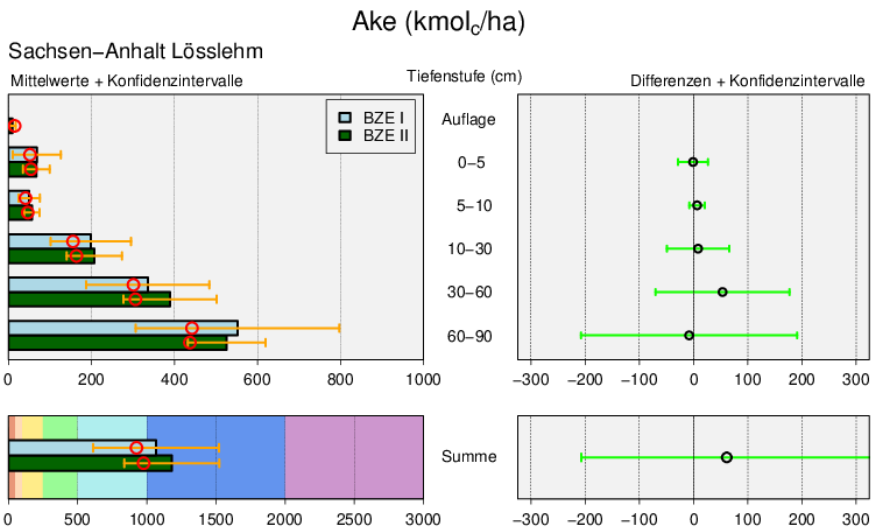


Abbildung 44: Austauschkapazität (Ake) [ $\text{kmol}_c/\text{ha}$ ] der Substratgruppe Lösslehm in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I ( $n = 8$ ) und II ( $n = 8$ ) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ( $n = 8$ ) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.1.1.5 Tonschiefer

Die mittlere Austauschkapazität der Standorte des Tonschiefers liegt für die BZE II in Sachsen-Anhalt auf Profilebene bei 493 kmol<sub>c</sub>/ha. Bei der BZE I waren es 539 kmol<sub>c</sub>/ha (s. Abb. 71, Teilgrafik c). Der Tonschiefer liegt damit auf Profilebene im mittleren bis mittel-hohen Bewertungsbereich der Austauschkapazität. Signifikante Veränderungen zur BZE I traten nicht auf.

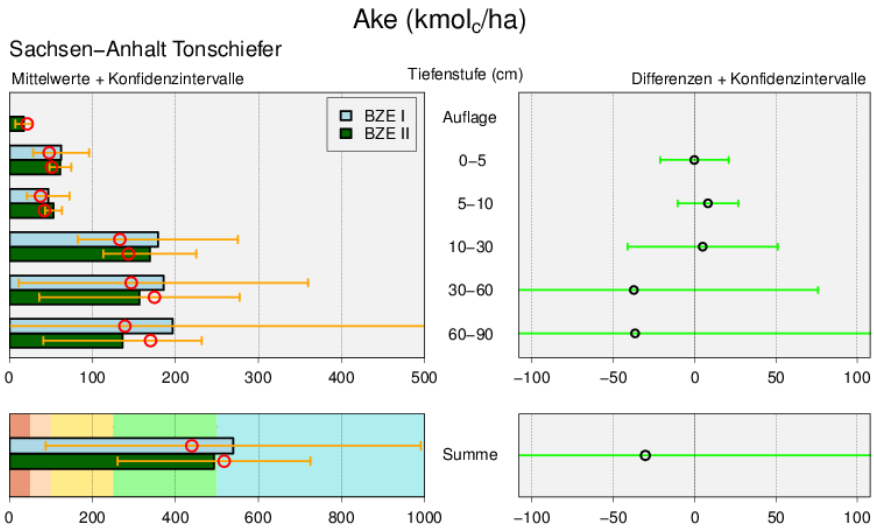


Abbildung 45: Austauschkapazität (Ake) [kmol<sub>c</sub>/ha] der Substratgruppe Tonschiefer in den Waldböden Sachsens-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 6) und II (n = 7) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 6) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.1.2 Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität

An der mittleren prozentualen Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität in Abbildung 46 ist erkennbar, dass Aluminium mit Anteilen zwischen 49 und 64 % im Gesamtkollektiv der BZE I in jeder Bodentiefe das bestimmende Kation war (gelbe Balken, linke Grafik). Die Protonen (H) belegen Anteile von 1 bis 15 %. Eisen und Mangan als weitere Kationensäuren nehmen nur sehr geringe Anteile unter 1 % ein. Das häufigste basisch wirkende Kation ist Calcium mit Anteilen an der Austauschkapazität zwischen 21 und 31 %. Deutlich geringere Anteile haben Magnesium (3–6 %) und Kalium sowie Natrium mit Anteilen bis zu 3 %. Die relativ hohen Anteile an basisch wirkenden Kationen im obersten Mineralboden (0–5 cm) können mit Stoffeinträgen wie basischen Stäuben, Kalkungsmaßnahmen, dem Gehalt an organischer Substanz und einer damit verbundenen „Maskierung“ von Al-Kationen sowie der Aufnahme basisch wirkender Kationen aus tieferen Bodenschichten und durch Abgabe über den Streufall erklärt werden, der sogenannten „Basenpumpe“. Die Anteile basischer Kationen fallen bis 30 cm Bodentiefe ab, nehmen darunter aber mit zunehmender Bodentiefe wieder zu und erreichen mit 43 % höhere Anteile als in 0–5 cm (34 %). Im Unterboden bestimmen vor allem die BZE-Punkte im Bergland mit höheren Anteilen von noch relativ wenig verwittertem Material mit hoher Basensättigung, relativ hoher Pufferkapazität und geringer Versauerung die chemischen Bodeneigenschaften.

Im Zeitvergleich (BZE I zu BZE II) zeigt sich im oberen Mineralboden nur eine geringe Veränderung der prozentualen Anteile der basischen Kationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium. Ab 30 cm Bodentiefe verringern sich die Anteile der basischen Kationen insgesamt jeweils um 7 %-Punkte in 30–60 und 60–90 cm Bodentiefe. Entsprechend erhöhten sich die Anteile von Aluminium bis auf 70 % in 30–60 cm in der BZE II.

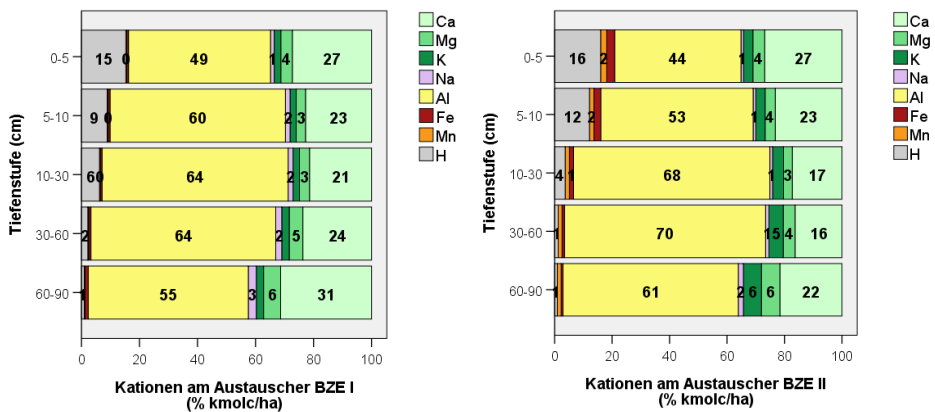


Abbildung 46: Mittlere prozentuale Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität (Ake) der BZE I- (linke Spalte) und BZE II-Punkte (rechte Spalte) in Sachsen-Anhalt

### 6.5.2 Basensättigung

Die Basensättigung ist ein zentraler Indikator für die Güte des chemischen Bodenzustandes. Sie kennzeichnet die Verfügbarkeit austauschbar gebundener Nährstoffe im Mineralboden und damit wesentlich die Ernährungsbedingungen von Waldbäumen. Die Basensättigung drückt aus, wie hoch der relative Anteil der basischen Nährstoffkationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium im Vergleich zur Summe aller Kationen ist, die an negativ geladenen Tonmineralen sowie organischer Substanz im Boden gebunden sind. Im Zuge fortschreitender Bodenversauerung werden die an der Pufferung beteiligten basischen Kationen (Mb-Kationen) Calcium, Magnesium und Kalium vom Austauscher durch die sauren Kationen Aluminium, Eisen, Mangan und Wasserstoff-Ionen (Ma-Kationen) verdrängt. Ein starkes Absinken der Basensättigung im Mineralboden ist eine Folge luftbürtiger versauernd wirkender Stoffeinträge.

Eine Basensättigung unter 20 % wird als gering, unter 7 % als sehr gering eingestuft. Diese Werte werden in den am stärksten versauerten Waldböden erreicht. Für Böden mittlerer Nährstoffversorgung ist eine Basensättigung von 30 bis 50 % definiert und bei gut nährstoffversorgten Standorten erreicht die Basensättigung Werte über 50 % (s. Tab. 11, S. 148).

Basensättigungen unter 20 % zeigen an, dass diese Standorte nicht mehr über das Potenzial an austauschbaren Nährstoffen verfügen, welches grundsätzlich bei gegebener Austauschkapazität an vergleichbaren, unbelasteten Waldstandorten zur Verfügung stand. In diesem Milieu wird der Austauscher und die Bodenlösung durch das Kation Aluminium geprägt. Calcium, Magnesium und Kalium liegen in vergleichsweise geringen Anteilen vor. Für Baumwurzeln kann es schwierig werden, unter diesen Bedingungen ausreichend Nährelemente mit den Wurzeln aufzunehmen. Aluminium kann in der Bodenlösung in höheren Konzentrationen zudem toxisch gegenüber Pflanzenwurzeln wirken. Die Bodenlösung ist relativ sauer, Schwermetalle werden gelöst und die Nährelemente Calcium, Magnesium und Kalium mit dem Sickerwasser ausgetragen. Sie gehen damit dem Ökosystem verloren. Allgemein wird dies als ein Zustand angesehen, in dem ein Waldboden wenig elastisch auf weitere Säureinträge reagieren kann, er in seiner Produktivität eingeschränkt und im Hinblick auf Elemententzüge durch intensive Holznutzung, wie beispielsweise Vollbaumnutzung, empfindlich ist. In diesen Fällen können Kompensationsmaßnahmen in Form von Waldkalkungen sinnvoll sein.

Im Folgenden sind die durchschnittlichen Werte der Basensättigung nach Tiefenstufen und Profil mit den jeweiligen Veränderungen zur BZE I für Sachsen-Anhalt insgesamt und getrennt nach Substratgruppen aufgeführt. Für den Auflagehumus wird die Basensättigung nicht angegeben, da im Unterschied zum Mineralboden im Auflagehumus aus methodischen Gründen keine Protonenberechnung erfolgt.

Mit 37 % durchschnittlicher Basensättigung bis 90 cm Bodentiefe liegen die Waldböden in Sachsen-Anhalt sowohl bei der BZE II als auch bei der BZE I im



mittleren Bewertungsbereich (s. Abb. 47, Teilgrafik c). Summiert und gemittelt über diese Bodentiefe hat sich die Basensättigung in Sachsen-Anhalt nicht verändert. Auch im Mittel über die Länder Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt hat sich die Basensättigung auf Profilebene nicht verändert und fällt mit 36 % ebenfalls in den mittleren Bewertungsbereich.

Die höchsten Werte der mittleren Basensättigung nach Tiefenstufen finden sich mit Werten um 40 % in den Tiefenstufen 0–5 und 60–90 cm. Die durchschnittliche Basensättigung der BZE II fällt in den Tiefenstufen 5–10 cm auf 34 % und in 10–30 cm weiter auf 30 %, steigt in 30–60 cm wieder auf 34 % und in 60–90 cm auf 40 % an (s. Abb. 47, Teilgrafik a). In der BZE I waren diese Werte auf Landesebene ähnlich, es gab zur BZE I keine signifikanten Unterschiede, weder im Gesamtprofil noch in einer Tiefenstufe (Teilgrafiken b und d).

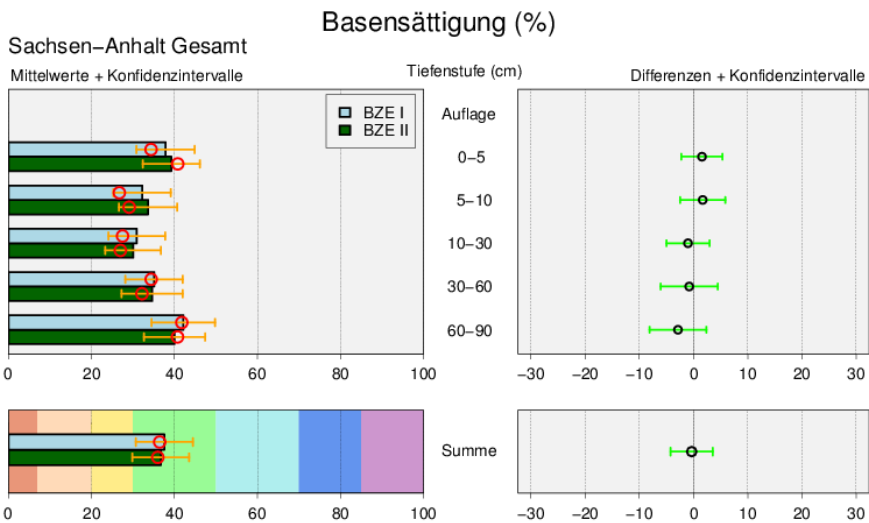


Abbildung 47: Basensättigung [%] in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I, (n = 64) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm

Diese Durchschnittswerte bieten nur eine allgemeine Orientierung. Sie hängen stark von der Verteilung der jeweiligen Substrate im Bundesland und der jeweiligen Austauschbelegung ab. So weisen z. B. die organisch geprägten Standorte (Niedermooere) in Sachsen-Anhalt sehr hohe Werte auf, wogegen die Quarzite, Granite und Grauwachen eher niedrige Basensättigungen haben.

### 6.5.2.1 Basensättigung nach Substratgruppen

Die Basensättigung in den Mineralböden der wichtigsten Substratgruppen in Sachsen-Anhalts Waldböden zeigt – wie auch in Niedersachsen und Hessen – bei hohen Streuungen in den einzelnen Substratgruppen typische Muster (s. Abb. 48, EVERS et al. 2019, PAAR et al. 2016): Sie liegt im Median mit Werten über das Gesamtprofil im geringen Bewertungsbereich mit 10 % beim Quarzit und Granit, 15 % bei der Grauwacke, 11 % beim Tonschiefer und 17 % beim unverlehmten Sand. Der schwach verlehmt Sand erreicht schon mit 25 % den gering-mittleren Bewertungsbereich. Der verlehmt Sand (54 %) und Lösslehm (65 %) liegt im Median schon im mittel-hohen, die Lehme, Kreidesandsteine, organisch geprägten Standorte und der Zechstein im hohen bis sehr hohen Bewertungsbereich.

Auffällig viele Bewertungsbereiche der durchschnittlichen Basensättigung werden durch BZE-Punkte in den Substratgruppen Lösslehm, verlehmter Sand, Tonschiefer und Lehm abgedeckt. In diesen Substratgruppen ist daher mit einer breiten Spanne an unterschiedlichen Trophiestufen zu rechnen.

Vereinzelt gibt es in einigen Substratgruppen Extreme, die sich z. T. auf Einträge von basischen Stäuben zurückführen lassen. So finden sich in der Substratgruppe unverlehmter Sand z. B. BZE-Punkte mit einer durchschnittlichen Basensättigung von über 60 %, was vermutlich auf diese Einträge zurückgeführt werden kann.

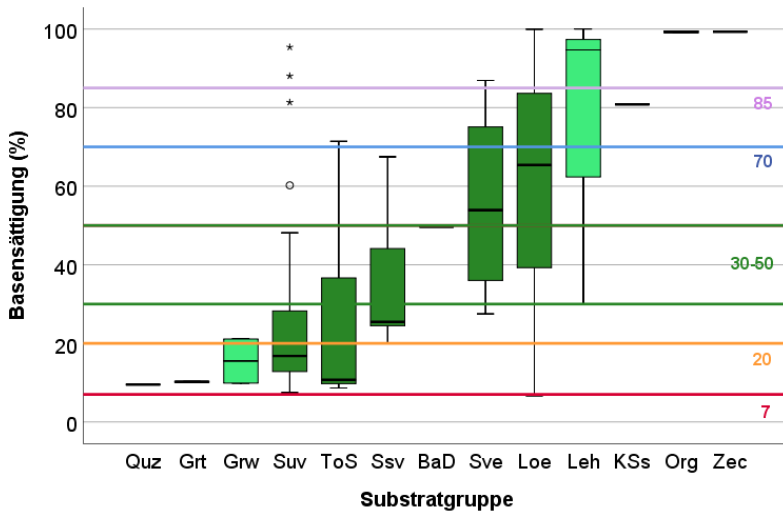


Abbildung 48: Durchschnittliche Basensättigung [%] im Mineralboden bei der BZE II nach Substratgruppen in sachsen-anhaltischen Waldböden bis 90 cm Bodentiefe (BaD: Basalt/ Diabas, Grw: Grauwacke, Grt: Granit, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer; Zec: Zechstein; Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148; hellgrün:  $n \leq 3$ , dunkelgrün  $n > 3$ )

Die Verteilungen der Werte für die Basensättigung in den Bodenschichten 0–30, 30–60 und 60–90 cm (s. Abb. 49) geben noch detailliertere Informationen zu den Substratgruppen: relativ geringe Werte um 20 % Basensättigung kommen durchgängig bis 90 cm Bodentiefe nur in der Substratgruppe unverlehmter Sand vor. Bereits deutlich besser mit Basen ausgestattet ist der schwach verlehmte Sand, vor allem in der Tiefenstufe 60–90 cm mit einem Median im mittleren Bewertungsbereich. Die Standorte der verlehmtten Sande sind noch einmal besser mit Basen versorgt, alle Schichten liegen mit Basensättigungen zumeist über 30 % im mittleren bis mittelhohen Bewertungsbereich. Der Tonschiefer hat im Oberboden bis 30 cm im Vergleich die geringste Basensättigung und liegt hier noch unterhalb der Verteilung des unverlehmten Sandes, die Basensättigungen steigen aber deutlich mit zunehmender Bodentiefe mit Werten über 85 % (Median 67 %) in 60–90 cm an. Hier wird der Einfluss von über die Mineralverwitterung nachgelieferten Basen in unteren Bodenschichten mit höheren Steingehalten erkennbar, vor allem wenn es sich um nährstoffreicheren Tonschiefer handelt. Der Lösslehm weist die höchsten Basenanteile in den Bodenschichten auf, nur der verlehmte Sand hat in 0–30 cm Bodentiefe im Mittel höhere Werte. Wie beim Tonschiefer steigt die Basensättigung mit zunehmender Bodentiefe deutlich. Die häufig beim unverlehmten Sand auftretenden Basensättigungen über 50 % sind auf die Flugascheinträge zurückzuführen.

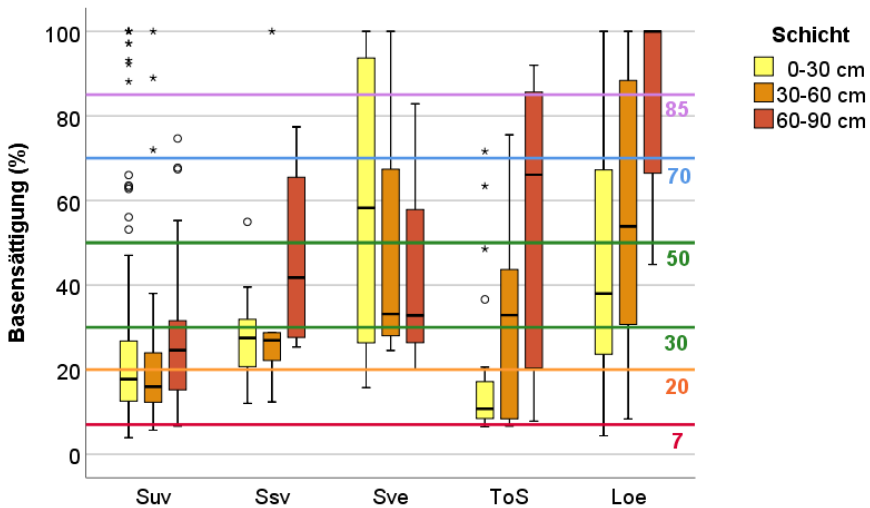


Abbildung 49: Basensättigung [%] im Mineralboden und den Tiefenstufen (0–30, 30–60, 60–90 cm) bei der BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen; dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer; Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148)

### 6.5.2.1.1 Unverlehmte Sande

Die durchschnittlichen Werte der Basensättigung hängen bei den Sanden grundsätzlich stark vom Verlehmungsgrad und den Anteilen organischer Substanz ab. Mit 26 % liegen die Werte der durchschnittlichen Basensättigung auf Profilebene in der Substratgruppe unverlehmter Sand bei der BZE II um 11 %-Punkte niedriger als der Durchschnittswert aller BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt. Mit 29 % waren die Werte der durchschnittlichen Basensättigung in der BZE I noch geringfügig höher (s. Abb. 50, Teilgrafik c). Beide Durchschnittswerte fallen in den gering-mittleren Bewertungsbereich. Die höchsten Werte bei der BZE II (31 %) nach Tiefenstufen finden sich in 0–5 cm Bodentiefe. Hier ist der Einfluss organischer Substanz und basischer Staubeinträge am höchsten (s. Abb. 50, Teilgrafik a). Mit zunehmender Bodentiefe sinken die Werte ab und liegen zwischen 23 und 27 %. In 60–90 cm Bodentiefe steigen die durchschnittlichen Werte der Basensättigung in der BZE II leicht auf 27 %. In der BZE I lag die Basensättigung hier noch bei 32 %.

Im Vergleich der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt weisen die unverlehmten Sande in Sachsen-Anhalt über alle Tiefenstufen hinweg bei vergleichbarer Austauschkapazität deutlich höhere Basensättigungen auf.

Signifikante Veränderungen der Basensättigung traten bei den unverlehmten Sanden nicht auf.

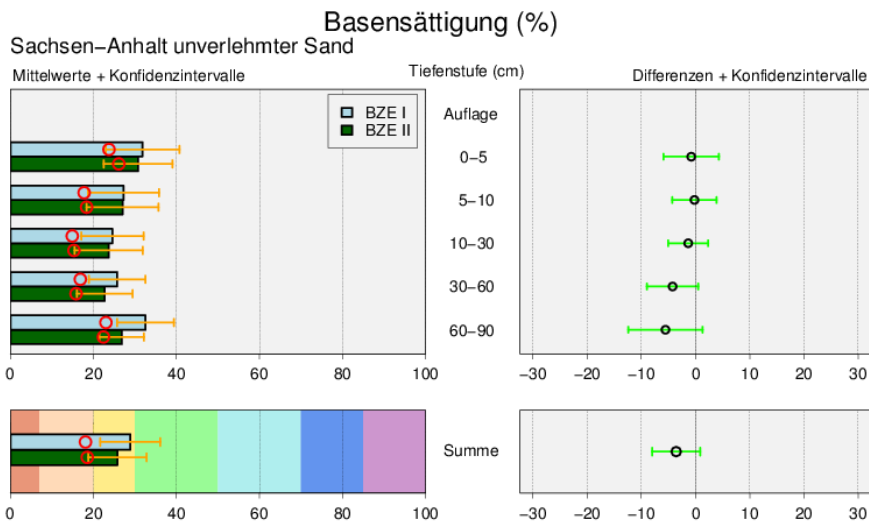


Abbildung 50: Basensättigung [%] der Substratgruppe unverlehmter Sand in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I ( $n = 33$ ) und II ( $n = 39$ ) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ( $n = 31$ ) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

6.5.2.1.2 Schwach verlehmt Sande

Die durchschnittlichen Werte der Basensättigung für die BZE-Punkte in der Substratgruppe schwach verlehmt Sande sind in Abbildung 51 dargestellt. Im Mittel liegen die schwach verlehmt Sande mit durchschnittlich 36 % Basensättigung in der BZE II im mittleren Bewertungsbereich und damit deutlich höher als die unverlehmt Sande (26 %, BZE II), aber geringer als die verlehmt Sande (56 %, BZE II) in Sachsen-Anhalt.

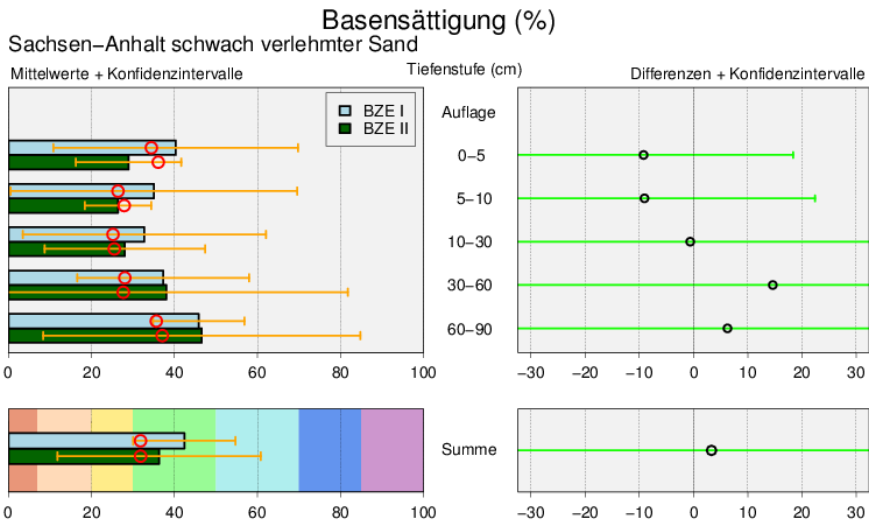


Abbildung 51: Basensättigung [%] der Substratgruppe schwach verlehmt Sande in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 3) und II (n = 5) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 3) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

### 6.5.2.1.3 Verlehmte Sande

Mit durchschnittlich 56 % Basensättigung auf Profilebene liegen die verlehmten Sande über den schwach verlehmten Sanden und dem Mittel Sachsen-Anhalts (37 %) insgesamt (s. Abb. 52). Das Mittel liegt im mittel-hohen Bewertungsbereich. Im Vergleich zur BZE I ist der Mittelwert um 5 %-Punkte gesunken. Signifikante Unterschiede zur BZE I traten weder auf Profil- noch auf Tiefenstufenebene auf.

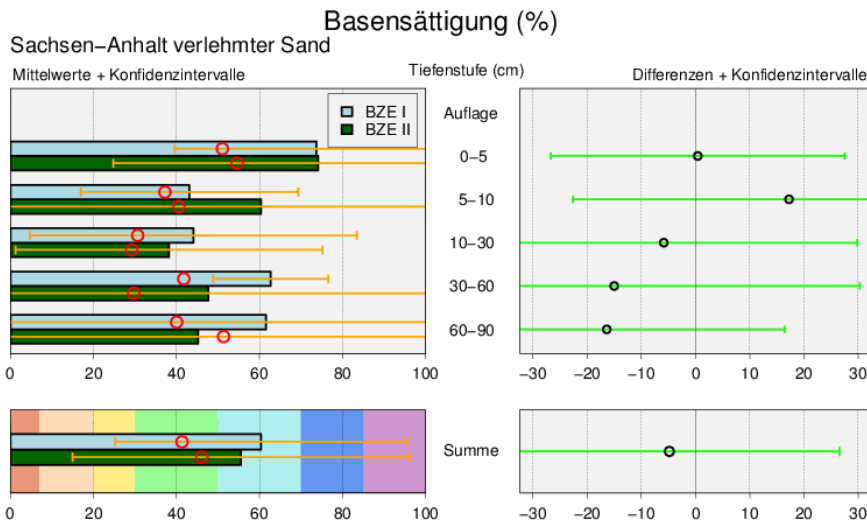


Abbildung 52: Basensättigung [%] der Substratgruppe verlehmte Sande in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I ( $n = 4$ ) und II ( $n = 4$ ) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ( $n = 4$ ) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

### 6.5.2.1.4 Lösslehm

Auf Profilebene liegt die durchschnittliche Basensättigung an den BZE II-Punkten der Substratgruppe Lösslehm bei 60 % und fällt damit in den mittel-hohen Bewertungsbereich (s. Abb. 53). Die Basensättigung hat seit der BZE I im Mittel auf Profilebene um knapp 6 %-Punkte zugenommen. Dieser Unterschied lässt sich jedoch nicht absichern (s. Abb. 53, Teilgrafik c und d). Mit Ausnahme der Tiefenstufe 10–30 cm Bodentiefe kam es zu leichten Zunahmen, die für 60–90 cm mit +14 % auch signifikant ist. Die durchschnittlichen Basensättigungen beim Lösslehm in den Waldböden Sachsen-Anhalts liegen in allen Tiefenstufen deutlich über dem Mittel der drei Länder Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt.

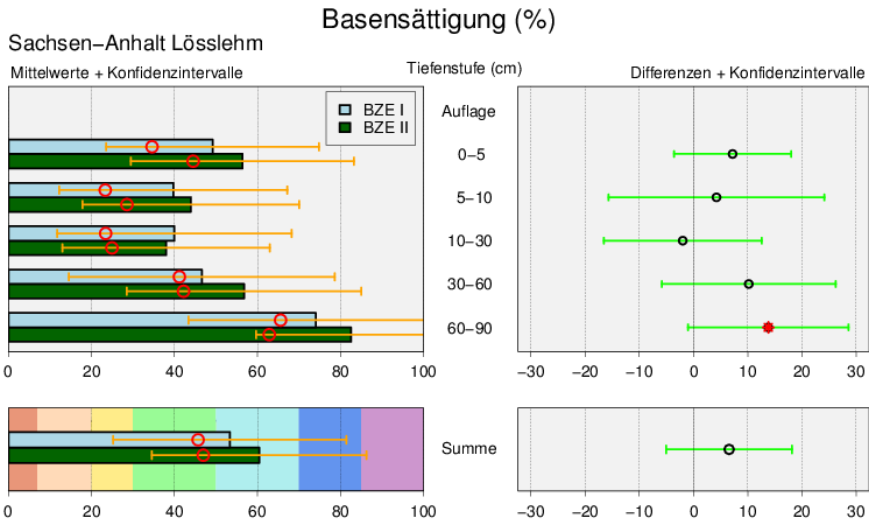


Abbildung 53: Basensättigung [%] der Substratgruppe Lösslehm in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 8) und II (n = 8) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 8) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

#### 6.5.2.1.5 Tonschiefer

Auf Profilebene liegt die durchschnittliche Basensättigung bei den BZE-Punkten der Substratgruppe Tonschiefer bei der BZE II bei 26 % und fällt damit in den gering-mittleren Bewertungsbereich. Im Mittel der BZE I lagen diese Standorte mit einer durchschnittlichen Basensättigung von 32 % noch im mittleren Bewertungsbereich. Es ergaben sich weder auf Profilebene noch Tiefenstufenebene signifikante Unterschiede zur BZE I.

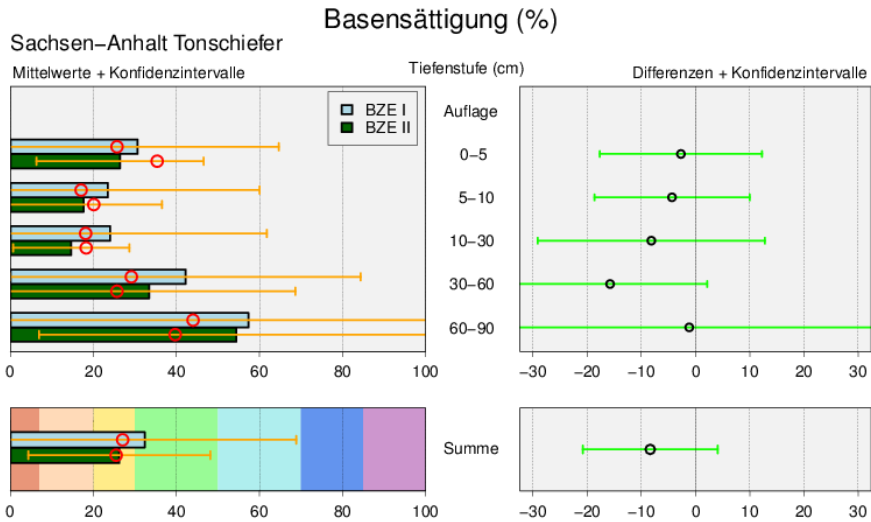


Abbildung 54: Basensättigung [%] der Substratgruppe Tonschiefer in den Waldböden Sachsens-Anhalts als Mittelwert für die BZE I ( $n = 6$ ) und II ( $n = 7$ ) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ( $n = 6$ ) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

#### 6.5.2.1.6 Basensättigung, Flugasche und Bodenbearbeitung

Für die Substratgruppe unverlehmter Sand ist in der Abb. 55 die Basensättigung in den BZE-Tiefenstufen in den Strata nur Flugascheeinfluss, nur Bodenbearbeitung, sowohl Flugasche als auch Bodenbearbeitung sowie weder Flugasche- noch Bodenbearbeitungseinfluss („keine“) dargestellt.



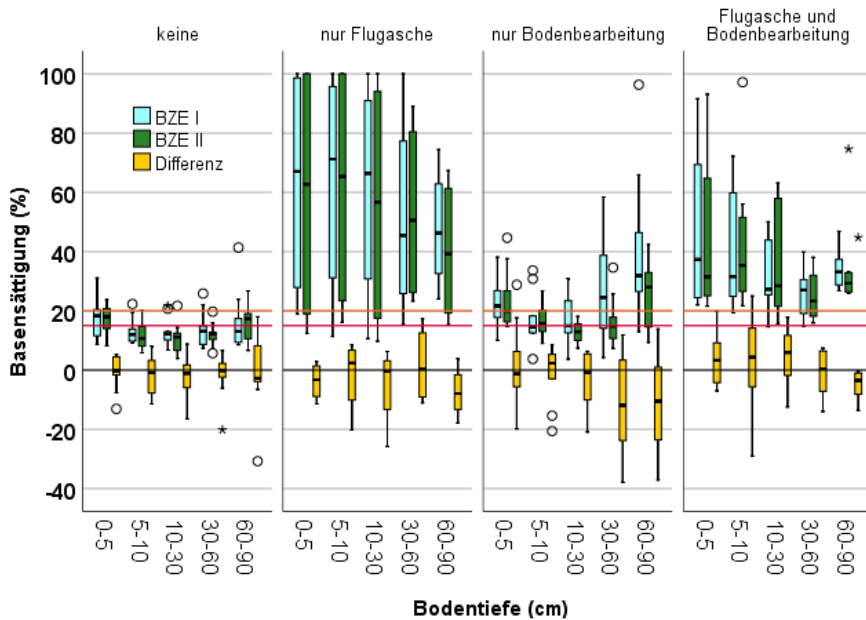


Abbildung 55: Basensättigung [%] der Substratgruppe unverlehmter Sand in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I und II sowie Differenz BZE II - BZE I nach Tiefenstufen in Abhängigkeit von Flugasche (n = 4), Bodenbearbeitung (n = 13), Flugasche und Bodenbearbeitung (n = 8) sowie ohne diese Einflüsse (n = 16), eingezeichnet als Linie 20 % Basensättigung orange und 15 % Basensättigung rot

Im Vergleich der Basensättigung in den Strata wird sehr deutlich, dass Flugasche und Bodenbearbeitung einen erheblichen Einfluss auf die Basensättigung haben, besonders jedoch die Flugasche. Die Werte der Basensättigung liegen im Stratum „nur Flugasche“ in jeder Bodentiefe in mittleren bis hohen Bereichen, besonders im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe werden die höchsten Werte erreicht. Im Stratum „Flugasche und Bodenbearbeitung“ sind die Werte der Basensättigung immer noch höher als im Vergleich zum Stratum „nur Bodenbearbeitung“ und „keine“, wo weder Flugascheeinträge noch Bodenbearbeitungen die Basensättigung beeinflussen. Im letzteren Stratum liegen alle Tiefenstufen unter 20 % Basensättigung (orange Linie), die Tiefenstufen 5–10, 10–30 sowie 30–60 cm sogar unter 15 % (rote Linie). Im Stratum „keine“ streuen die Werte der Basensättigung wenig und sind zwischen der BZE I und BZE II in jeder Tiefenstufe weitgehend gleich geblieben. Im Stratum „nur Bodenbearbeitung“ kam es vor allem in tieferen Bodenschichten zu Abnahmen der Basensättigung.

### 6.5.3 *Vorräte austauschbarer Calcium-, Magnesium- und Kaliumkationen*

Neben den bodenchemischen Parametern Austauschkapazität und Basensättigung sind die Vorräte der austauschbaren Nährelemente wichtige Indikatoren für die Abschätzung der Nährstoffversorgung der Waldbäume. Die austauschbaren Vorräte dieser Hauptnährelemente sind für die Waldbäume leicht bis mittel verfügbar und bilden die zentrale Versorgungsgrundlage. Die ausreichende Verfügbarkeit dieser Nährelemente in größeren Mengen ist für das Pflanzenwachstum und die Biomassebildung erforderlich. Calcium ist ein wichtiger Baustein für die Zellwände und an zentralen Prozessen, wie z. B. Photosynthese, Atmung und Zellteilung beteiligt. Magnesium spielt als Baustein im Chlorophyll für die Photosynthese eine entscheidende Rolle. Kalium ist für die Osmoregulation in den Zellen notwendig. Alle drei Elemente fördern die Aktivität von Enzymen und steuern die Eiweißsynthese, den Aufbau von Kohlehydraten und die Photosynthese. Die Nährelemente Calcium, Magnesium und vor allem Kalium werden im Zuge der Bodenversauerung durch Aluminium vom Austauscher verdrängt und mit dem Sickerwasser zumeist zusammen mit Sulfat und Nitrat aus dem Hauptwurzelraum ausgewaschen. Neben der Auswaschung und Entzügen mit der Holzernte sind Einträge aus der Luft, Waldkalkungen sowie die Mineralverwitterung bestimmende Größen des Nährstoffhaushalts. Analog zur Austauschkapazität und Basensättigung wurden diese drei Nährelemente für Sachsen-Anhalt übergreifend und nach den Substratgruppen gegliedert ausgewertet. Im vorliegenden Bericht werden nur die wichtigsten Ergebnisse exemplarisch dargestellt.

#### 6.5.3.1 *Calcium*

Calcium hat im Allgemeinen die höchsten Anteile an den basischen Kationen am Austauscher. In Sachsen-Anhalts Waldböden variieren die summierten Vorräte im Wurzelraum bis 90 cm Bodentiefe zusammen mit dem Auflagehumus von 220 kg/ha bis über 55 t/ha. Diese große Spanne ist typisch für das weite Spektrum an Waldstandorten und deckt alle Bewertungsbereiche bis auf den sehr geringen Bewertungsbereich unter 200 kg/ha ab. Im ersten Fall handelt es sich um eine verarmte Braunerde aus Lösslehm mit Tonschiefer und Grauwacke mit Fichte im Ostharz, im zweiten Fall um eine Hochflutablagerung bei Magdeburg mit Stieleiche, Esche, Feldahorn und Pappel. Entsprechend hoch sind auch die Spannen bei den Veränderungen der Vorräte im Vergleich zur BZE I, die räumliche Heterogenität ist teilweise beachtlich. Da der Stichprobenumfang in Sachsen-Anhalt relativ gering ist, können hohe Abweichungen an einem Punkt oder Tiefenstufe zwischen der BZE I und BZE II die rechnerische Differenz auf Landesebene bereits stark beeinflussen. Es wird daher bei den Veränderungen auch der Median genannt, der von hohen Abweichungen weniger beeinflusst wird.

Mit durchschnittlich rund 5.100 kg Calcium je ha (Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe) liegen die sachsen-anhaltischen Waldstandorte im hohen Bewertungsbereich. Zum Zeitpunkt der BZE I lagen die durchschnittlichen Vorräte bei rund 5.660 kg/ha um 11 % höher, der Unterschied zur BZE II ist jedoch nicht signifikant (s. Abb. 56, Teilgrafik c, d).

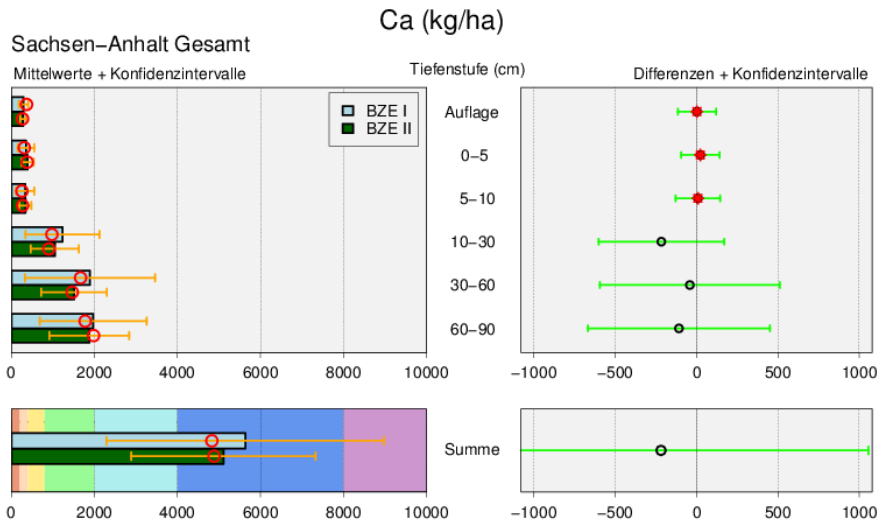


Abbildung 56: Austauschbare Calciumvorräte [kg/ha] in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 64) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Im Hinblick auf die Veränderungen im Auflagehumus und in den Tiefenstufen zeigen sich eine geringfügige signifikante Zunahme im Auflagehumus und leichte signifikante Zunahmen im Oberboden bis in 10 cm Bodentiefe (+5 % insgesamt bezogen auf die BZE I, s. Abb. 56, Teilgrafik b). Die weiteren Veränderungen im tieferen Mineralboden streuen weit und sind nicht signifikant. Dies liegt vor allem an wenigen Profilen mit sehr hohen und sehr unterschiedlichen Konzentrationen in bestimmten Tiefenstufen zwischen den beiden BZE-Erhebungen. Bei alternativer Betrachtung der Mediane ergibt sich im Auflagehumus und Mineralboden bis 10 cm Bodentiefe eine Zunahme um 32 % sowie im Mineralboden von 10–90 cm eine Abnahme von 8 % bezogen auf die BZE I, was sich auf Profilebene nahezu ausgleicht (+3 % bezogen auf die BZE I).

Die Calciumvorräte im Auflagehumus und Mineralboden auf Profilebene sind stark von den Substratgruppen abhängig (s. Abb. 57):

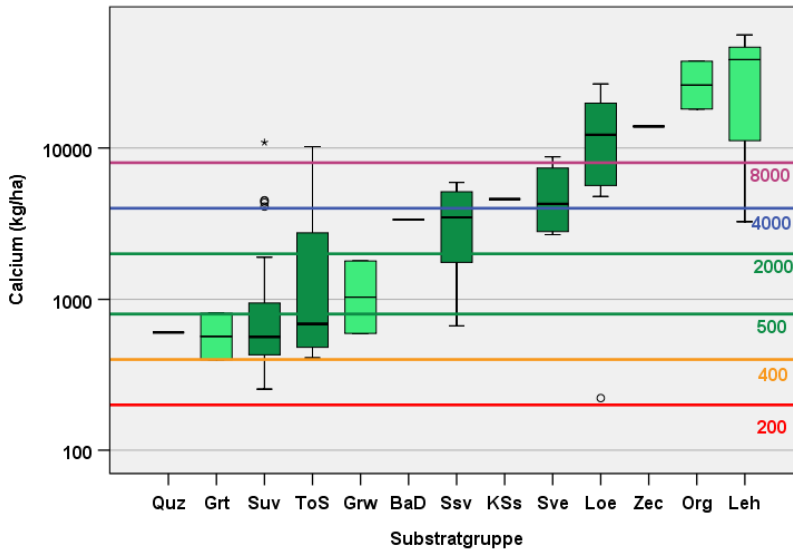


Abbildung 57: Verteilung der austauschbaren Calciumvorräte [kg/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in sachsen-anhaltischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (Ordinate logarithmisch skaliert) (BaD: Basalt/Diabas, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer; Zec: Zechstein, Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148, hellgrün:  $n \leq 3$ , dunkelgrün  $n > 3$ )

Die Substratgruppe Quarzit, Granit und überwiegend auch der unverlehmte Sand und Tonschiefer fallen bezüglich der Calciumversorgung in den mittel-geringen Bewertungsbereich. Die Calciumvorräte der BZE-Punkte im Tonschiefer streuen sehr stark, hier kommen auch mit sehr hoch bewertete Calciumvorräte vor. Im mittleren Bewertungsbereich liegen überwiegend die BZE-Punkte der Substratgruppe Grauwacke. Basalt/Diabas und schwach verlehmtter Sand sind mit mittel-hoch bewertet, Kreidesandstein und verlehmtter Sand liegen mit ihrem Schwerpunkt im hohen Bewertungsbereich für Calcium. Lösslehm, Zechstein, organisch geprägte Niedermoor-Standorte und Lehme erreichen Calciumvorräte im sehr hohen Bewertungsbereich über 8.000 kg/ha.

In Abbildung 58 sind die bis 90 cm Bodentiefe summierten Calciumvorräte nach Substratgruppen und Tiefenstufen dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Tiefenstufen 0–5, 5–10 und 10–30 cm zu einer Tiefenstufe zusammengefasst.

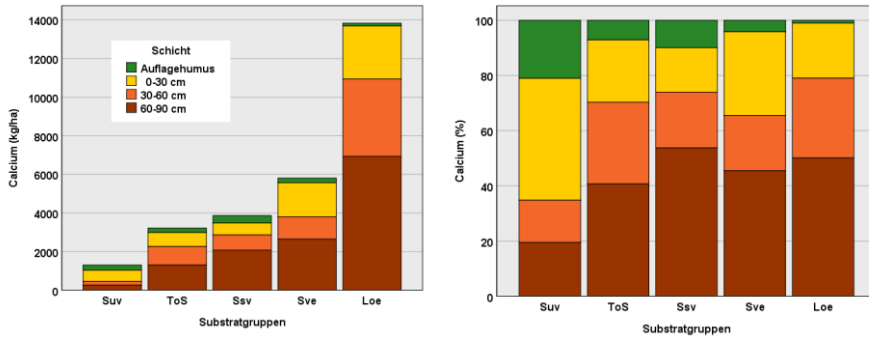


Abbildung 58: Austauschbare Calciumvorräte im Auflagehumus und den Tiefenstufen (0–30, 30–60, 60–90 cm) bei der BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen in kg/ha (links) und % (rechts); dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

Die Verteilung der Calciumvorräte in den Tiefenstufen zeigt zwischen den Substratgruppen typische Muster. Bei den Substratgruppen mit eher geringen Vorräten (v. a. unverlehmtter Sand) sind die relativen Anteile an Calcium im Auflagehumus mit Werten bei 20 % am höchsten. Mit zunehmenden Calcium-Gesamtvorräten nehmen die relativen Anteile im Auflagehumus ab, die Substratgruppe Lösslehm weist nur noch 1 %-Anteil Calcium im Auflagehumus am Gesamtvorrat auf. Umgekehrt steigen die relativen Anteile von Calcium in den tieferen Schichten an. Im unverlehmtten Sand sind 19 % der austauschbaren Calciumvorräte in den Tiefenstufen 30–90 cm gespeichert, im Lösslehm sind es 50 %.

Höhere Calciumvorräte bei der BZE II im Vergleich zur BZE I traten auf Gesamtprofilebene beim Lösslehm (+27 %) und den schwach verlehmtten Sanden (+8 %) auf, geringere beim Tonschiefer (-46 %), verlehmtten Sand (-3 %) und unverlehmtten Sand (-12 %). Diese Unterschiede waren jedoch auf Gesamtprofilebene in keinem Fall signifikant und wurden nicht dargestellt.

Signifikante Unterschiede bei den Calciumvorräten gab es im Auflagehumus und Tiefenstufen bei der Substratgruppe unverlehmtter Sand (s. Abb. 59), die sich auf Profilebene jedoch ausgleichen.

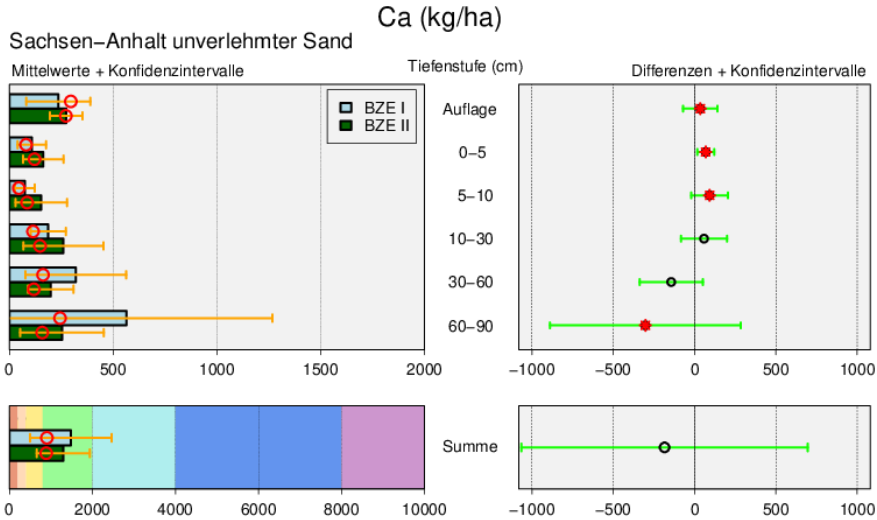


Abbildung 59: Austauschbare Calciumvorräte [kg/ha] der Substratgruppe unverlehmter Sand sachsen-anhaltischer Waldböden als Mittelwert für die BZE I ( $n = 33$ ) und II ( $n = 39$ ) in der linken Spalte und Differenz BZE II - BZE I ( $n = 30$ ) in der rechten Spalte nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Bezogen auf die Calciumvorräte der BZE I nahm Calcium im Auflagehumus um 15 %, in den Tiefenstufen 0–5 cm um 63 %, 5–10 cm um 124 % und 10–30 cm um 31 % zu, in den Tiefenstufen 30–60 cm um 45 % und 60–90 cm um 53 % ab. Mit Ausnahme der Tiefenstufen 10–30 cm und 30–60 cm konnten die Unterschiede signifikant abgesichert werden. Demnach stehen im Oberboden bis 30 cm Calciumzunahmen von insgesamt 254 kg/ha Verlusten ab 30 cm Bodentiefe von rund 450 kg/ha Calcium gegenüber. Der Saldo von rund 180 kg/ha Calcium bedeutet bezogen auf das Gesamtprofil der BZE I einen Verlust von 12 %, der nicht signifikant ist. Der Median auf Profilebene liegt bei -7 kg/ha Calcium und bestätigt weitgehend ähnliche Calciumvorräte auf Profilebene zwischen den Erhebungen.

Die Flugascheeinträge in Sachsen-Anhalt beeinflussen die Verteilung der Calciumvorräte erheblich. Dies wird bei der Unterteilung nach Flugascheneinfluss der BZE-Punkte in der Substratgruppe unverlehmter Sand deutlich (Abb. 60).

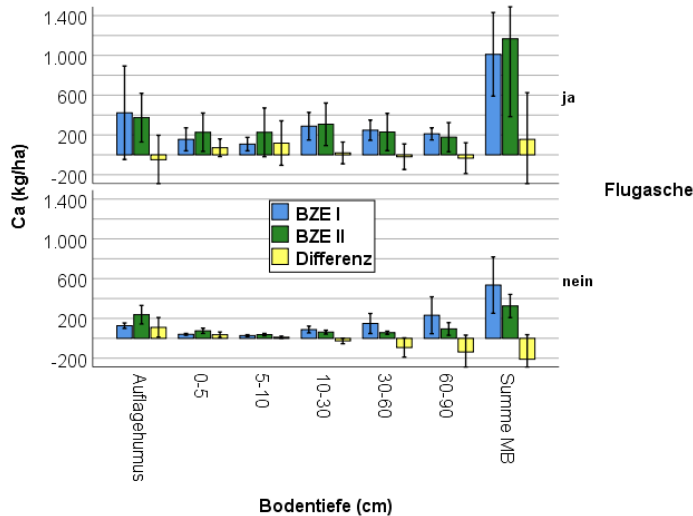


Abbildung 60: Austauschbare Calciumvorräte [kg/ha] der Substratgruppe unverlehmter Sand sachsen-anhaltischer Waldböden als Mittelwert für Flugasche beeinflusste BZE-Punkte (oben,  $n = 11$ ) und unbeeinflusste (unten,  $n = 19$ ), jeweils als Mittelwert für die BZE I, BZE II und Differenz (ohne 2 Extreme)

Auffällig sind die deutlich höheren Calciumvorräte sowohl in der BZE I und BZE II der Flugasche beeinflussten Standorte, vor allem im Auflagehumus und den Tiefenstufen bis 60 cm Bodentiefe. Auf Profilebene erreichen die Flugasche-Standorte mehr als doppelt so hohe Calciumvorräte. Bei den Flugasche-Standorten kommt es in der Tendenz im Auflagehumus zu Calciumverlusten, im oberen Mineralboden zu Zunahmen und leichten Verlusten im Unterboden ab 30 cm Bodentiefe. Bei den von Flugasche unbeeinflussten Standorten zeigen sich dagegen signifikante Zunahmen im Auflagehumus, 0–5 und 5–10 cm Bodentiefe sowie deutliche Abnahmen im Unterboden, signifikant für 60–90 cm Bodentiefe. Die Veränderungen auf Profilebene waren weder in der von Flugasche beeinflussten noch unbeeinflussten Kollektiv signifikant.

### 6.5.3.2 Magnesium

Magnesium hat im Vergleich zu Calcium deutlich geringere Anteile an den basischen austauschbaren Kationen. So belegt Calcium in Abhängigkeit der Tiefenstufe im Mittel Sachsen-Anhalts 16–27 % der Austauschkapazität, Magnesium dagegen zwischen 3–6 % (vgl. Kap. 6.5.1.2). In Sachsen-Anhalts Waldböden variieren die bis 90 cm Bodentiefe aufsummierten Vorräte von 30 kg bis 7 t/ha. Diese Spanne deckt alle Bewertungsbereiche ab. Die geringsten Magnesiumvorräte finden sich in einer Braunerde in der Substratgruppe unverlehmter Sand bei Tangerhütte östlich der

Colbitz-Letzlinger Heide, die höchsten in der Hochflutablagerung bei Magdeburg, die auch die höchsten Calciumvorräte und höchste Austauschkapazität aufweist.

In Abbildung 61 sind die durchschnittlichen austauschbaren Magnesiumvorräte für Sachsen-Anhalt dargestellt.

Mit rund 590 kg/ha Magnesium in der Humusaufgabe und dem Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe liegen die durchschnittlichen Vorräte in Sachsen-Anhalts Waldböden im mittel-hohen Bewertungsbereich und sind damit deutlich geringer als das Mittel der Bundesländer Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Hessen (s. Abb. 61, Teilgrafik c). Vor allem in den Bodentiefen ab 30 cm ist der Mittelwert in Sachsen-Anhalt deutlich niedriger als der Drei-Länder-Mittelwert. Dies liegt an den hohen Magnesiumvorräten in Hessens Waldböden, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt sind hinsichtlich der Verteilung Magnesiumvorräte sehr ähnlich.

Insgesamt gab es zwischen beiden BZE-Erhebungen auf Profilebene eine leichte signifikante Zunahme um 5 kg/ha, was bezogen auf den Vorrat der BZE I einer Zunahme von 1 % entspricht. Der Median der Veränderungen lag bei 29 kg/ha deutlich höher, bezogen auf den Median der BZE I entspricht dies einer Zunahme um 18 %. Im Auflagehumus sind zum Zeitpunkt der BZE II mit 44 kg/ha Magnesium rund 8 % des Gesamtvorrates bis 90 cm Bodentiefe gespeichert. Die Magnesiumvorräte im Auflagehumus haben zwischen den beiden BZE-Erhebungen im Mittel für Sachsen-Anhalt um 7 % signifikant zugenommen. Dies ist vor allem auf die Zunahme der Trockenmasse zurückzuführen. Im Oberboden wurden ebenfalls signifikant höhere Vorräte in den Tiefenstufen 0–5 cm (+16 %) und 5–10 cm (+19 %) festgestellt. In 10–30 und 30–60 cm Bodentiefe gab es nur geringfügige, nicht signifikante Veränderungen unter 2 %, in 60–90 cm Bodentiefe nahmen die Magnesiumvorräte signifikant um 2 % bezogen auf den Vorrat der BZE I ab.



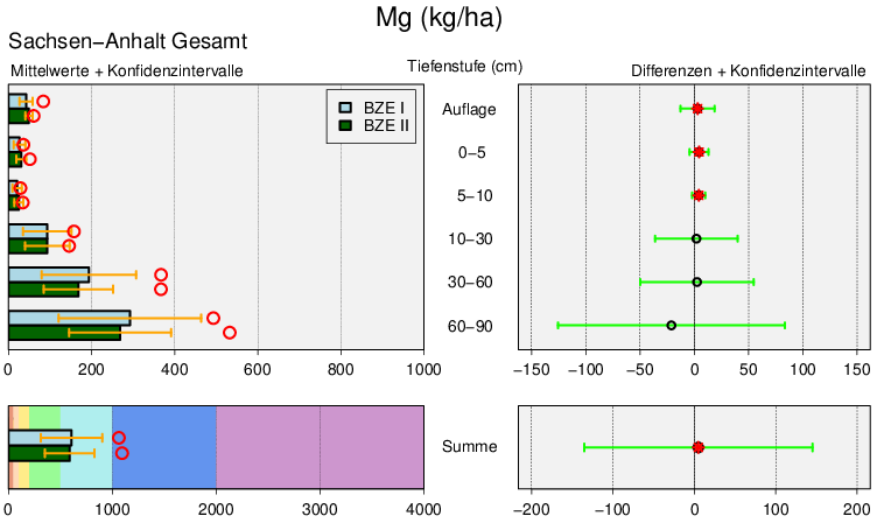


Abbildung 61: Austauschbare Magnesiumvorräte [kg/ha] in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 64) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Die Magnesiumvorräte zeigen – ähnlich wie die Calciumvorräte – deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von den Substratgruppen:

Die Quarzite, Granite und unverlehmten Sande entfallen mit mittleren 100 kg/ha Magnesiumvorrat im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm in den geringen Bewertungsbereich, wobei einige BZE-Punkte im unverlehmten Sand auch in höheren Bewertungsbereichen liegen. (s. Abb. 62). Deutlich besser sind die Grauwacken und Kreidesandsteine im unteren mittleren Bereich sowie der Tonschiefer und die (schwach) verlehmtten Sande überwiegend im mittleren Bewertungsbereich zwischen 200–500 kg/ha zu bewerten. Die organisch geprägten Standorte und Basalt/Diabas weisen Magnesiumvorräte im mittel-hohen, der Lösslehm, Zechstein und Lehm im hohen bis sehr hohen Bewertungsbereich über 1000 kg/ha Magnesium auf.

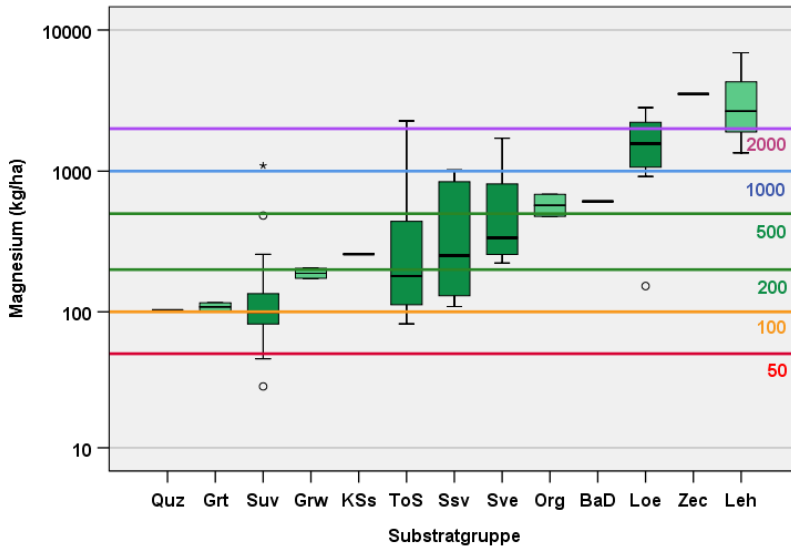


Abbildung 62: Verteilung der austauschbaren Magnesiumvorräte [kg/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in sachsen-anhaltischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (Ordinate logarithmisch skaliert) (BaD: Basalt/Diabas, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, KSs: Kreidesandstein, Leb: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer; Zec: Zechstein, Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148, hellgrün:  $n \leq 3$ , dunkelgrün  $n > 3$ )

Ähnlich der Verteilung der Calciumvorräte weisen auch die Magnesiumvorräte auf den eher ärmeren Standorten die höchsten Anteile von Magnesium im Auflagehumus auf (s. Abb. 63). Dies betrifft besonders auf die unverlehmtten Sande zu, hier sind 26 % des Magnesiums im Auflagehumus gespeichert. In der Substratgruppe Lösslehm dagegen sind es nur 2 % des Magnesiumvorrats vom Gesamtprofil im Auflagehumus enthalten. Die relativen Anteile des Magnesiumvorrats in den Tiefenstufen 30–90 cm liegen zwischen 50 bis über 80 %, der überwiegende Teil ist in der Tiefenstufe 60–90 cm gespeichert (30–66 %) und damit deutlich stärker als Calcium auf untere Bodenschichten konzentriert.

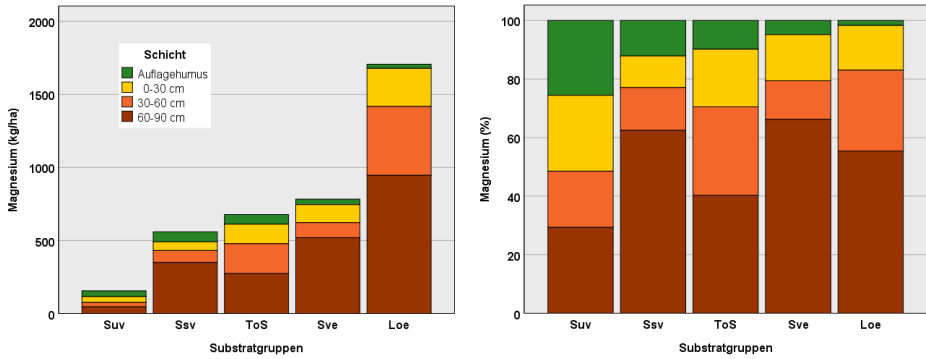
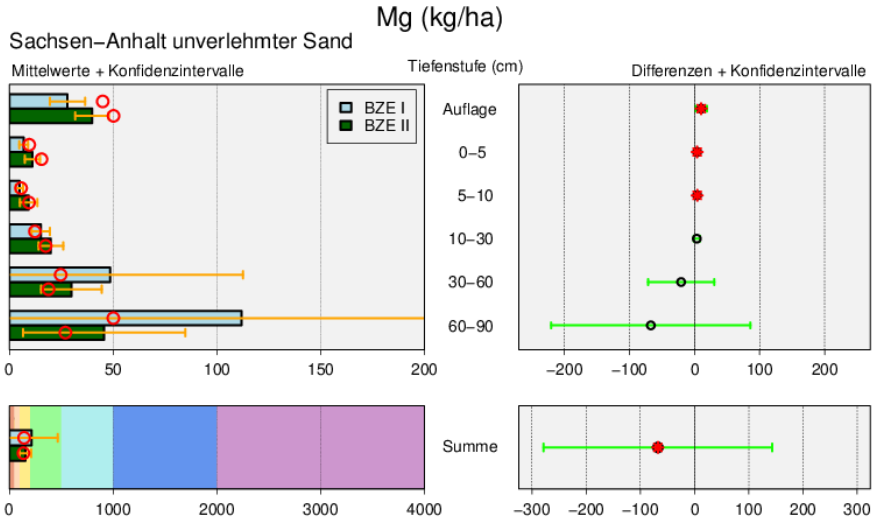


Abbildung 63: Austauschbare Magnesiumvorräte im Auflagehumus und den Tiefenstufen (0–30, 30–60, 60–90 cm) bei der BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen in kg/ha (links) und % (rechts); dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, SuV: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

Höhere Magnesiumvorräte bei der BZE II im Vergleich zur BZE I traten auf Gesamtprofilebene beim Lösslehm (+24 %) und verlehmtten Sanden (+5 %) auf, geringere beim Tonschiefer (-15 %), schwach verlehmtten (-10 %) und unverlehmtten Sand (-32 %). Diese Unterschiede waren auf Gesamtprofilebene nur für den unverlehmtten Sand signifikant.

Signifikante Unterschiede im Auflagehumus und den Tiefenstufen bei den Magnesiumvorräten gab es nur bei der Substratgruppe unverlehmtter Sand (s. Abb. 64).



*Abbildung 64: Austauschbare Magnesiumvorräte [kg/ha] der Substratgruppe unverlehmter Sand sachsen-anhaltischer Waldböden als Mittelwert für die BZE I ( $n = 33$ ) und II ( $n = 39$ ) in der linken Spalte und Differenz BZE II - BZE I ( $n = 30$ ) in der rechten Spalte nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.*

Im unverlehmten Sand kam es zu signifikanten Zunahmen im Auflagehumus (+36 % bezogen auf die BZE I) sowie den Tiefenstufen 0–5 (+57 %) und 5–10 cm (+82 %). Diesen relativ hohen Zunahmen im Oberboden stehen nicht signifikante und hohe Verluste in den Tiefenstufen 30–60 und 60–90 cm gegenüber. Damit ergibt sich ein auf Profilebene signifikanter Verlust von Magnesium von 32 % bezogen auf die BZE I. Der Median der Veränderungen auf Profilebene liegt dagegen mit 29 kg/ha Magnesium bei einer Zunahme um 38 % bezogen auf den Median der BZE I. Der Median wird als realistischere Einschätzung der Veränderung eingestuft, da extreme Magnesiumverluste einzelner BZE-Punkte den Durchschnitt deutlich vermindern.

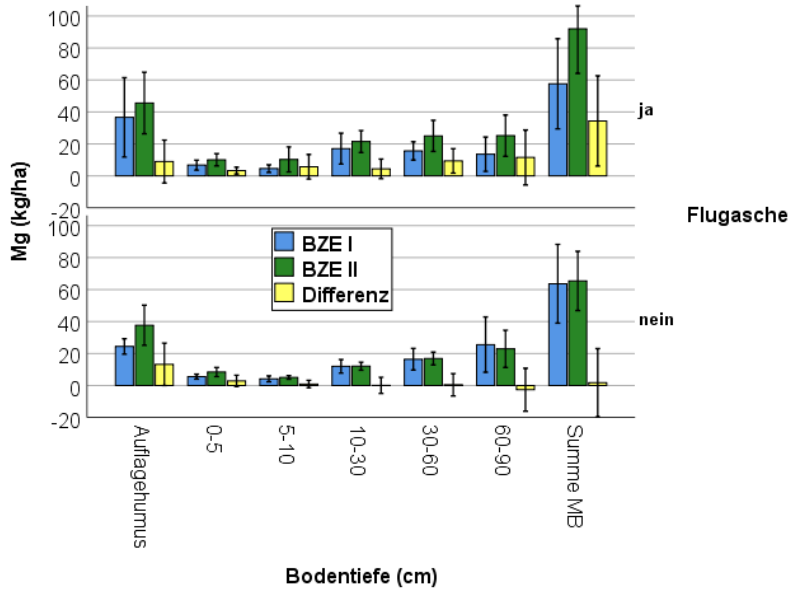


Abbildung 65: Austauschbare Magnesiumvorräte [kg/ha] der Substratgruppe unverlehmter Sand sachsen-anhaltischer Waldböden als Mittelwert für Flugasche beeinflusste BZE-Punkte (oben, n = 11) und unbeeinflusste (unten, n = 19), jeweils als Mittelwert für die BZE I, BZE II und Differenz (ohne 2 Extreme)

Auffällig sind analog zu Calcium die deutlich höheren Magnesiumvorräte sowohl in der BZE I und BZE II der Flugasche beeinflussten Standorte in der Substratgruppe unverlehmter Sand. Auf Profilebene erreichen die Flugasche-Standorte um 30 % höhere Magnesiumvorräte als die nicht von Flugasche beeinflussten Standorte. Bei den Flugasche-Standorten kommt es im Auflagehumus und allen Tiefenstufen von der BZE I zur BZE II zu höheren Magnesiumvorräten, die im Mineralboden signifikant sind. Die Zunahmen steigen mit zunehmender Bodentiefe und summieren sich auf Profilebene auf eine signifikante Zunahme von 46 % bezogen auf die Profilsomme der BZE I. Im nicht von Flugasche beeinflussten Kollektiv des unverlehmten Sandes kommt es im Auflagehumus ebenfalls zu deutlichen Zunahmen, die im Unterschied zum Flugasche-Kollektiv signifikant sind. Die Veränderungen im Mineralboden sind deutlich geringer und in keinem Fall signifikant. Auf Profilebene ergibt sich auch im nicht von Flugasche beeinflussten Kollektiv eine Zunahme von Magnesium von +17 % bezogen auf die BZE I, die aber ebenfalls nicht signifikant ist.

### 6.5.3.3 Kalium

Bei Kalium decken die an den BZE-Punkten im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe vorkommenden Vorräte fast das gesamte Spektrum der Bewertungsskala ab. Die Spanne reicht von 120 kg/ha Kalium eines Rankers aus Quarzit im Harz bei Ilsenburg bis 2.880 kg/ha einer Hochflutablagerung bei Magdeburg, die auch schon mit den höchsten Vorräten an Calcium und Magnesium sowie der höchsten Austauschkapazität aufgefallen ist.

Die mittleren Kaliumvorräte und Veränderungen zwischen BZE I und II für Sachsen-Anhalt sind nach Tiefenstufen in Abbildung 66 dargestellt.

Mit 470 kg/ha Kalium bei der BZE I und 756 kg/ha bei der BZE II sind die mittleren Vorräte an Kalium im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe vom gering-mittleren in den mittleren Bewertungsbereich gestiegen. Die Differenz in der Schnittmenge von 266 kg ist signifikant und rechnerisch eine ungewöhnliche Erhöhung des austauschbaren Kaliumvorrates um 54 % bezogen auf die Werte der BZE I (s. Abb. 66, Teilgrafik d).

In der BZE II sind im Auflagehumus mit 65 kg/ha Kalium knapp 9 % des Gesamtvorrates gespeichert. Bezogen auf gleiche Schichtmächtigkeit verteilen sich die Vorräte im Mineralboden im Unterschied zu Calcium und Magnesium relativ gleichmäßig über alle Bodentiefen hinweg (s. Abb. 66, Teilgrafik a).

In allen Tiefenstufen und im Auflagehumus kam es zu signifikanten Zunahmen der Kaliumvorräte von der BZE I zur BZE II. Die Zunahmen im Auflagehumus mit 36 % und 24 % in der Tiefenstufe 0–5 cm bezogen auf die BZE I stehen deutlich hinter den Zunahmen der Tiefenstufe 5–10 cm mit fast 80 % und den tieferen Stufen mit Werten zwischen 56–68 % zurück, sie sind aber alle auffällig hoch.

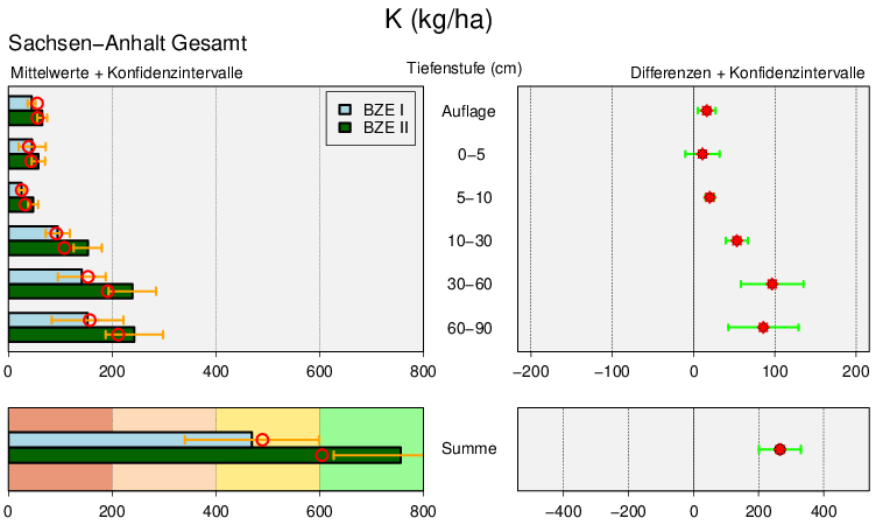


Abbildung 66: Austauschbare Kaliumvorräte [kg/ha] in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 64) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Im Unterschied zu den Calcium- und Magnesiumvorräten liegen die Kaliumvorräte der BZE II in den Substratgruppen deutlich häufiger in den sehr geringen und geringen Bewertungsstufen (s. Abb. 67). Sehr geringe (unter 200 kg/ha) bis geringe Vorräte (zwischen 200–400 kg/ha) Kalium treten beim Quarzit, organisch geprägten Standorten, Basalt/Diabas, Granit und Kreidesandstein auf. Im Median gering-mittlere Vorräte weisen Grauwacke und unverlehmte Sande auf; Tonschiefer, verlehmtter Sand und schwach verlehmtter Sand liegen mit ihren Medianen bereits im mittleren und mittel-hohen Bereich. Zechstein, Lösslehm und Lehm weisen hohe bis sogar sehr hohe Kaliumvorräte auf.

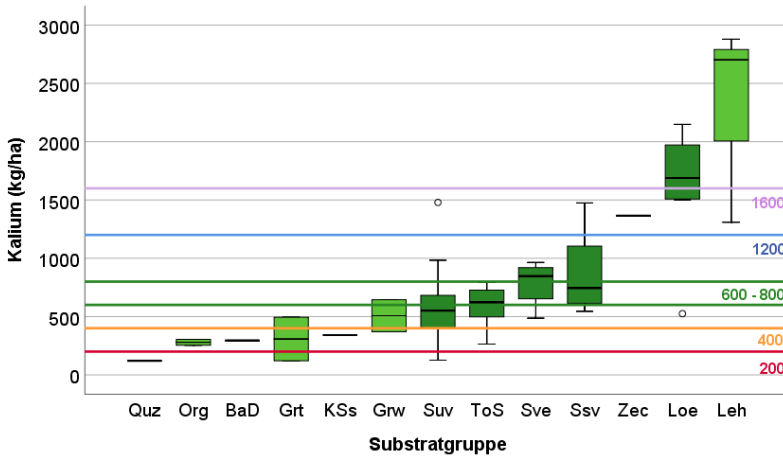


Abbildung 67: Verteilung der austauschbaren Kaliumvorräte [kg/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in sachsen-anhaltischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (BaD: Basalt/Diabas, Grt: Granit, Grw: Granwacke, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarzlit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer; Zec: Zechstein, Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148, hellgrün:  $n \leq 3$ , dunkelgrün:  $n > 3$ )

Ähnlich wie Calcium und Magnesium liegt austauschbares Kalium auf den ärmeren Standorten der schwach- und unverlehmtten Sande und des Tonschiefers mit höheren Anteilen um 10 % im Auflagehumus vor, bei den besser versorgten Standorten der verlehmtten Sande und des Lösslehm betragen diese Anteile nur 6 bzw. 3 % (s. Abb. 68). Beim unverlehmtten und verlehmtten Sand sowie bei Lösslehm sind die Kaliumvorräte im Mineralboden annähernd gleich verteilt. Im Tonschiefer nehmen die relativen Anteile mit zunehmender Bodentiefe aufgrund des Skelettanteils ab, beim verlehmtten Sand aufgrund der höheren Lehmenteile zu. Im Unterschied zu Calcium und Magnesium sind im Mittel die relativen Kaliumvorräte im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe wesentlich höher.



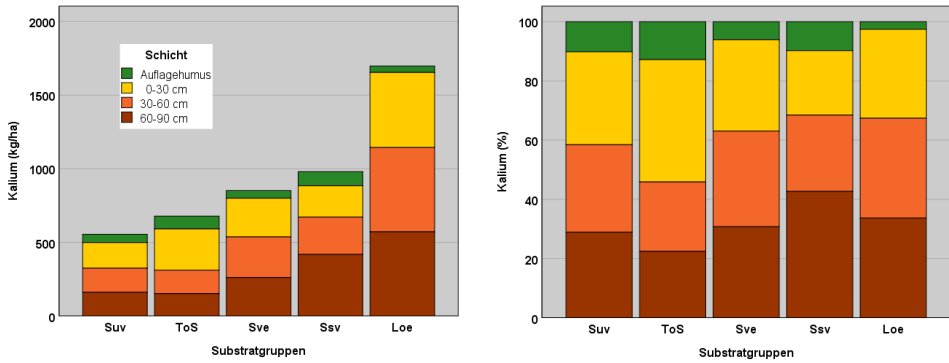


Abbildung 68: Austauschbare Kaliumvorräte im Auflagehumus und den Tiefenstufen (0–30, 30–60, 60–90 cm) bei der BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen in kg/ha (links) und % (rechts); dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

Signifikante Veränderungen auf Profilebene ergaben sich für Kalium nur in der Substratgruppe unverlehmtter Sand, hier kam es zu erheblichen signifikanten Zunahmen im Auflagehumus und in allen Tiefenstufen (s. Tab. 69).

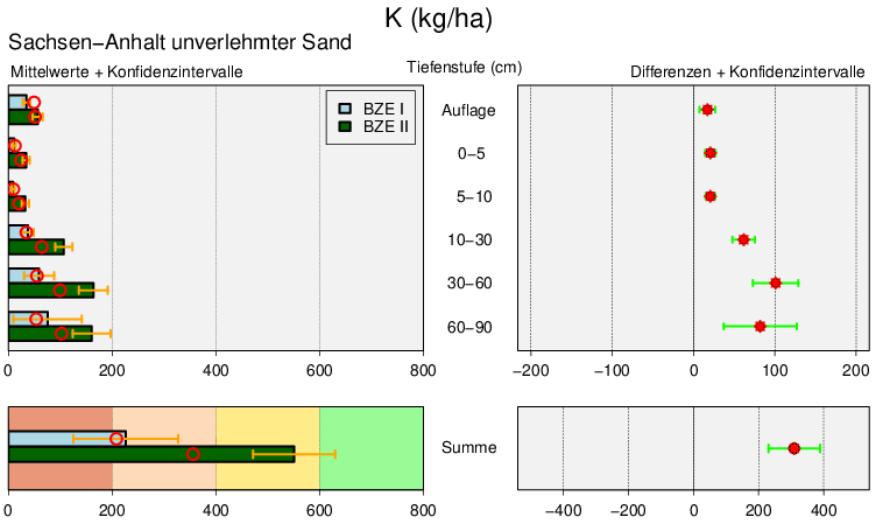


Abbildung 69: Austauschbare Kaliumvorräte [kg/ha] in den Waldböden Sachsen-Anhalts für die Substratgruppe unverlehmtter Sand als Mittelwert für die BZE I (n = 33) und II (n = 39) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 30) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Die Kaliumvorräte nahmen in den Tiefenstufen zwischen 110 % (60–90 cm) bis 225 % (5–10 cm) bezogen auf den Vorrat der BZE I zu und haben sich mit einer Zunahme um rund 310 kg/ha (+128 %) auf Profilebene mehr als verdoppelt.

In der Substratgruppe Lösslehm nahmen die Vorräte in den Tiefenstufen 0–5, 5–10 und 10–30 cm insgesamt um 30 % bezogen auf den Vorrat der BZE I signifikant zu, die Zunahme auf Profilebene um 320 kg (+26 %) ließ sich jedoch nicht absichern.

In allen anderen Substratgruppen ergaben sich keine signifikanten Unterschiede.

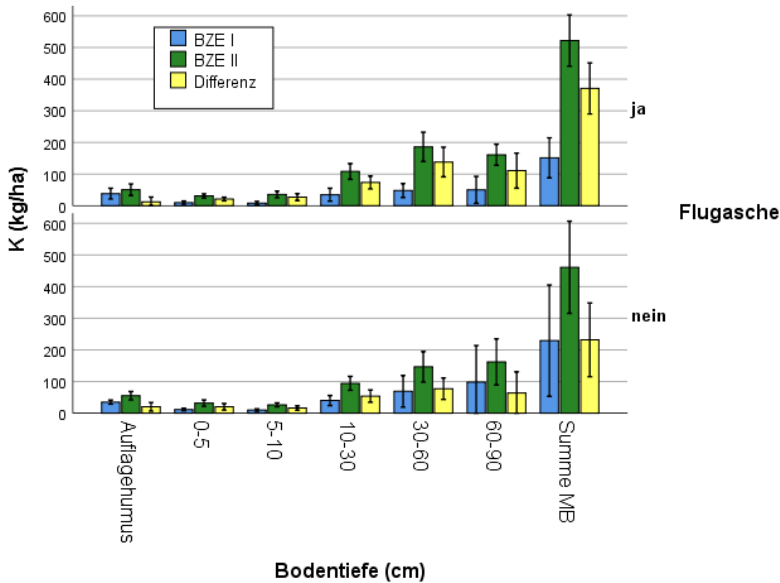


Abbildung 70: Austauschbare Kaliumvorräte [kg/ha] der Substratgruppe unverlehmter Sand sachsen-anhaltischer Waldböden als Mittelwert für Flugasche beeinflusste BZE-Punkte (oben,  $n = 12$ ) und unbeeinflusste (unten,  $n = 20$ ), jeweils als Mittelwert für die BZE I, BZE II und Differenz

Im Gegensatz zu den Vorräten von Calcium und Magnesium sind die Kaliumvorräte in der BZE I und BZE II der einzelnen Tiefenstufen zwischen den Flugasche beeinflussten und unbeeinflussten Standorten weniger unterschiedlich. Die Zunahmen an Kalium sind jedoch in den Tiefenstufen im Kollektiv der Flugasche beeinflussten BZE-Punkte höher als im Flugasche unbeeinflussten Kollektiv.

Bei den Flugasche-Standorten kommt es im Auflagehumus und allen Tiefenstufen von der BZE I zur BZE II zu höheren Kaliumvorräten, die im Mineralboden signifikant sind. Die Zunahmen steigen mit zunehmender Bodentiefe und summieren sich auf Profilebene auf eine signifikante Zunahme von 200 % bezogen auf die

Profilsomme der BZE I. Im nicht von Flugasche beeinflussten Kollektiv des unverlehnten Sandes kommt sowohl im Auflagehumus als auch im Mineralboden zu signifikanten Zunahmen, die im Unterschied zum Flugasche-Kollektiv jedoch insgesamt geringer sind. Auf Profilebene ergibt sich im nicht von Flugasche beeinflussten Kollektiv eine Zunahme von Kalium um +94 % bezogen auf die BZE I. Damit verdreifachten sich die Vorräte an Kalium im Kollektiv der Flugasche und verdoppelten sich im Flugasche unbeeinflussten Kollektiv, jeweils von der BZE I zur BZE II bezogen auf Profilebene.

Die unerwartet hohen Zunahmen von Kalium in der BZE II gegenüber der BZE I, vor allem in den unteren Bodenschichten, lassen sich weder ökologisch noch durch anthropogene Einflüsse sinnvoll erklären oder begründen. Kaliumquellen wie z. B. durch Deposition sind in dieser Größenordnung zwischen der BZE I und BZE II in Sachsen-Anhalt flächig nicht belegt. Kaliumzunahmen dieser Größenordnung aus der Mineralverwitterung sind nicht zu erwarten.

Die Laborergebnisse der BZE I aus Sachsen-Anhalt stammen aus dem Labor der Landesanstalt für Forstplanung in Eberswalde, Brandenburg, die Laborergebnisse aus der BZE II aus dem Umweltlabor der NW-FVA (siehe auch Kap. 11). Aus den Ringanalysen zur BZE I sind hinsichtlich Kalium in der Austauschkapazität keine kritischen Abweichungen zwischen den teilnehmenden Laboren ersichtlich (KÖNIG u. WOLFF 1993), allerdings sind die an den Ringanalysen teilnehmenden Labore anonymisiert und nicht alle 13 Labore lieferten Werte zur Austauschkapazität. Es lagen für die Kationen der Austauschkapazität in der BZE I keine Nachweis- und Bestimmungsgrenzen vor.

In Abb. 71 sind alle Konzentrationen von Kalium klassiert in 31 Klassen mit gleicher prozentualer Belegung (Abszisse) nach Tiefenstufen in Stapelbalken nach ihrer Anzahl (Ordinate) im Kollektiv der BZE I und BZE II dargestellt. In allen Tiefenstufenbereichen existieren Messwerte aus der BZE I für Kalium unterhalb der Bestimmungsgrenze der BZE II (0,0026 g/kg) des Umweltlabors der NW-FVA (rote Linie). Dies betrifft insgesamt 16 % aller Messwerte für Kalium in der BZE I. Bei den Messungen in der BZE II wurde diese Bestimmungsgrenze in keinem Fall unterschritten. In der BZE I lagen 57 % aller Messwerte unterhalb einer Konzentration von 0,023 g/kg Kalium, in der BZE II waren es dagegen nur 10 % (blaue Linie). Dieser auffällig höhere Anteil relativ geringer Kaliumkonzentrationen in der BZE I in allen Tiefenstufen gegenüber der Verteilung der BZE II ist ein wesentlicher Grund für die deutlich höheren Vorräte von Kalium in der BZE II.

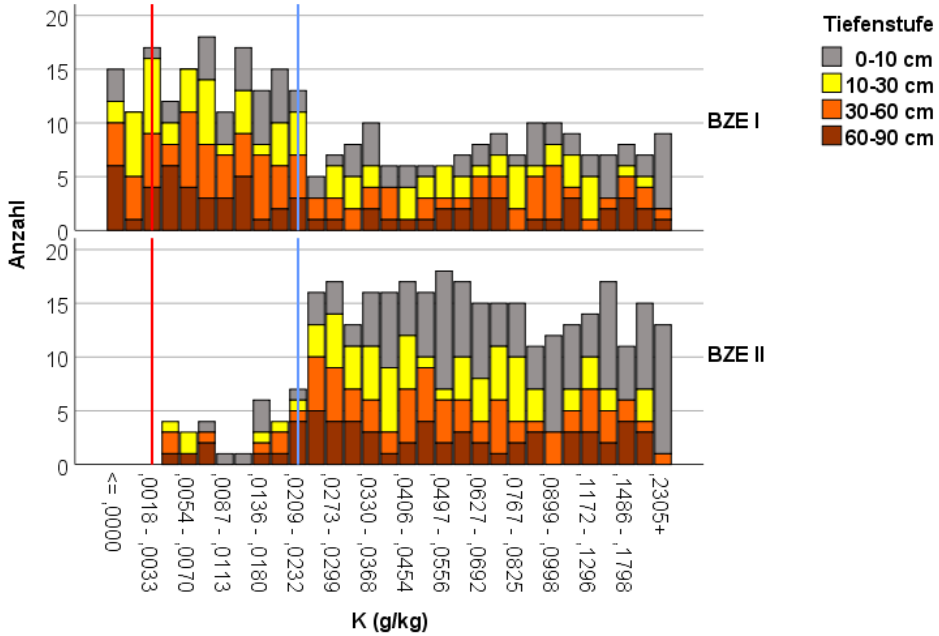


Abbildung 71: Kaliumkonzentrationen [g/kg] klassiert in prozentual gleich besetzte Intervalle der BZE I und BZE II für Sachsen-Anhalt, die Zuordnung der Horizonte der BZE I in Tiefenstufen erfolgte über die Horizontmitte

Aus diesem Grund wurde die Austauschkapazität von 40 Bodenproben aus der BZE I in Sachsen-Anhalt im Umweltlabor der NW-FVA im Januar 2021 nachanalysiert. Dabei wurden vor allem Proben aus den geringen Konzentrationsbereichen unterhalb von 0,023 g/kg Kalium in der BZE I (blaue Linie), aber auch Proben aus den höheren Konzentrationsbereichen ausgewählt. Die entsprechenden Proben waren im Probenlager der NW-FVA eingelagert.

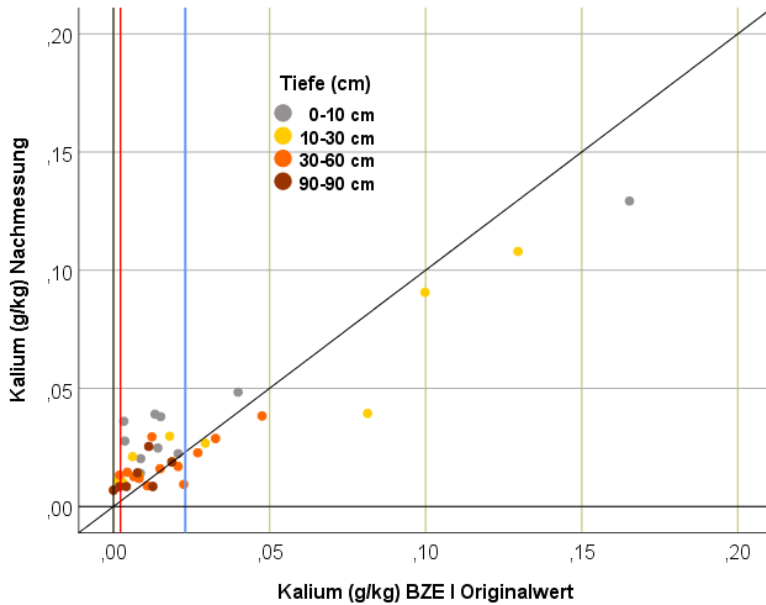


Abbildung 72: Kaliumkonzentrationen [g/kg] aus der BZE I (Abszisse) und aus der Nachanalyse 2021 (Ordinate) der Austauschkapazität der Rückstellproben aus der BZE I

Die Ergebnisse der Nachmessung sind in Abb. 72 den Originalwerten gegenübergestellt: Im Konzentrationsbereich unterhalb von 0,023 g/kg Kalium (blaue Linie) liegen die meisten Werte der Nachmessung deutlich oberhalb der Winkelhalbierenden, es wurden teilweise in der Nachmessung doppelt bis dreifach höhere Konzentrationen als in der BZE I gemessen. Die Unterschiede waren für den Tiefenbereich 0–10 cm mit im Mittel 2,86-fachen Konzentrationen in der Nachmessung am höchsten, in den Tiefenstufen 10–30 cm mit 2,2-fachen, 30–60 cm 1,13-fachen sowie 60–90 cm mit 1,75-fachen Werten in der Nachmessung ebenfalls deutlich höher als die Werte in der BZE I.

Im Sankey-Plot in Abb. 73 wird ersichtlich, dass keiner von den 4 geringsten Konzentrationsbereichen der BZE I (blaue Felder) durch die Nachmessung bestätigt wurde. Vielmehr ergaben die Nachmessungen hier bis zu 10fach höhere Werte. Insgesamt lagen 65 % aller nachgemessenen Proben anschließend in höheren Konzentrationsbereichen. Nur in 13 % wurde der identische Konzentrationsbereich in der Nachanalyse getroffen, bei 22 % lagen die Ergebnisse der Nachmessung unterhalb der Messwerte in der BZE I. In diesen Fällen zumeist nur in den nächst geringeren Konzentrationsbereichen.

Damit kann belegt werden, dass die Ursache der rechnerisch hohen Zunahmen an austauschbarem Kalium in fehlerhaften Analysen in der BZE I begründet sind. In den unteren Konzentrationsbereichen wurden in der BZE I zu geringe Konzentrationen ermittelt.

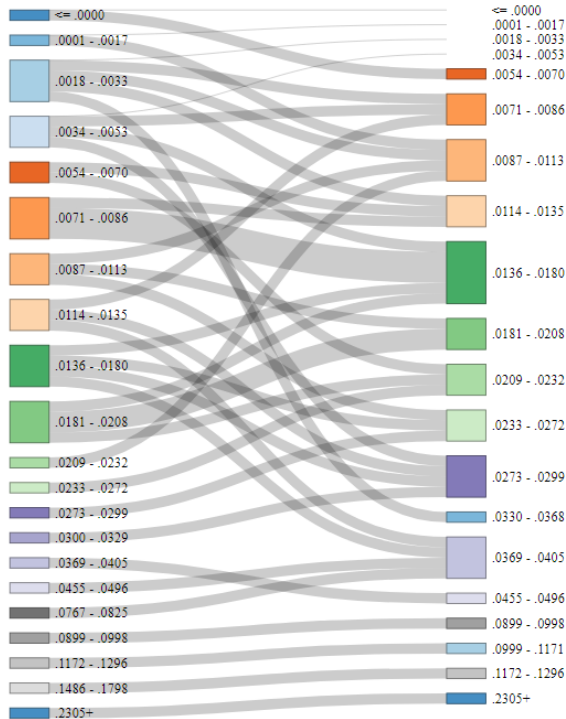


Abbildung 73: Sankey-Plot der Kaliumkonzentrationsbereiche [g/kg] aus der BZE I (links) und der Ergebnisse aus der Nachmessung (rechts) für 40 Proben der Rückstellproben aus der BZE I

#### 6.5.4 Vorräte austauschbarer Protonen, Eisen, Mangan und Aluminium

Bei den Protonen erhöhten sich die Vorräte in der BZE II in den Tiefenstufen 0–5 und 5–10 cm signifikant, bei den anderen Tiefenstufen ergaben sich keine signifikanten Veränderungen, auch nicht auf Ebene des Gesamtprofils. Bei Eisen dagegen erhöhten sich Vorräte in den Tiefenstufen von 0–60 cm signifikant, nicht jedoch signifikant im Gesamtprofil (s. Abb. 74).

Die zeitliche Entwicklung der austauschbaren Ma-Kationen-Vorräte Aluminium und Mangan (Abb. 75) zeigen von der BZE I zur BZE II im Gesamtprofil und den meisten Tiefenstufen deutliche und signifikante Zunahmen.

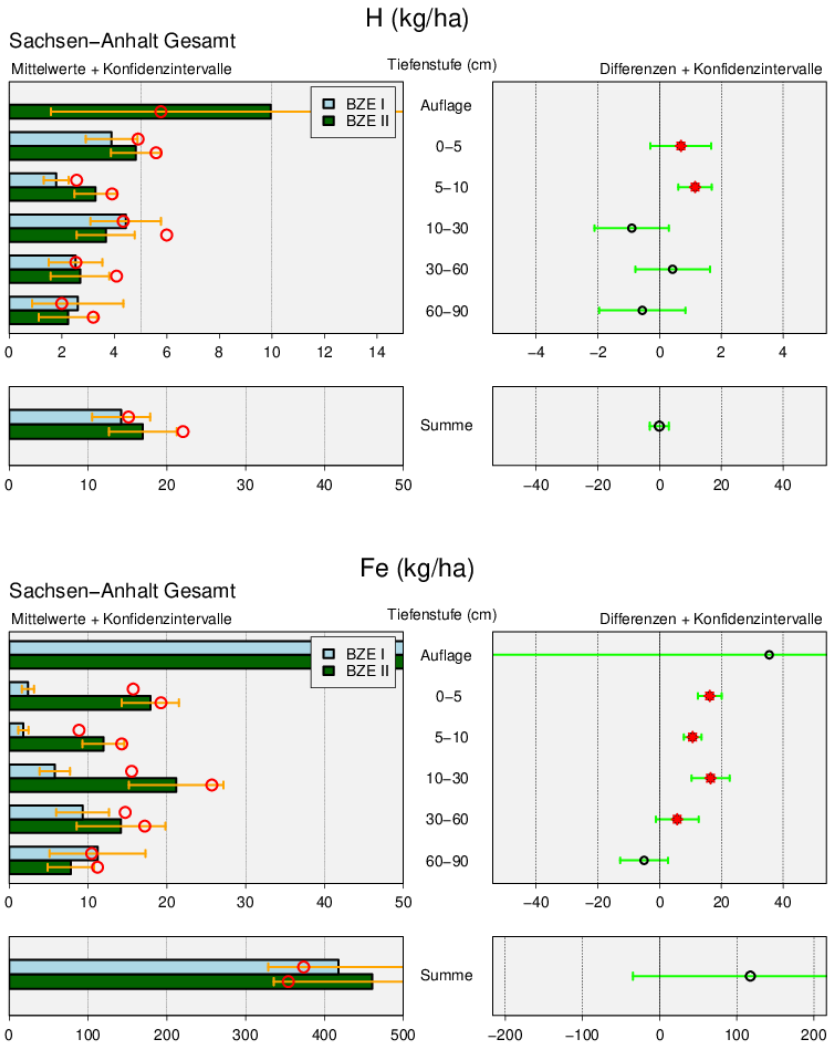


Abbildung 74: Vorräte [kg/ha] von Protonen (oben) und Eisen (unten) in den Waldböden Sachsen-Anhalts Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n=64) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

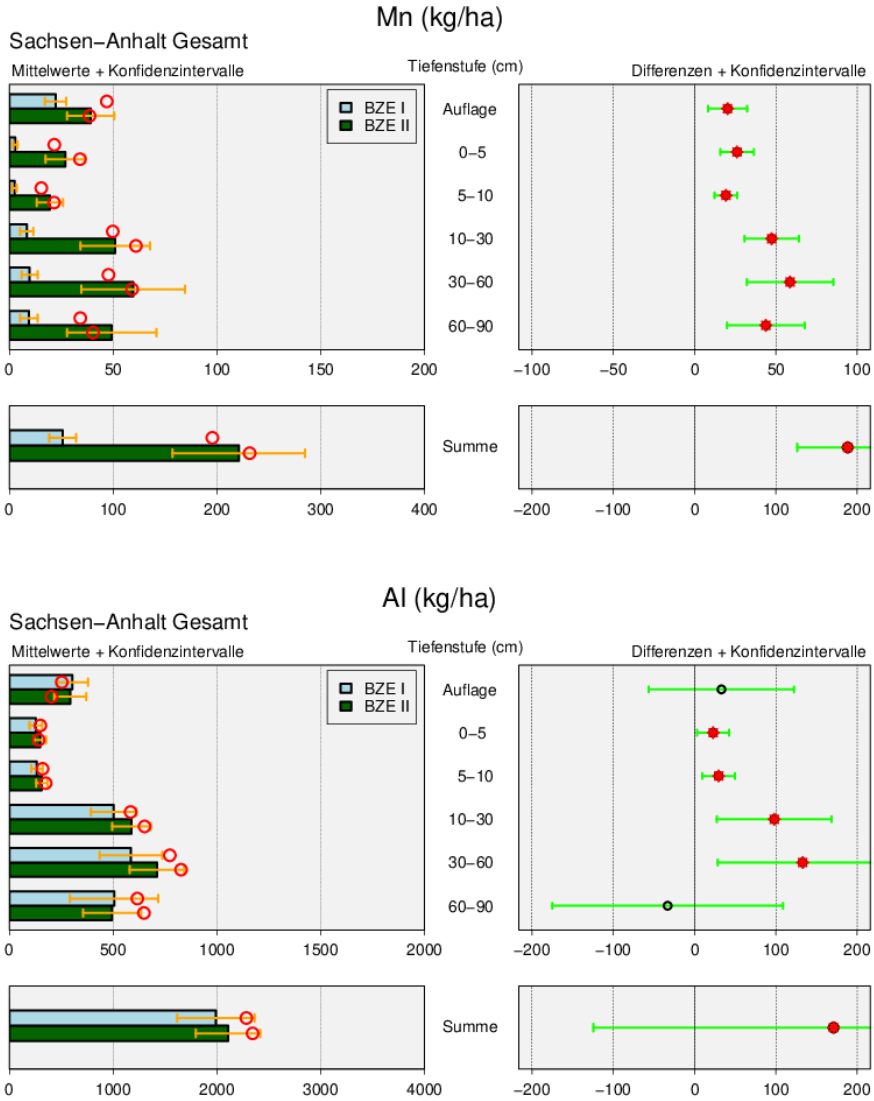


Abbildung 75: Vorräte [kg/ha] von Mangan (oben) und Aluminium (unten) in den Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n=64) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.



### 6.5.5 *pH-Werte und Pufferbereiche*

Der pH-Wert eines Bodens gilt als zentraler Indikator für seine chemischen Eigenschaften und kennzeichnet die Eignung des Bodens als Pflanzenstandort und Lebensraum für Bodenorganismen. Im Rahmen des chemischen Analyseprogramms der BZE wurden pH-Werte in wässriger Lösung ( $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ ) und in salzhaltigen Suspensionen ( $\text{pH}(\text{KCl})$  und  $(\text{CaCl}_2)$ ) gemessen. Bei der BZE I wurde neben dem  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  nur der  $\text{pH}(\text{KCl})$  bestimmt. Daher können im Zeitvergleich nur die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  und  $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte dargestellt werden. Der  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert gibt die aktuelle Protonenaktivität in der Lösungsphase des Auflagehumus beziehungsweise Mineralbodens an. Die pH-Werte ( $\text{KCl}$ ) und  $(\text{CaCl}_2)$  erfassen dagegen auch die unterschiedlich stark am Austausch- und an der organischen Substanz gebundene, durch die Salzsuspension gelösten Protonen. Die pH-Werte in Salzlösung liegen daher umso tiefer, je mehr Kationensäuren in einem Medium gebunden sind und gelöst werden konnten (MEIWES et al. 1984).

Die pH-Werte kennzeichnen sogenannte Pufferbereiche (s. Tab. 12), die eine Gliederung des chemischen Bodenzustandes und Rückschlüsse auf die Stabilität der Waldökosysteme zulassen (ULRICH 1981, 1986): Natürliche Waldböden weisen in Abhängigkeit von Ausgangsgestein und Bodenentwicklung verschiedene Puffersysteme auf, die bei Säurebelastung den pH-Wert des Bodens entsprechend ihrer chemischen Kapazität zu puffern vermögen. Auf reicheren Standorten sind dies der Carbonat- und Silikat-Pufferbereich, auf mittleren Standorten der Austausch- und auf ärmeren Standorten der Aluminium-, der Aluminium-/Eisen- sowie bei niedrigsten pH-Werten der Eisen-Pufferbereich. Pufferbereiche sind Indikatoren für resiliente Eigenschaften von Waldböden. Ein Puffersystem puffert bei Protonenzufuhr die Protonen ab und hält damit den pH-Wert der Bodenlösungssystem in einem bestimmten Bereich relativ konstant. Überschreitet die Säurefracht oder die Produktion von Protonen die Pufferrate, sinken die pH-Werte, d. h. der Boden versauert. Das Boden-Bodenlösungssystem kann dann in den folgenden Pufferbereich übergehen. Solange genügend Pufferkapazität zur Verfügung steht, sind die Versauerungsvorgänge teilweise reversibel. Bei abnehmender Säurebelastung und Unterschreitung der Pufferrate erhöht sich der pH-Wert wieder. Wechselt die Säurebelastung im Zeitverlauf, können die Böden zwischen verschiedenen Pufferbereichen wechseln (ULRICH 1983). Die Silikatverwitterung und die damit verbundene Protonenkonsorption findet sowohl bei höheren als auch bei niedrigeren pH-Werten statt, im Silikat-Pufferbereich puffern jedoch nur die Silikate (ULRICH 1981).

In der Regel wird für die Einteilung von Böden in Pufferbereiche der  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert herangezogen, beziehungsweise der pH-Wert in Gleichgewichtsbodenlösung. Diese Werte entsprechen im räumlichen Mittel den in der Bodenlösung aktuell vorhandenen pH-Werten (MEIWES et al. 1984).

Tabelle 12: Charakterisierung der Pufferbereiche (nach ULRICH 1981, verändert)

|  |
|--|
| Kohlensäure/Calcium-Carbonat ( $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) > 6,2$ )   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vorherrschende Pufferreaktion: Kalkauflösung</li> <li>- Humusform: Mull, rasche Streuumsetzung</li> <li>- Bodenbildungsprozess: Entkalkung, stabiles Bodengefüge, evtl. ungünstiges Ca/K-Verhältnis, Auswaschung von Calcium</li> <li>- keine Behinderung des Wurzelwachstums oder der Zersetzeraktivität aufgrund bodenchemischer Bedingungen, gute Wachstumsbedingungen aus bodenchemischer Sicht</li> </ul>  |
| Kohlensäure-Silikat ( $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ zwischen 6,2 und 5,0)  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vorherrschende Pufferreaktion: Verwitterung der primären Silikate unter Freisetzung von Nährstoffkationen</li> <li>- Humusform: Mull und Mullartiger Moder</li> <li>- Bodenbildungsprozess: Verbraunung und Tonverlagerung</li> <li>- optimale Nährstoffverfügbarkeit und ökologisches Optimum aus bodenchemischer Sicht</li> </ul>   |
| Austauscher ( $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ zwischen 5,0 und 4,2)  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vorherrschende Pufferreaktion: weitere Verwitterung der Restgitter primärer Silikate und Freisetzung von Al-Ionen aus Tonmineralen, Entstehung polymerer Aluminium-Hydroxo-Kationen und Verdrängung von Calcium, Magnesium sowie Kalium vom Austauscher und Auswaschung mit der Bodenlösung</li> <li>- Humusform: Mullartiger Moder und Moder</li> <li>- Rückgang der Austauschkapazität und der biologischen Aktivität, Verbraunung des Bodens</li> <li>- Konkurrenzkraft anspruchsvoller Pflanzenarten geht zurück</li> </ul> |
| Aluminium ( $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ zwischen 4,2 und 3,8)  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pufferung: Auflösung der Aluminium-Hydroxo Kationen und sekundärer Tonminerale, Tonzerstörung, Freisetzung von Aluminium-Ionen und Protonen in die Bodenlösung</li> <li>- Humusform: Moder und Rohhumus</li> <li>- Podsoligkeit, geringe Basensättigung</li> <li>- zunehmende Einschränkung der Wuchsleistung durch den bodenchemischen Zustand</li> </ul>  |
| Aluminium-Eisen (zwischen $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 3,8 und 3,0)   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pufferung: Auflösung von Eisenhydroxiden und Aluminium-Hydroxo Kationen, Mobilisierung von Eisen und Huminstoffen, höhere Anteile von Aluminium, Eisen und Protonen in der Bodenlösung, zunehmender Säurestress</li> <li>- Humusform: schlechte Moderhumusformen, Rohhumus</li> <li>- stärkere Podsoligkeit, Podsolierung</li> <li>- Wachstumsstörungen der Bäume</li> </ul>  |
| Eisen ( $\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) < 3,0$ )  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pufferung: über Eisenhydroxidauflösung, hohe Kationensäurekonzentrationen in der Bodenlösung, sehr geringe Basensättigung am Austauscher</li> <li>- Humusform: Rohhumus, Hochmoortorf</li> <li>- starke Podsolierung</li> <li>- mögliche Wachstumsstörungen der Bäume</li> </ul>  |

Bei der Bewertung des aktuellen Säurezustands des Bodens in Reaktion mit dem Bodenwasser erfolgt die Zuordnung nach Pufferbereichen in bestimmten Bodenschichten anhand des  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wertes nach ULRICH (1983). Einschränkend ist allerdings, dass der  $\text{pH}$ -Wert zeitlich schwankt und damit die Interpretation eines einmaligen Messwertes unsicher ist (BLOCK et al. 2000). Die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte sind z. B. abhängig von der Verwitterung und Zusammensetzung des Mineralbodens, von Prozessen der mikrobiellen Mineralisierung und Umsetzung organischer Substanz, der Wurzelatmung, vom Niederschlagregime und Säureeinträgen, von Durchlüftung und Temperatur des Bodens sowie der Jahreszeit. Sie schwanken kleinräumig, kurzfristig und saisonal. Da die  $\text{pH}$ -Werte in salzhaltiger Suspension auch im Boden gespeicherte Kationensäuren einbeziehen, bilden diese  $\text{pH}$ -Werte auch abgelaufene, historische Versauerungsschübe ab und geben Hinweise auf Säurebelastungen, denen der untersuchte Boden einmal ausgesetzt war. Damit werden bei den  $\text{pH}$ -Werten in Salzlösung zeitliche und örtliche Schwankungen abgemildert. Die Messung in salzhaltiger Suspension wird daher als Maß für die Amplitude des chemischen Bodenzustandes im Hinblick auf die Protonenbelastung interpretiert (ULRICH 1983). Im Folgenden werden die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ - und  $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte dargestellt. Der  $\text{pH}$ -Wert in  $\text{CaCl}_2$  liegt nur für die BZE II vor. Er ist in seiner Bedeutung mit dem  $\text{pH}(\text{KCl})$  vergleichbar, liegt aber etwas höher.

#### 6.5.5.1 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$

In Abbildung 76 sind die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte des Auflagehumus und des Mineralbodens nach Tiefenstufen angegeben.

Die durchschnittlichen  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte der BZE I und BZE II im Mineralboden liegen über alle Tiefenstufen hinweg zwischen 4,4 und 4,9 und befinden sich damit in Sachsen-Anhalt im Austauscher-Pufferbereich (vgl. Tab. 12). Die  $\text{pH}$ -Wert Spanne reicht von 3,5 bis 8,0. Es kommen damit bis auf den Eisen-Pufferbereich jedoch alle Pufferbereiche vor.

Die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte der Auflage sind von durchschnittlich 4,6 bei der BZE I auf 4,4 bei der BZE II signifikant um 0,2  $\text{pH}$ -Einheiten gesunken. Die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in den Tiefenstufe 0–5 und 5–10 cm blieben mit Werten zwischen 4,4–4,5 weitgehend konstant. Mit zunehmender Bodentiefe steigen die Werte kontinuierlich bis knapp unter 5,0 in der Tiefenstufe 60–90 cm an. In der Tendenz gab es leichte Zunahmen, die für die Tiefenstufe 10–30 cm auch signifikant sind. Die wässrige Bodenlösung ist damit gegenüber der BZE I leicht weniger sauer.

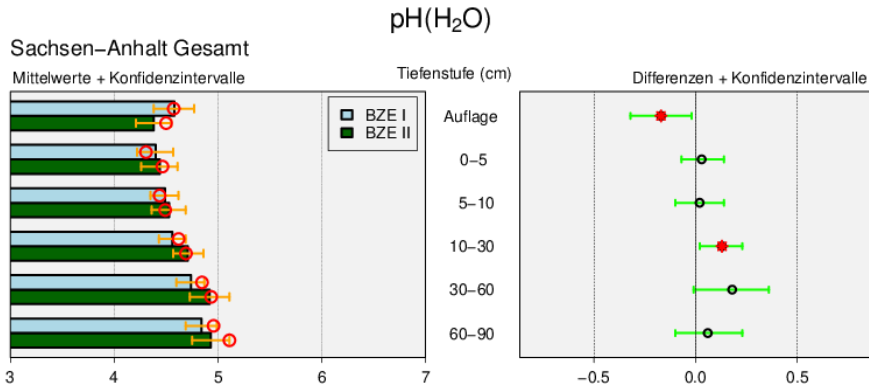


Abbildung 76: pH(H<sub>2</sub>O)-Werte in Waldböden Sachsen-Anhalts als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 64) (rechte Spalte) nach Auflagehumus und Tiefenstufen bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Die pH(H<sub>2</sub>O)-Werte der BZE II sind in Abbildung 104 nach Substratgruppen, Auflagehumus und Tiefenstufen dargestellt. Die Werte unterscheiden sich nach Bodenschicht und Substrat, es gibt aber typische Muster:

Die geringsten pH(H<sub>2</sub>O)-Werte finden sich erwartungsgemäß in den Substratgruppen der eher basenarmen Substrate, wie Tonschiefer und den schwach- und unverlehmten Sanden. Die Werte in der Auflage und der Tiefenstufe 0–5 cm befinden sich mit ihrem Median im Aluminium-Pufferbereich, mit zunehmender Bodentiefe steigen die meisten Werte in den Austauscher-Pufferbereich bis pH(H<sub>2</sub>O) 5,0 an. Die hohen pH(H<sub>2</sub>O)-Werte zwischen 5–6,7 im unverlehmten Sand sind dem Einfluss von Flugasche zuzuschreiben (siehe auch Abb. 79).

Die pH(H<sub>2</sub>O)-Werte in den Substratgruppen verlehmt Sand und Lösslehm liegen im Austauscher- und Kohlensäure-Silikat-Pufferbereich, im Niveau deutlich höher als die anderen Substratgruppen. Im verlehmt Sand nehmen die pH(H<sub>2</sub>O)-Werte mit zunehmender Bodentiefe ab, im Lösslehm bis 30 cm Bodentiefe, dann steigen sie wieder deutlich an, teilweise bis in den Carbonat-Pufferbereich.

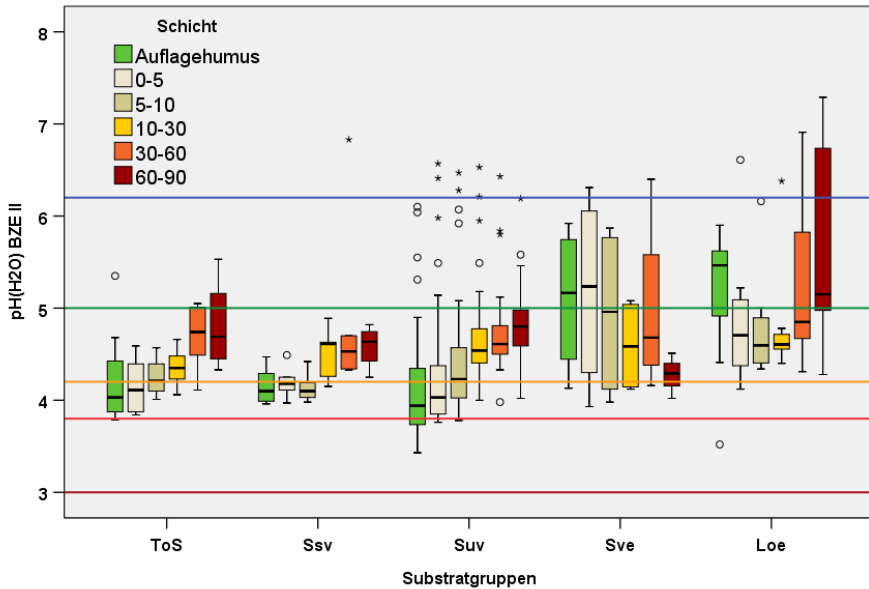


Abbildung 77:  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen und Pufferbereichen (farbige Linien); dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer); Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148)

Grundsätzlich steigen die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte mit zunehmender Bodentiefe in den Tiefenstufen 10–30, 30–60 und 60–90 cm kontinuierlich an, ein deutlicher Hinweis auf zunehmende Säureneutralisierungskapazität in tieferen Bodenschichten. Dennoch ist auffällig, dass sich die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte über weite Spannen der forstlichen Standorte und Bodentiefen überwiegend in einem relativ engen Wertebereich zwischen 4,2 und 5,0 im Austausch-Pufferbereich befinden. Neben natürlicher Bodenversauerung unter humiden Klimabedingungen ist dies Ausdruck langanhaltender Säureinträge, einer Erschöpfung der Puffersysteme und Nivellierung des bodenchemischen Zustandes.

Im Vergleich zur BZE I sind die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte bei der BZE II in den meisten Tiefenstufen der Substratgruppen leicht angestiegen (s. Abb. 78). Am deutlichsten ist dies in der Substratgruppe Lösslehm. Signifikant waren diese Veränderungen jedoch in keinem Fall.

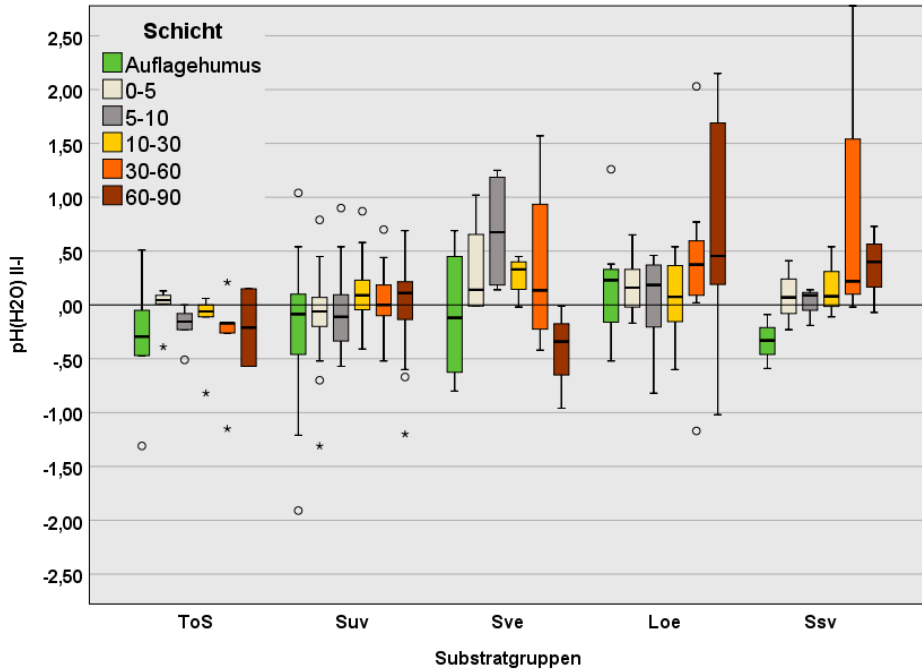


Abbildung 78: Differenzen (BZE II - BZE I) der  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen; dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten, die sowohl in der BZE I als auch in der BZE II beprobt wurden (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

Der Flugascheeinfluss zeigt sich auch bei den  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten. Innerhalb der Substratgruppe unverlehmtter Sand, in der sich die überwiegenden Flugasche beeinflussten BZE-Standorte befinden, sind die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte der Flugasche beeinflussten BZE-Punkte in allen Tiefenstufen höher als bei den unbeeinflussten BZE-Punkten (Abb. 79).

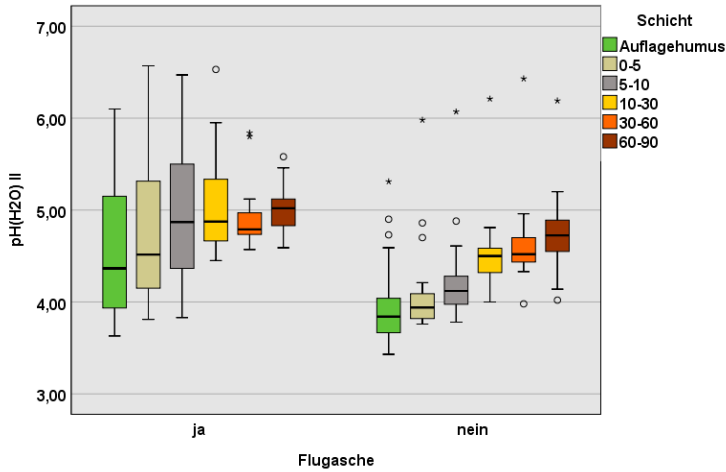


Abbildung 79:  $pH(H_2O)$ -Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Sachsen-Anhalt in der Substratgruppe unverlehmter Sand und Flugascheeinfluss (ja: n = 12, nein: n = 27)

Die hohen  $pH(H_2O)$ -Werte im von Flugasche unbeeinflussten Kollektiv über 6,0 sind auf eine Acker-Erstaufforstung als Folge einer Aufdüngung zurückzuführen.

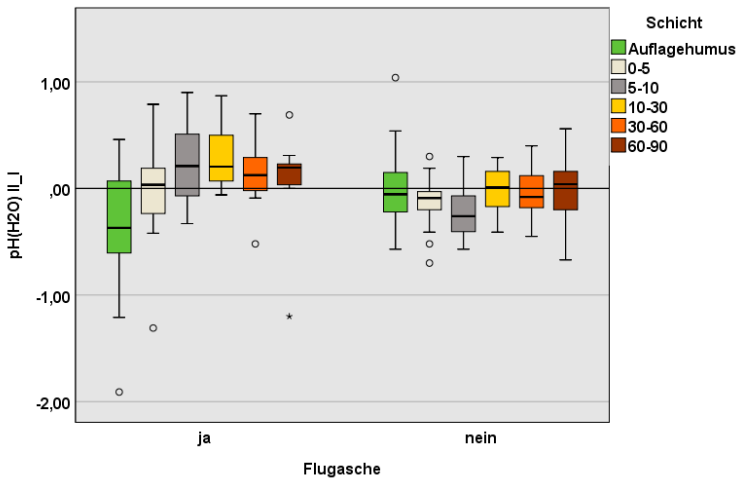


Abbildung 80: Differenzen (BZE II - BZE I) der  $pH(H_2O)$ -Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Sachsen-Anhalt in der Substratgruppe unverlehmter Sand nach Flugascheeinfluss (ja: n = 12, nein: n = 19)

Im Kollektiv der von Flugasche beeinflussten BZE-Punkte gab es zwischen der BZE I und BZE II eine deutliche Abnahme der  $pH(H_2O)$ -Werte im Auflagehumus. Die  $pH(H_2O)$ -Werte im Mineralboden dagegen nahmen in der Tendenz zu, in der

Tiefenstufe 10–30 cm auch signifikant. Im von Flugasche unbeeinflussten Kollektiv dagegen blieben die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte weitgehend konstant, im Oberboden kam es zu leichten Abnahmen in der BZE II.

Abbildung 81 zeigt die prozentuale Aufteilung der einzelnen Tiefenstufen im Mineralboden nach Pufferbereichen (nach ULRICH 1981) für die BZE I und BZE II:

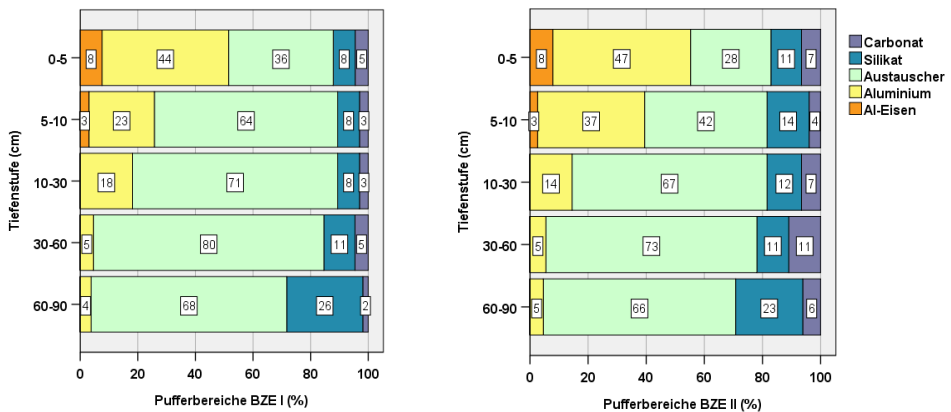


Abbildung 81: Mittlere Häufigkeiten der Pufferbereiche  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  in Prozent (nach ULRICH 1981) in sachsen-anhaltischen Waldböden für die BZE I (linke Spalte) und BZE II (rechte Spalte) nach Tiefenstufen [cm]

Mit zunehmender Bodentiefe nehmen die summierten Anteile im Carbonat-, Silikat- und Austauscher-Pufferbereich zu und die entsprechenden Anteile im Aluminium- und Eisen-Pufferbereich ab. In der Tiefenstufe 0–5 cm treten Aluminium- und Eisen-Pufferbereich zusammen in gut der Hälfte aller BZE-Punkte auf, diese Anteile gehen mit zunehmender Tiefenstufe auf 4 % in der BZE I bzw. 5 % in der BZE II in der Tiefenstufe 60–90 cm zurück. Unterhalb 5 cm Bodentiefe dominiert in allen Tiefenstufen der Austauscher-Pufferbereich. Der Silikat-Pufferbereich liegt zwischen 8–11 % bis 60 cm Bodentiefe und 26 % in 60–90 cm. Der Carbonat-Pufferbereich ist mit 2–11 % vertreten.

Die Verteilungen zwischen den BZE-Erhebungen unterscheiden sich in höheren Anteilen am Aluminium-Pufferbereich in 0–5 und 5–10 cm Bodentiefe in der BZE II, vor allem in der Tiefenstufe 5–10 cm Bodentiefe. Auf der anderen Seite nahmen die Anteile im Carbonat- und Silikat-Pufferbereich in der BZE II zu Lasten des Austauscher-Pufferbereiches leicht zu.

Im Hinblick auf die Verteilung der Pufferbereiche nach dem  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert zeichnet sich demnach für Sachsen-Anhalt eine leichte Verschlechterung des bodenchemischen Zustandes im Oberboden ab. Die Anteile der ökologisch ungünstig zu beurteilenden Aluminium-Eisen- und Aluminium-Pufferbereiche haben im oberen



Mineralboden zu Lasten der besseren Austauscher- und Silikat-Pufferbereiche zugenommen. Dies betrifft vor allem die schwächeren Standorte des unverlehmten Sandes und Tonschiefers. Verbesserungen zeigen sich aber auch in der Zunahme der günstigeren Carbonat- und Silikat-Pufferbereiche, dies betrifft vor allem den Lösslehm und die (schwach)verlehmten Sande in Sachsen-Anhalt.

6.5.5.2  $pH(KCl)$

Die  $pH(KCl)$ -Werte sind grundsätzlich deutlich geringer als die  $pH(H_2O)$ -Werte, da durch den Salzzusatz zusätzlich zu den Protonen in der Bodenlösung Protonen vom Austauscher gelöst werden. Im Mittel von Sachsen-Anhalt liegen die  $pH(KCl)$ -Werte des Auflagehumus und der Mineralboden-Tiefenstufen zwischen 0,5 und 0,8  $pH$ -Einheiten unter den entsprechenden  $pH(H_2O)$ -Werten (s. Abb. 82).

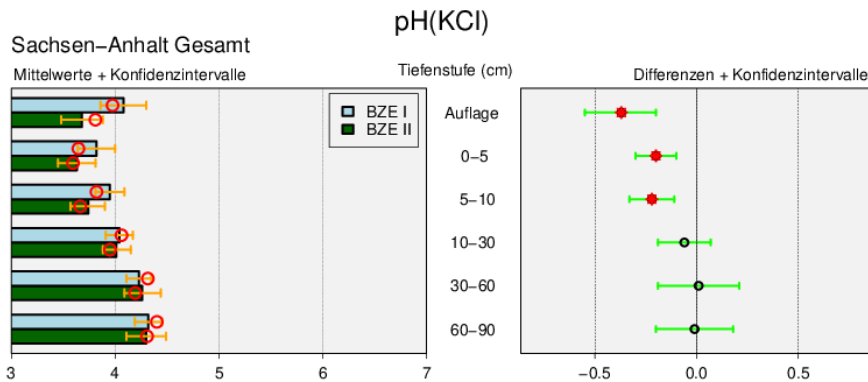


Abbildung 82:  $pH(KCl)$ -Werte in sachsen-anhaltischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ( $n = 64$ ) und II ( $n = 76$ ) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ( $n = 62$ ) (rechte Spalte) nach Auflagehumus und Tiefenstufen bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Die  $pH(KCl)$ -Werte in der Auflage sind von durchschnittlich 4,08 bei der BZE I auf 3,68 in der BZE II signifikant gesunken, ebenfalls signifikant in den Tiefenstufen 0–5 cm und 5–10 cm jeweils um 0,2  $pH$ -Wert-Einheiten. Mit zunehmender Bodentiefe steigen die  $pH(KCl)$ -Werte kontinuierlich an. In der Tiefenstufe 60–90 cm betragen sie bei der BZE II durchschnittlich 4,30.

Die  $pH(KCl)$ -Werte nach Substratgruppen sind in Abbildung 83 für den Auflagehumus und die Tiefenstufen dargestellt. Auffällig sind die sehr ähnlichen Werte über eine relativ weite standörtliche Amplitude: Vom Tonschiefer bis zum Lösslehm liegen die Mediane der  $pH(KCl)$ -Werte im Mineralboden überwiegend zwischen 3 und 4, also im eher geringen Bereich. Nur in tieferen Bodenschichten unter 30 cm

beim unverlehmten Sand und Lösslehm ab 60 cm Bodentiefe sowie im Auflagehumus beim Lösslehm und verlehmten Sand, hier auch bis 10 cm Bodentiefe, liegen die Werte höher.

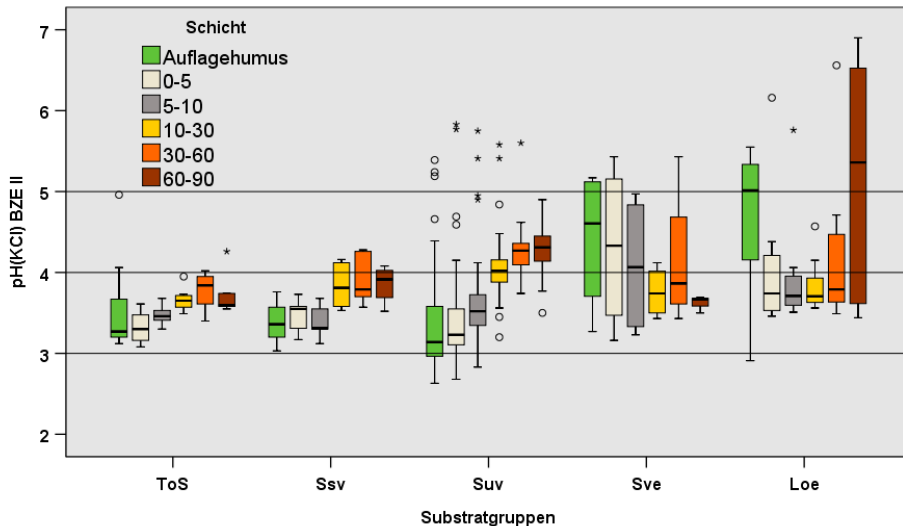


Abbildung 83:  $pH(KCl)$ -Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen; dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer)

Die  $pH(KCl)$ -Werte der BZE II änderten sich im Vergleich zur BZE I in den Substratgruppen und Tiefenstufen relativ wenig (s. Abb. 84). Signifikant geringere Werte im Vergleich zur BZE I gab es nur in der Substratgruppe unverlehmter Sand im Auflagehumus und im Mineralboden bis 10 cm Bodentiefe. Weitere signifikante Veränderungen kamen nicht vor, in der Tendenz gab es hier geringere  $pH(KCl)$ -Werte in der BZE II im Vergleich zur BZE I.

Die Flugasche beeinflussten Standorte innerhalb der Substratgruppe unverlehmter Sand weisen ähnlich wie bei den  $pH(H_2O)$ -Werten deutliche höhere  $pH(KCl)$ -Werte auf als die von Flugasche nicht beeinflussten. Die Werte waren in der BZE II im Auflagehumus und oberen Mineralboden bis 10 cm in der BZE II geringer, ab 10 cm kaum unterschiedlich zur BZE I. Unterschiede hinsichtlich der  $pH$ -Wert Veränderungen gab es zwischen den Kollektiven Flugasche beeinflusst und unbeeinflusst nicht (nicht dargestellt).

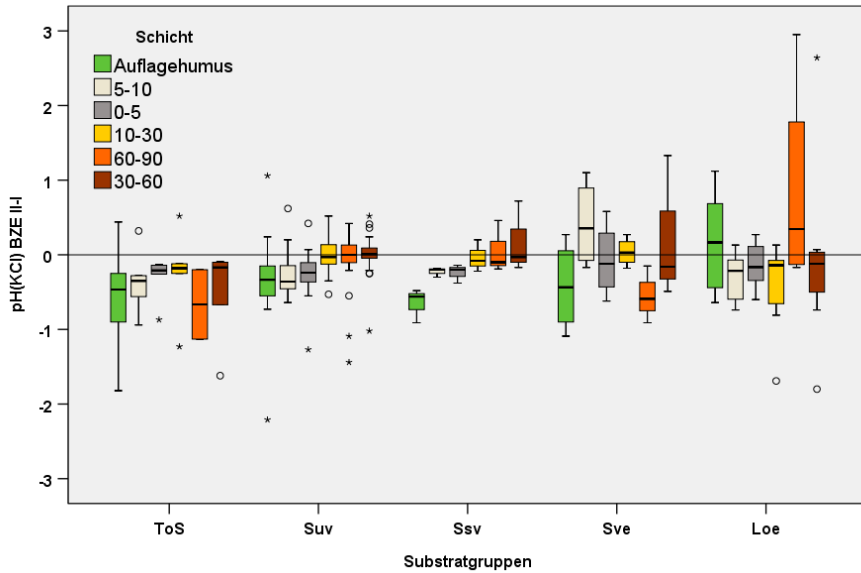


Abbildung 84: Differenzen (BZE II - BZE I) der pH(KCl)-Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen [cm] für die BZE II in Sachsen-Anhalt nach Substratgruppen; dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten, die sowohl in der BZE I als BZE II beprobt wurden (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

### 6.5.6 Kohlenstoff

Kohlenstoff (C) ist im Waldboden sowohl im Auflagehumus als auch im Mineralboden enthalten. Hinsichtlich der Kohlenstoffspeicherung ist nur der in der abgestorbenen organischen Substanz gebundene Kohlenstoff von Interesse. Diese besteht aus abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffen sowie deren Umwandlungsprodukten. Lebende Organismen, also die Bodenflora und -fauna oder auch lebende Wurzeln von Waldbäumen, zählen nicht zur organischen Substanz des Bodens. Kohlenstoff kann auch in karbonatischer Form fest in Gesteinen gebunden sein, wie z. B. in Kalk-, Ton- oder Mergelgesteinen. Im Folgenden wird nur der organisch gebundene Kohlenstoff betrachtet.

Die Kohlenstoffvorräte hängen von der Gründigkeit und Dichte des Bodens, dem Steingehalt und vor allem dem Kohlenstoffgehalt ab. In den oberen Bereichen des Mineralbodens sind die Gehalte von Kohlenstoff i. d. R. hoch, der Boden ist dort aber auch relativ locker. In den unteren Bodenschichten ist es umgekehrt. Im Schnitt enthält das obere Drittel des Mineralbodens gut die Hälfte des Kohlenstoffvorrates des gesamten BZE-Profiles bis 90 cm Bodentiefe. Die höchsten Kohlen-

stoffvorräte enthalten Moorböden. Die im Auflagehumus gespeicherten Kohlenstoffvorräte sind ebenfalls sehr variabel und hängen stark von der jeweiligen Baumartenzusammensetzung und den Zersetzungsbedingungen ab.

Die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus in den Waldböden Sachsen-Anhalts liegen zum Zeitpunkt der BZE II mit durchschnittlich 130 t/ha im unteren mittleren Bewertungsbereich. In diesem Durchschnitt sind auch die organisch geprägten Standorte ( $n = 2$ ) einbezogen, ein Erdniedermoor und ein Anmoorgley, die sehr hohe Kohlenstoffvorräte zwischen 630 und 210 t/ha bis 90 cm Bodentiefe speichern. Mit rund 3 % haben die organisch geprägten Standorte im BZE-Kollektiv Sachsen-Anhalts nur einen relativ geringen Anteil. In Hessen kommen diese Standorte nicht in der BZE vor, in Niedersachsen liegt der Anteil bei 8 %. Ohne diese Standorte speichern die Waldstandorte Sachsen-Anhalts im Mittel 118 t/ha Kohlenstoff, davon 24 t/ha im Auflagehumus (20 %) und liegen damit ebenfalls im mittleren Bewertungsbereich.

Im BZE-Kollektiv sind die organisch geprägten Standorte hinsichtlich der Kohlenstoffspeicherung Sonderstandorte. Grundsätzlich „sacken“ weitgehend trocken-gefallene und/oder entwässerte, bewaldete Moorböden mit der Zeit in sich zusammen. Der Moor-Humuskörper wird mineralisiert, die Dichten nehmen zu, der Kohlenstoffvorrat verringert sich. Um hier korrekte Bilanzen erstellen zu können, müsste der Kohlenstoffvorrat jeweils bis zum Mineralboden bestimmt werden. Werden dagegen feste Tiefenstufen im Zeitvergleich wie bei der BZE von oben beginnend verglichen, ergeben sich aufgrund der zunehmenden Dichten hohe Kohlenstoffzunahmen in den Tiefenstufen, obwohl insgesamt der Kohlenstoffvorrat (bis zur Mineralbodensohle) abgebaut wird. Aus diesem Grund sind bei den Auswertungen zu Veränderungen der Kohlenstoffvorräte zwischen der BZE I und II die organischen Standorte nicht mit einbezogen worden.

In Abbildung 85 sind die durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte für alle Waldböden in Sachsen-Anhalt ohne organische Standorte nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Gesamtprofil bis 90 cm Bodentiefe dargestellt.

Die Kohlenstoffvorräte in diesem Kollektiv reichen von 52 t/ha in einem Ranker im Mittelharz bis 400 t/ha einer Hochflutablagerung bei Magdeburg, die auch bereits die höchsten Vorräte an Calcium, Magnesium und Kalium sowie die höchste Austauschkapazität aufweist.

Bei der BZE II sind in den oberen 30 cm des Mineralbodens mit 85 t/ha Kohlenstoffvorrat 72 % des gesamten Kohlenstoffs bis 90 cm Bodentiefe einschließlich Auflagehumus gespeichert. In der Tiefenstufe 30–60 cm sind es mit 22 t/ha 19 % und in der Tiefenstufe 60–90 cm mit 11 t/ha 9 %. Dies liegt an den stark abfallenden Kohlenstoff- und den zunehmenden Skelettgehalten mit zunehmender Bodentiefe. Bei der BZE I lagen die prozentualen Anteile relativ ähnlich.

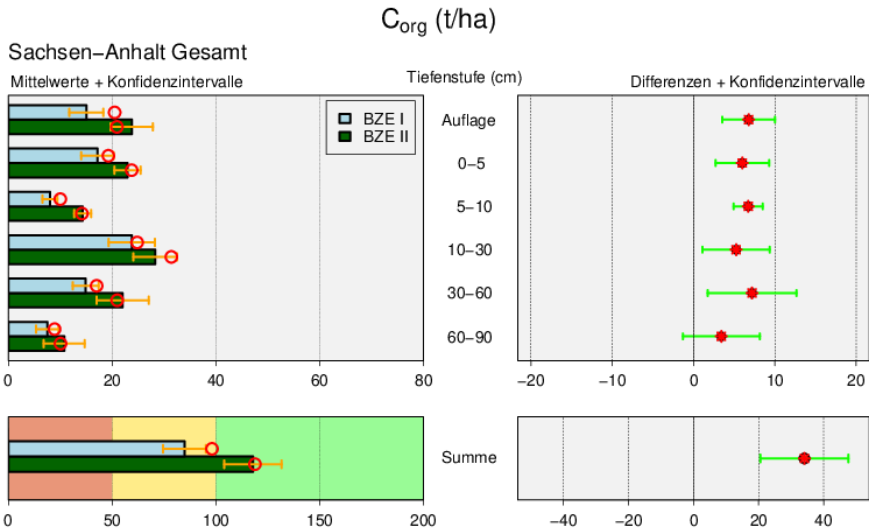


Abbildung 85: Kohlenstoffvorräte [t/ha] in sachsen-anhaltischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I (n = 63) und II (n = 74) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 61) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150, ohne organisch geprägte Standorte.

Im Vergleich zur BZE I erhöhten sich die durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte in den Waldböden Sachsen-Anhalts im Auflagehumus und im Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe um 34,1 t/ha (+40 %), was rechnerisch einer durchschnittlichen jährlichen Speicherrate von rund 2.440 kg/ha entspricht. Diese Zunahme ist im Auflagehumus, allen Tiefenstufen und auf Profilebene signifikant (s. Abb. 85, Teilgrafik d).

Die Spanne, der auf der jeweiligen Profilebene aufsummierten Veränderung im Kohlenstoffvorrat, ist in Sachsen-Anhalt extrem: sie reicht von um 80 t/ha Kohlenstoff Vorräten auf Profilebene in der BZE I bis zu 300 t/ha Zunahme zwischen der BZE I und BZE II. Bei drei BZE-Punkten mit extremen Abweichungen zwischen den Kohlenstoffvorräten in der BZE I und BZE II konnten die Ursachen erklärt werden. Die Abweichungen sind auf Braunkohlereste, Beprobungsfehler in der BZE I und durch Streifenflug bedingte hohe Variabilität zurückzuführen.

Ohne diese extremen Abweichungen liegt die mittlere Differenz auf Profilebene hinsichtlich des Kohlenstoffvorrates bei 25,4 t/ha (+30 %) und einer rechnerischen jährlichen Zunahme von rund 1800 kg/ha.

Die Zunahmen im Kohlenstoffvorrat sind vor allem im Auflagehumus und im Oberboden bis 10 cm Bodentiefe beträchtlich: im Auflagehumus 7 t/ha (+46 %), im Mineralboden in der Tiefenstufe 0–5 cm 6,1 t/ha (+36 %) und 6 t/ha in 5–10 cm

(+75 %). In den Bodentiefen 10–30 cm lagen die Zunahmen bei 2,5 t/ha (+10 %), in 30–60 cm bei 3,6 (+24 %) und in 60–90 cm bei 1 t/ha (+14 %), jeweils bezogen auf die Vorräte der BZE I.

Die in der BZE I verwendete Methode der Nassveraschung zur Bestimmung von Kohlenstoff gilt grundsätzlich als vergleichbar mit der Elementaranalyse, die in der BZE II Anwendung fand (RIEK et al. 2015). Werden jedoch die Histogramme der in der BZE I und BZE II in Sachsen-Anhalt gemessenen C-Konzentrationen gegenübergestellt, dann zeigen sich deutlich häufiger geringe C-Konzentrationen unterhalb von 3 mg/g im BZE-I Datensatz als in der BZE II (Abb. 86). Diese Messungen treten überwiegend in den Tiefen 30–60 und 60–90 cm, also unteren Tiefenstufen, auf. Derart auffallend und gerichtet höhere C-Konzentrationen in der BZE II in diesen Bodentiefen mit sehr geringen C-Konzentrationen in der BZE I lassen eher methodische Unterschiede als ökologische Prozesse vermuten. Das damals angewendete Verfahren der Nassveraschung wird bei zunehmend geringerer C-Konzentration ungenauer. Je geringer die C-Konzentration, desto höher müssen z. B. die Einwaagen sein, insofern können trotz grundsätzlicher Methodenvergleichbarkeit auch laborspezifische Unterschiede bestehen. Direkte Vergleichsmessungen mit der Elementaranalyse zur damaligen Nassveraschung existieren nicht. Da prozessbedingte C-Zunahmen der gefundenen Größenordnung in den Tiefenstufen 30–60 und 60–90 cm sehr unwahrscheinlich und methodenbedingte Unterschiede sehr wahrscheinlich sind, sollten diese beiden Tiefenstufen mit ihren Kohlenstoffzunahmen aus der Bilanz genommen werden. Damit ergibt sich eine C-Speicherung für Sachsen-Anhalts Waldböden von 20,8 t/ha (+25 %) und einer rechnerischen jährlichen Zunahme von rund 1500 kg/ha.

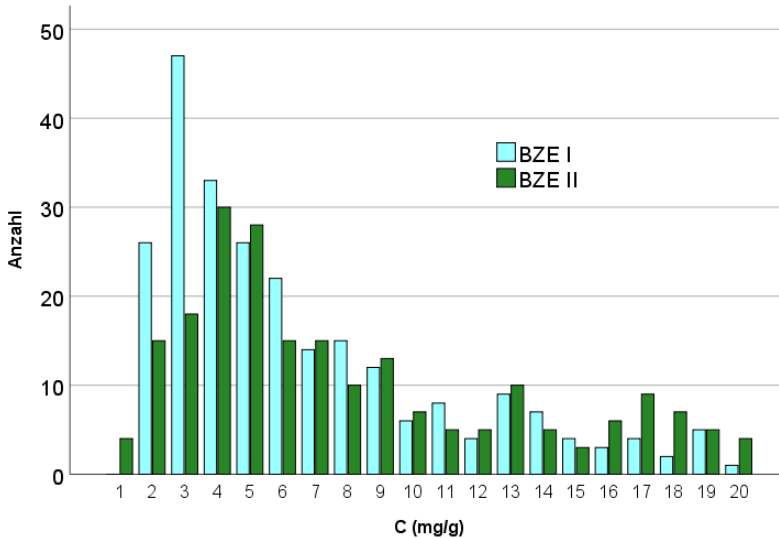


Abbildung 86: Verteilung der Kohlenstoffkonzentrationen [mg/g] im Mineralboden in der BZE I und BZE II unterhalb 20 mg/g, BZE I Horizontmittel, BZE II Tiefenstufenmittel

### 6.5.6.1 Kohlenstoffvorräte nach Substratgruppen

Wird die Verteilung der Kohlenstoffvorräte getrennt nach Substratgruppen betrachtet, ergibt sich folgendes Bild (s. Abb. 87):

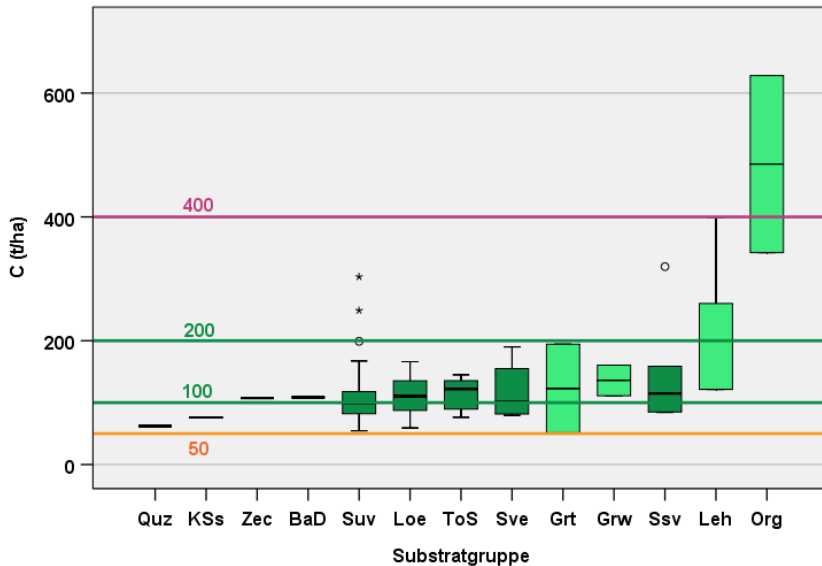


Abbildung 87: Verteilung der Kohlenstoffvorräte [t/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in sachsen-anhaltischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (BaD: Basalt/Diabas, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, KSs: Kreidesandstein, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarz, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer, Zec: Zechstein; hellgrün: n<4 BZE-Punkte, Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148)

Die Verteilung der Kohlenstoffvorräte liegt bei fast allen Substratgruppen im mittleren Bewertungsbereich zwischen 100 und 200 t C/ha. Die höchsten mittleren Kohlenstoffvorräte zwischen 400 und 600 t C/ha weisen die organisch geprägten Standorte auf. Sie liegen mit ihren Kohlenstoffvorräten im sehr hohen Bewertungsbereich und heben sich damit deutlich von den anderen Substratgruppen ab. Die geringsten mittleren Kohlenstoffvorräte finden sich beim Quarz und Kreidesandstein. Von einzelnen Profilen abgesehen ist die Streuung der Kohlenstoffvorräte auf Profilebene bei Weitem geringer als bei den Hauptnährstoffen Calcium, Magnesium und Kalium.

Im Auflagehumus weisen die BZE-Punkte in der Substratgruppe Lösslehm mit rund 9 t/ha Kohlenstoff die geringsten Vorräte auf, die unverlehmtten und schwach verlehmtten Sande mit knapp 30 t/ha dagegen den rund dreifachen Kohlenstoffvorrat. Die BZE-Punkte in den Substratgruppen Tonschiefer und verlehmtte Sande lie-

gen mit 19 und 13 t/ha Kohlenstoff dazwischen (s. Abb. 88). Die jeweiligen Streuungen innerhalb der Substratgruppen sind beträchtlich, dennoch folgen die Kohlenstoffvorräte einem Muster: je reicher die Standorte, desto besser die Humusform und desto geringer die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus. Die relative Verteilung der Kohlenstoffvorräte in den einzelnen Tiefenstufen ist bei den unverlehmten und schwach verlehmten Sanden recht ähnlich: mit jeweils 26 % Anteil am Gesamtprofil hat der Auflagehumus die höchsten Anteile, gefolgt von der Tiefenstufe 30–60 cm mit 21–22 %. Im unteren Mineralboden (30–90 cm) sind nur noch zwischen 19–24 % des gesamten Kohlenstoffs im Profil gespeichert, d. h. der Auflagehumus und der obere Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe speichern den weit überwiegenden Teil von rund 80 %. Beim Tonschiefer ist das ähnlich, hier sind 84 % des Kohlenstoffs im oberen Mineralboden bis 30 cm gespeichert, die Anteile des Auflagehumus sind jedoch mit 16 % geringer. Mit rund 30 % Anteil des Kohlenstoffvorrates im Unterboden und relativ geringen Anteilen im Auflagehumus (8 und 11 %) heben sich Lösslehm und die verlehmten Sande von den anderen Substratgruppen ab.

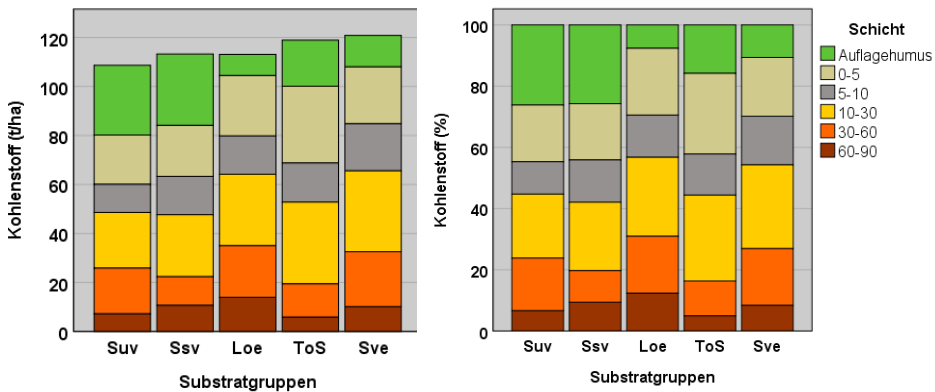


Abbildung 88: Kohlenstoffvorräte bei der BZE II im Auflagehumus und in den Tiefenstufen (0–5, 5–10, 10–30, 30–60, 60–90 cm) nach Substratgruppen in t/ha (links) und % (rechts), dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer)

Hinsichtlich der Veränderungen der Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus und Mineralboden ergaben sich nur in der Substratgruppe unverlehmter Sand deutliche und signifikante Veränderungen (Abb. 89). Insgesamt auf Profilebene nahmen die Kohlenstoffvorräte mit 32,4 t/ha um 46 % bezogen auf den Kohlenstoffvorrat in der BZE I zu, besonders hohe Zunahmen zwischen 70–95 % waren im Oberboden bis 10 cm zu verzeichnen. Mit Ausnahme der Tiefenstufe 60–90 cm waren alle Unterschiede signifikant. Ohne die Einbeziehung der Tiefenstufen 30–60 und 60–90 cm ergibt sich noch eine Zunahme von 28,1 t/ha.



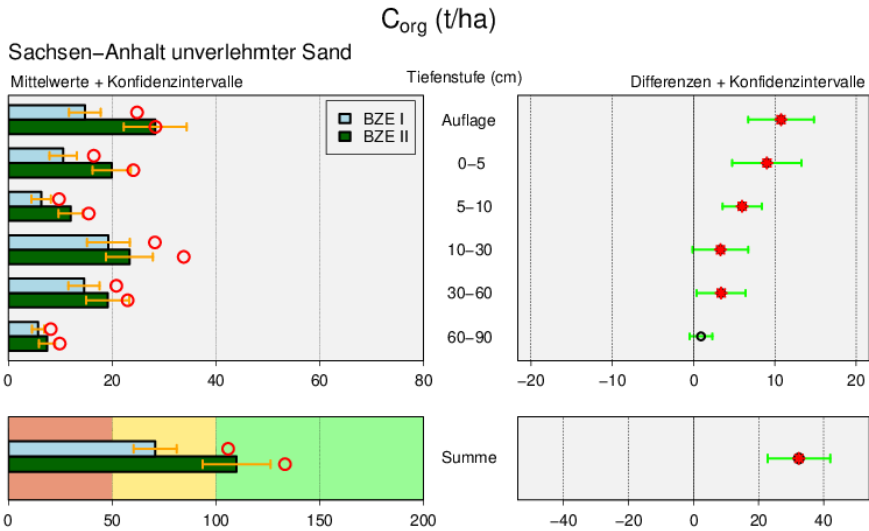


Abbildung 89: Kohlenstoffvorräte [t/ha] in sachsen-anhaltischen Waldböden für die Substratgruppe unverlehmter Sand als Mittelwert für die BZE I (n = 32) und II (n = 39) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 30) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

### 6.5.6.2 Kohlenstoffvorräte und Bestand

Der aufstockende Bestand beeinflusst die Kohlenstoffvorräte ebenfalls. Besonders unter Nadelholz sind höhere Vorräte im Auflagehumus zu erwarten. Dies wird in der Abbildung 90 ersichtlich. Die geringsten Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus fanden sich bei den Laubholzbeständen Eiche (3,9 t/ha), Buche (6,6 t/ha) und sonstigem Laubholz (8,2 t/ha) sowie die höchsten unter Kiefer (30,1 t/ha) und Fichte (32,8 t/ha). Dies steht auch im Zusammenhang mit den Substratgruppen: Je ärmer der Standort, desto höher sind die Anteile des Nadelholzes und damit die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus. Standortbedingt finden sich unter den Laubholzbeständen Substrate mit teilweise hohen Kohlenstoffvorräten (z. B. Buche und Lösslehm), sodass sich die Unterschiede Auflagehumus durch den Bestand wieder angleicht, wenn der Gesamtvorrat (Auflage mit Mineralboden) betrachtet wird.

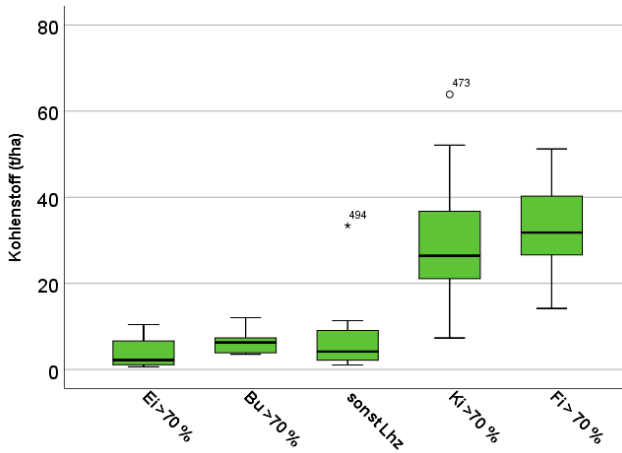


Abbildung 90: Kohlenstoffvorräte [t/ha] im Auflagehumus in Abhängigkeit von der Bestandeszusammensetzung (> 70 = Bestandesanteil größer als 70 %; Ndz = Nadelholz, Lbz = Laubholz)

In Abb. 91 sind die Differenzen der Kohlenstoffvorräte zwischen der BZE I und BZE II für den unverlehmten Sand in Sachsen-Anhalt in Abhängigkeit des Bestandesalters klassiert nach Altersklassen dargestellt. Es handelt sich überwiegend um Kiefernbestände (87 %), einbezogen sind nur BZE-Punkte, die sowohl in der BZE I als auch BZE II bestanden und beprobt wurden.

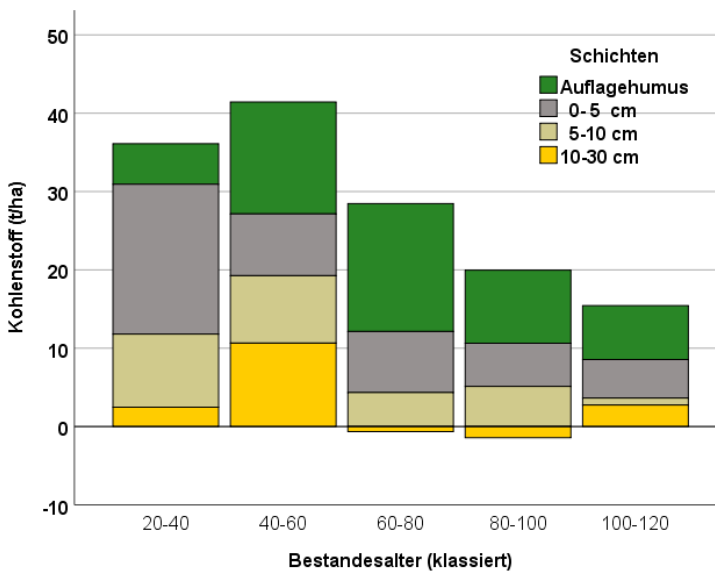


Abbildung 91: Veränderungen der Kohlenstoffvorräte [t/ha] im Auflagehumus und Mineralboden nach Tiefenstufen bis 30 cm Bodentiefe für den unverlehmten Sand nach Bestandesalter, klassiert nach Altersgruppen

Die höchsten Zunahmen an Kohlenstoff zwischen der BZE I und BZE II liegen in den Altersklassen 20–40 und 40–60, die Zunahmen werden absolut mit zunehmendem Bestandesalter geringer. Mit 15 t/ha Kohlenstoff in der Altersklasse 100–120 Jahre werden noch rund 40 % Kohlenstoff im Vergleich zur Altersklasse 40–60 Jahre gespeichert. Die höchsten Speicherraten treten im Auflagehumus und oberen Mineralboden in 0–5 cm Bodentiefe auf, in den unteren Tiefenstufen sind die Speicherraten in der Regel geringer. Sehr hohe Speicherraten wurden in der Tiefenstufe 0–5 cm in der Altersklasse 20–40 sowie im Auflagehumus in den Altersklassen 60–80 und 40–60 Jahren festgestellt.

### 6.5.7 Stickstoff

Stickstoff (N) als ein wichtiger Makronährstoff ist von Natur aus in Waldökosystemen mit wenigen Ausnahmen nur in geringen Mengen vorhanden und damit zu meist wachstumslimitierend. Stickstoff kommt kaum in Gesteinen vor, reichert sich aber im Laufe der Zeit über Naturereignisse wie Gewitter beziehungsweise biologische Stickstoffbindung aus der Luft mit organischer Substanz im Boden an. In der Pflanzensubstanz ist Stickstoff Hauptnährelement und wird im Waldboden über die Blatt- und Wurzelstreu, das Wurzelwachstum und die bodenbiologische Aktivität angereichert. Durch intensive Streu-, Plaggen- und Holznutzung in der vorindustriellen Zeit sind vielerorts die Stickstoffvorräte in den Wäldern deutlich zurückgegangen. Entsprechende Einschränkungen des Baumwachstums und der Flächenproduktivität waren die Folge. Die unterschiedlich ausgeprägten frühen Stickstoffnutzungen tragen zu einer großen räumlichen Variabilität der Stickstoffvorräte in Waldökosystemen bei. Im Zuge der relativ hohen atmogenen Stickstoffeinträge der letzten Jahrzehnte haben sich die Stickstoffvorräte in den Wäldern gegenüber der vorindustriellen Zeit wieder erholt bzw. erhöht. Dies ging teilweise mit einem merklich erhöhten Zuwachs der Waldbäume einher. Liegen die Stickstoffeinträge über dem Bedarf der Wälder, kann es je nach Standort und Region zu Austrägen mit dem Sickerwasser in das Grundwasser oder zu gasförmigen Verlusten kommen. Der Eintrag von Ammonium-Stickstoff hat eine versauernde Wirkung und der Nitrataustrag führt über einen Verlust an basischen Kationen zu einer Verarmung der Böden und belastet zudem das Grundwasser. Überhöhte Stickstoffeinträge haben weiterhin zu einer Verschiebung der Artenzusammensetzung in der Waldbodenvegetation geführt.

In Abbildung 92 sind die durchschnittlichen Stickstoffvorräte für alle Waldböden in Sachsen-Anhalt nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Gesamtprofil bis 90 cm Bodentiefe dargestellt.

Die Stickstoffvorräte im Auflagehumus und in den Waldböden Sachsen-Anhalts bis 90 cm Bodentiefe liegen bei der BZE II mit durchschnittlich rund 7,6 t/ha Stickstoff im mittleren Bewertungsbereich nach der Forstlichen Standortsaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003; s. Tab. 11, S. 148). Der Auflagehumus hat mit

1,02 t/ha Stickstoff dabei einen Anteil von 13 %. Im Vergleich zu den Bundesländern Niedersachsen und Hessen liegen die Stickstoffvorräte der BZE II in Sachsen-Anhalt etwas höher. Dies kann analog zum Kohlenstoff vor allem auf die höheren Auflage- und Feinbodenvorräte in Sachsen-Anhalt zurückgeführt werden. Die summierten Stickstoffvorräte der BZE II in Sachsen-Anhalt von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe streuen von 2,7 t/ha bis zu über 42 t/ha Stickstoff. Die geringsten Stickstoffvorräte im BZE-Kollektiv in Sachsen-Anhalt finden sich bei einem Ranker aus Quarzit im Harz bei Ilsenburg, der schon bei Calcium, Magnesium und Kalium auffällig war, die höchsten Stickstoffvorräte in einem Erdniedermoor bei Ziesar im Osten Sachsen-Anhalts.

Ähnlich wie beim Kohlenstoffvorrat sind in den oberen 30 cm Mineralboden mit rund 5 t/ha Stickstoff insgesamt 66 % der Stickstoffvorräte bis 90 cm Bodentiefe gespeichert. Stickstoff ist vor allem in organischer Substanz gebunden, die weit aus überwiegend im oberen Mineralboden mit entsprechend höheren Anteilen vertreten ist (0–5 cm 16 %, 5–10 cm 11 % und 10–30 cm 26 %). Dennoch sind die Anteile der Tiefenstufe 30–60 cm am Stickstoffvorrat mit 21 % und der Tiefenstufe 60–90 cm mit 13 % nicht unbedeutend. Die prozentuale Tiefenverteilung der Stickstoffvorräte war bei der BZE I nahezu identisch.

Mit Ausnahme der Tiefenstufe 60–90 cm sind in allen Tiefenstufen und im Auflagehumus die Veränderungen im Vergleich zur BZE I signifikant. Der Stickstoffvorrat im Auflagehumus erhöhte sich um 43 % bezogen auf den Vorrat der BZE I. Im oberen Mineralboden bis 10 cm Bodentiefe kam es analog zum Kohlenstoff ebenfalls zu sehr hohen Zunahmen: 32 % in der Tiefenstufe 0–5 cm und 49 % in 5–10 cm. Im tieferen Mineralboden lagen die Zunahmen zwischen 11 und 24 % bezogen auf den Vorrat in der BZE I. Summiert auf Profilebene berechnet sich ein höherer Stickstoffvorrat von 1460 kg/ha und damit ein prozentualer rechnerischer Zuwachs um 23 % bezogen auf den Vorrat der BZE I.

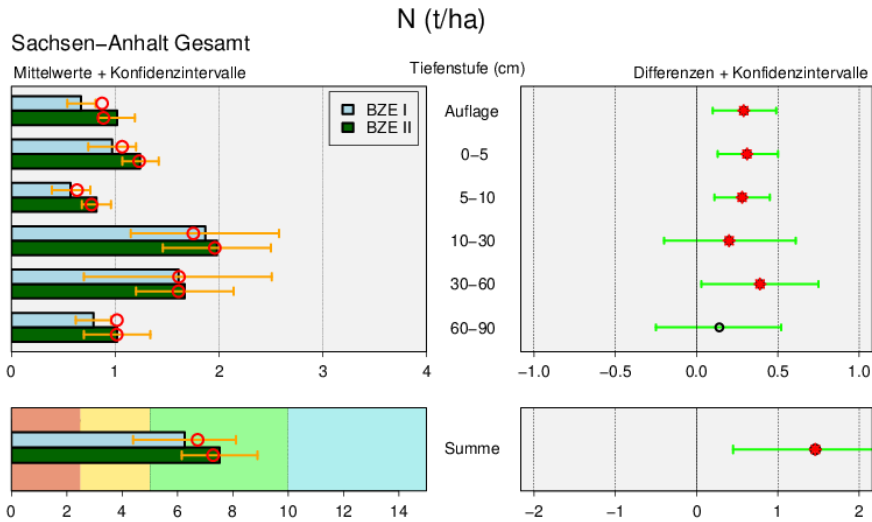


Abbildung 92: Stickstoffvorräte [t/ha] in sachsen-anhaltischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I (n = 66) und II (n = 76) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I (n = 64) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm. Die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Analog zu Kohlenstoff treten auch bei den Stickstoffvorräten extreme Unterschiede zwischen den BZE-Erhebungen auf, die nicht auf Speicherraten, sondern extreme standörtlich Unterschiede zurückgeführt werden müssen. Dies umfasst organisch geprägte Standorte, aber auch Vegaböden und eine Aufschüttung nach Kohleabbau, insgesamt 5 Standorte. Ohne diese Extreme ergibt sich eine mittlere Zunahme von 1150 kg je ha und Jahr, dies entspricht einer jährlichen Zunahme von 82 kg/ha. Diese Zunahme ist dennoch ungewöhnlich hoch.

Die in der BZE I verwendete Methode der N-Bestimmung nach Kjeldahl gilt als vergleichbar mit der Elementaranalyse, die in der BZE II Anwendung fand (HÜBSCH u. NEHRING 1960, RIEK et al. 2015). Werden jedoch die Histogramme der in der BZE I und BZE II in Sachsen-Anhalt gemessenen N-Konzentrationen analog zum Kohlenstoff gegenübergestellt, dann zeigen sich analog zum Kohlenstoff deutlich häufiger geringe N-Konzentrationen unterhalb von 0,4 mg/g im BZE-I Datensatz als in der BZE II (Abb. 93). Diese Messungen treten ebenfalls überwiegend in den Tiefen 30–60 und 60–90 cm, also unteren Tiefenstufen, auf. Derart auffallend und gerichtet höhere N-Konzentrationen in der BZE II in diesen Bodentiefen mit grundsätzlich sehr geringen N-Konzentrationen in der BZE I lassen ebenfalls eher methodische Unterschiede als ökologische Prozesse vermuten. Das Kjeldahl-Verfahren zur N-Bestimmung wird ebenso wie die Nassveraschung für die C-Bestimmung bei zunehmend geringeren N-Konzentration ungenauer. Je geringer die N-Konzentration, desto höher müssen die Einwaagen sein, insofern können trotz

grundsätzlicher Methodenvergleichbarkeit auch laborspezifische Unterschiede auftreten. Direkte Vergleichsmessungen mit der Elementaranalyse zum Kjeldahl-Aufschluss für die BZE I Proben existieren nicht. Da prozessbedingte N-Zunahmen analog zum Kohlenstoff der gefundenen Größenordnung in den Tiefenstufen 30–60 und 60–90 cm sehr unwahrscheinlich und methodenbedingte Unterschiede eher wahrscheinlich sind, sollten diese beiden Tiefenstufen mit ihren Stickstoffzunahmen aus der Bilanz genommen werden. Damit ergibt sich noch eine N-Speicherung für Sachsen-Anhalts Waldböden von 1000 kg/ha (+16 %) und einer rechnerischen jährlichen Zunahme von rund 70 kg/ha, einer immer noch sehr hohen, ungewöhnlichen Zunahme.

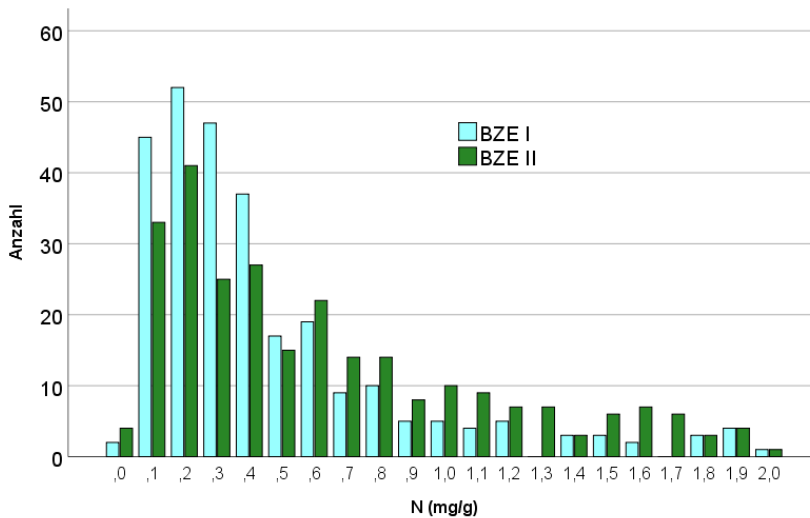


Abbildung 93: Verteilung der Stickstoffkonzentrationen [mg/g] im Mineralboden in der BZE I und BZE II unterhalb von 2 mg/g, BZE I Horizontmittel, BZE II Tiefenstufenmittel

#### 6.5.7.1 Stickstoffvorräte nach Substratgruppen

Die Verteilung der Stickstoffvorräte nach Substratgruppen ist in Abbildung 94 dargestellt.

Die mittleren Stickstoffvorräte der jeweiligen Gesamtprofile nach Substratgruppen fallen analog zur Verteilung beim Kohlenstoff überwiegend in den mittleren Bewertungsbereich zwischen 5 und 10 t/ha. Wie bereits bei den Kohlenstoffvorräten weisen Quarzit und Kreidesandstein sehr geringe Stickstoffvorräte auf, bei den Lehmen und organisch geprägten Standorten treten die höchsten Stickstoffvorräte auf. Der Median der Substratgruppe unverlehmter Sand liegt mit 5 t/ha gerade noch im mittlerem Bewertungsbereich. Die (schwach) verlehnten Sande mit 6,4 t/ha Stickstoff sind etwas besser versorgt.

Insgesamt ähnelt die Spanne der mittleren Stickstoffvorräte bezogen auf die Substratgruppen der Spanne bei den Kohlenstoffvorräten und ist damit wesentlich enger als bei den Nährelementen Calcium, Magnesium und Kalium.

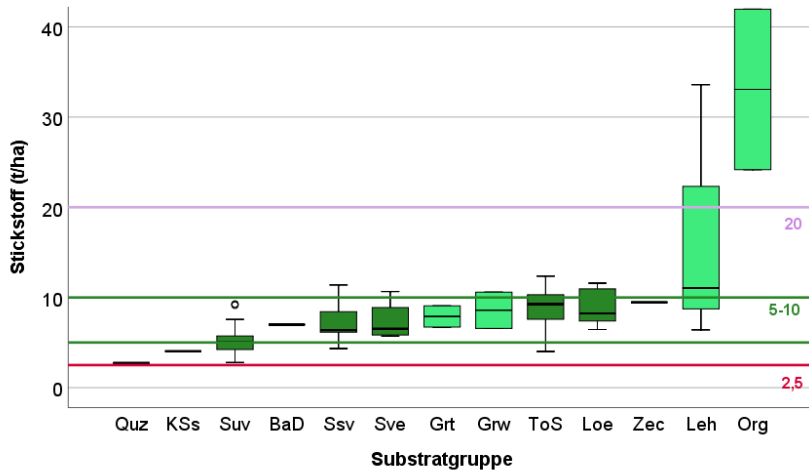


Abbildung 94: Verteilung der Stickstoffvorräte [t/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in sachsen-anhaltischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (BaD: Basalt/Diabas, Grt: Granit, Grw: Grauwacke, KSs: Kreidesandstein, Leb: Lehm, Loe: Lösslehm, Org: organisch geprägte Standorte, Quz: Quarz, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, ToS: Tonschiefer, Zec: Zechstein; hellgrün:  $n < 4$  BZE-Punkte, Grenzwerte: s. Tab. 11, S. 148)

Die Verteilung der Stickstoffvorräte im Auflagehumus und Mineralboden nach Substratgruppen wird aus Abbildung 95 ersichtlich und ist in den Substratgruppen relativ ähnlich.

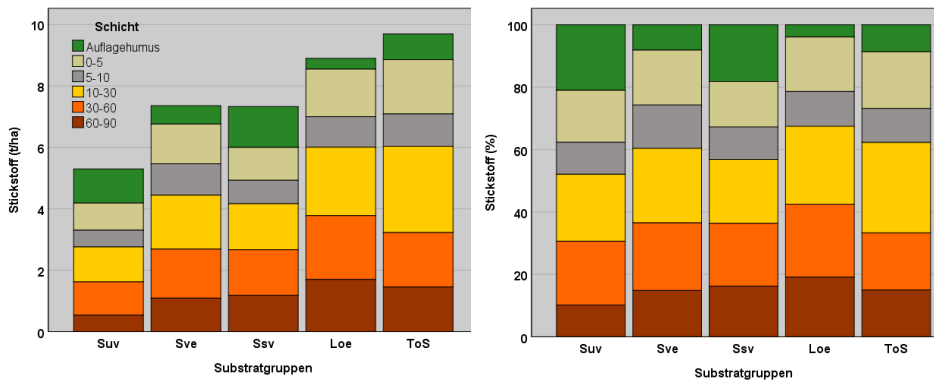


Abbildung 95: Stickstoffvorräte im Auflagehumus und in den Tiefenstufen (0–5, 5–10, 10–30, 30–60, 60–90 cm Bodentiefe) nach Substratgruppen bei der BZE II in Sachsen-Anhalt in t/ha (links) und % (rechts), dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer)

Diese Verteilung entspricht ungefähr der von Kohlenstoff. Die höchsten Stickstoffvorräte im Auflagehumus finden sich bei den Substratgruppen unverlehmter Sand und schwach verlehmtter Sand, die geringsten beim Lösslehm. Dieser Befund passt zu der Verteilung der Nährstoffe, je besser ein Substrat versorgt ist, desto geringer sind die Vorräte in der Auflage. Ohne den Auflagehumus ist die Verteilung der Stickstoffvorräte nach Tiefenstufen zwischen den Substratgruppen sehr ähnlich.

Die im BZE-Gesamtkollektiv festgestellten Zunahmen der Stickstoffvorräte im Auflagehumus und den Tiefenstufen im Mineralboden bis 60 cm Bodentiefe waren in den Substratgruppen nur in der Tiefenstufe 5–10 cm beim Lösslehm und in der Substratgruppe unverlehmter Sand im Auflagehumus, 0–5 cm und 5–10 cm signifikant. In dieser Substratgruppe gab es in der Tiefenstufe 60–90 cm sogar eine signifikante Abnahme um 20 % bezogen auf den Vorrat der BZE I in dieser Tiefenstufe. Nur für den unverlehmten Sand konnte auf Gesamtprofilebene ein signifikant erhöhter Stickstoffvorrat belegt werden (+1,05 t/ha, +26 %) (s. Abb. 96). In den Tiefenstufen der verschiedenen Substratgruppen traten überwiegend nur Zunahmen im Stickstoffvorrat auf, die ließen sich jedoch nicht statistisch absichern.



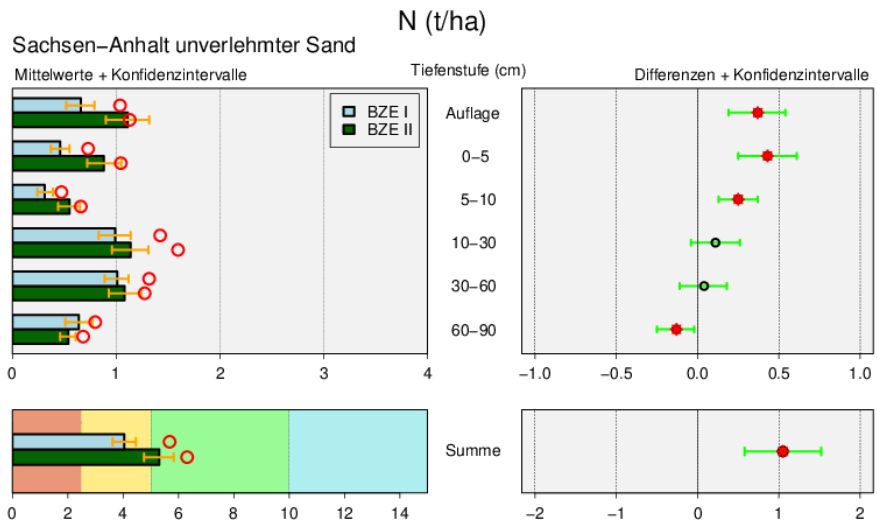


Abbildung 96: Stickstoffvorräte [t/ha] in sachsen-anhaltischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ( $n = 32$ ) und II ( $n = 39$ ) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ( $n = 30$ ) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

### 6.5.7.2 Stickstoffvorräte und Bestand

Der Stickstoffvorrat im Auflagehumus wird wie der Kohlenstoffvorrat durch den aufstockenden Bestand beeinflusst. Die Nadelholzbestände mit Fichte und Kiefer von Bestandesanteilen über 70 % liegen bei den 3–4-fachen Stickstoffvorräten im Vergleich zu den Buchen- und Eichenbeständen (s. Abb. 97).

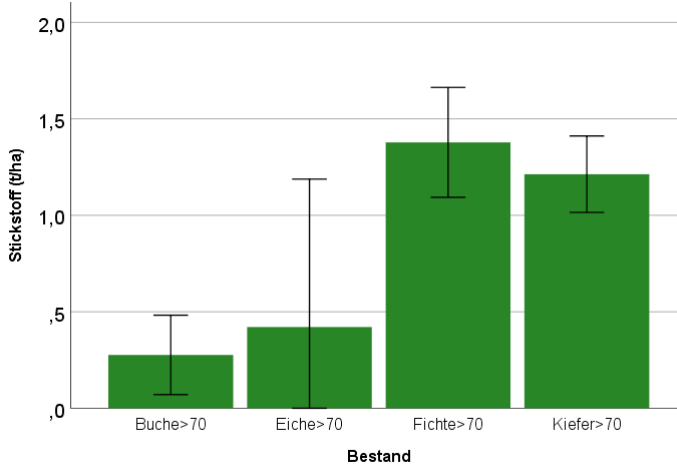


Abbildung 97: Stickstoffvorräte [t/ha] im Auflagehumus in Abhängigkeit von der Bestandeszusammensetzung (> 70 = Bestandesanteil größer als 70 %)

In Abb. 98 sind analog zu Kohlenstoff die Differenzen der Stickstoffvorräte zwischen der BZE I und BZE II für den unverlehmten Sand in Sachsen-Anhalt in Abhängigkeit des Bestandesalters klassiert nach Altersklassen dargestellt.

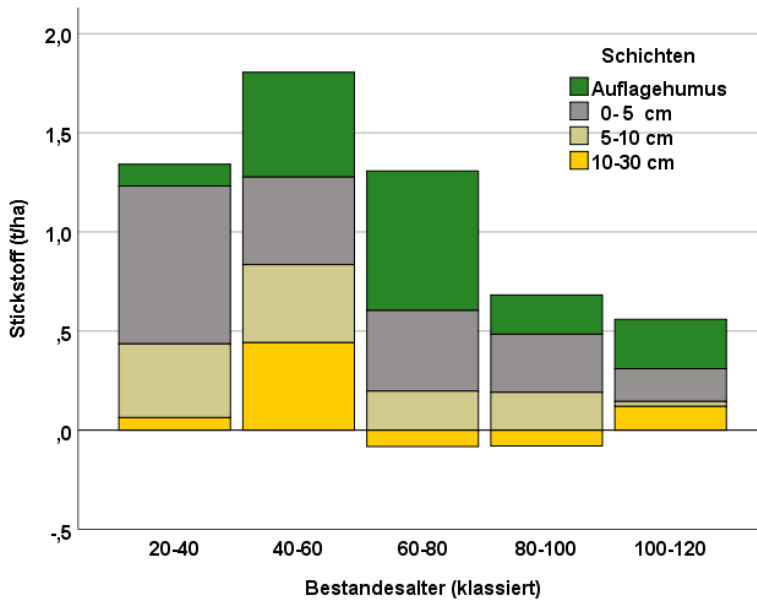


Abbildung 98: Veränderungen der Stickstoffvorräte [t/ha] im Auflagehumus und Mineralboden nach Tiefenstufen bis 30 cm Bodentiefe für den unverlehmten Sand nach Bestandesalter, klassiert nach Altersgruppen

Wie beim Kohlenstoff liegen die höchsten Zunahmen an Stickstoff zwischen der BZE I und BZE II in den Altersklassen 20–40 und 40–60 Jahren, die Zunahmen werden absolut mit zunehmendem Bestandesalter geringer. Im Unterschied zu Kohlenstoff sind die Stickstoffzunahmen in der Altersklasse 60–80 Jahren höher und nur geringfügig geringer als in der Altersklasse 20–40 Jahren. Mit 0,6 t/ha Kohlenstoff in der Altersklasse 100–120 Jahre werden noch rund 35 % Kohlenstoff im Vergleich zur Altersklasse 40–60 Jahre gespeichert. Die höchsten Speicherraten treten im Auflagehumus und oberen Mineralboden in 0–5 cm Bodentiefe auf, in den unteren Tiefenstufen sind die Speicherraten in der Regel geringer. Sehr hohe Speicherraten wurden analog zu Kohlenstoff in der Tiefenstufe 0–5 cm in der Altersklasse 20–40 sowie im Auflagehumus in den Altersklassen 40–60 und 60–80 Jahren festgestellt.

### 6.5.8 C/N-Verhältnisse

Die C/N-Verhältnisse berechnen sich als Quotient aus Kohlenstoff- und Stickstoffvorrat (bzw. Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt). Sie sind ein Indikator für die Umsetzungsbedingungen der organischen Substanz. Je enger die Verhältnisse sind, desto höher sind die Humusmineralisations- und -umsetzungsraten und damit die Stickstoffversorgung der Waldbestände. Ein weites C/N-Verhältnis kennzeichnet eine geringe Sättigung mit Stickstoff im Auflagehumus oder Mineralboden und zeigt eine eher geringe biologische Aktivität an. In der Regel wird der Oh-Horizont im

Auflagehumus bewertet, bei Mull-Standorten der Ah-Horizont (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). In Abbildung 99 sind die C/N-Verhältnisse für den Auflagehumus und alle Tiefenstufen sowie für das Gesamtprofil angegeben. Im Vergleich zum Mittel der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt sind die C/N-Verhältnisse in Sachsen-Anhalt in der BZE II im Oberboden bis 30 cm etwas enger, im Unterboden ab 30 cm Bodentiefe etwas weiter.

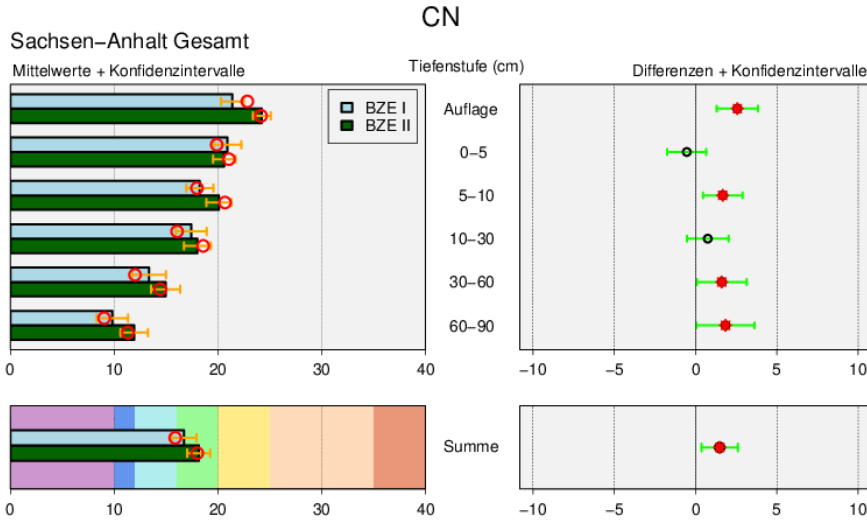


Abbildung 99: C/N-Verhältnisse in sachsen-anhaltischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I ( $n = 66$ ) und II ( $n = 76$ ) (linke Spalte) und Differenz BZE II - BZE I ( $n = 64$ ) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 38, S. 150.

Die durchschnittlichen C/N-Verhältnisse im Auflagehumus der BZE II liegen mit 24 auf der Grenze zwischen dem weiten bis mäßig weiten Bewertungsbereich nach der AK STANDORTSKARTIERUNG (2003) (s. auch Tab. 11, S. 148) und sind typisch für Waldstreu. Sie haben sich im Vergleich zur BZE I (21) signifikant geweitet und damit verschlechtert. Mit zunehmender Bodentiefe verengen sich die C/N-Verhältnisse bis auf C/N 10 (BZE I) im Unterboden, da die Kohlenstoffvorräte mit zunehmender Bodentiefe relativ stärker abnehmen als die Stickstoffvorräte. Mit Ausnahme der Tiefenstufen 0–5 cm und 10–30 cm erhöhten sich die C/N-Verhältnisse von der BZE I zur BZE II im Mineralboden signifikant um rund 2. Dies geht vor allem auf die deutlich gestiegenen Kohlenstoffvorräte zurück. Die Veränderung ist auch auf Profilebene signifikant (+1,5, s. Abb. 99, Teilgrafik d).

6.5.8.1 C/N-Verhältnisse nach Substratgruppen

Für die einzelnen Substratgruppen sind in Abbildung 100 nur die C/N-Verhältnisse im Auflagehumus und im oberen Mineralboden bis 10 cm Bodentiefe angegeben. Die C/N-Verhältnisse der tieferen Bodenschichten unter 10 cm Bodentiefe verringern sich mit zunehmender Bodentiefe auch in den Substratgruppen ähnlich dem Gesamtkollektiv deutlich, lassen sich aber hinsichtlich der Umsetzungsbedingungen nicht sinnvoll interpretieren. Sie sind daher nicht grafisch dargestellt.

Die C/N-Verhältnisse im Auflagehumus liegen beim schwach- und verlehmtten Sand sowie beim Tonschiefer im mittleren bis mäßigem Bewertungsbereich nach AK STANDORTSKARTIERUNG 2003 zwischen 20 und 25. Die Verhältnisse haben sich gegenüber der BZE I leicht verschlechtert. Beim unverlehmtten Sand und Lösslehm verschlechterten sich die C/N-Verhältnisse in der BZE II bis in den geringen Bereich zwischen C/N 25–35 deutlich, der Lösslehm war in der BZE I noch im mittleren Bewertungsbereich. Mit zunehmender Bodentiefe verbessern sich die C/N-Verhältnisse beim Lösslehm und Tonschiefer, bei den Sanden sind nur leichte, kaum relevante Veränderungen feststellbar.

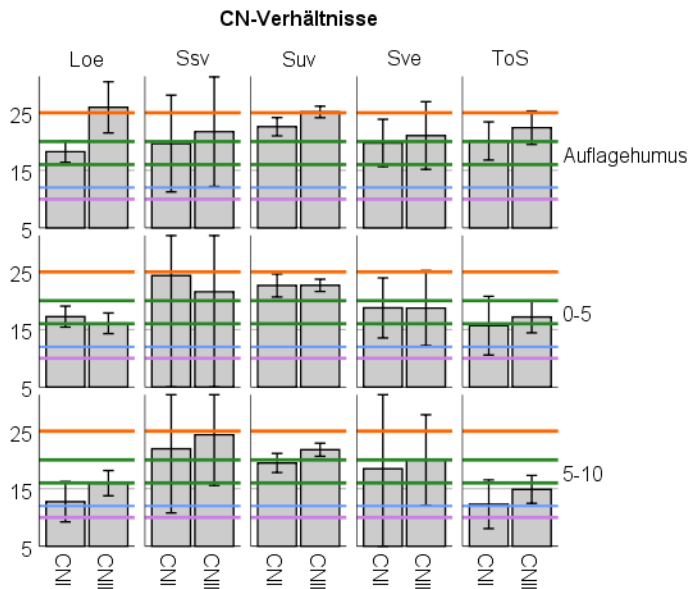


Abbildung 100: C/N-Verhältnisse bei der BZE I und II nach Substratgruppen für den Auflagehumus und die Tiefenstufen 0–5 cm und 5–10 cm in Sachsen-Anhalt mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer; die grünen Linien kennzeichnen den mittleren Bewertungsbereich, Werte oberhalb der orangen Linie kennzeichnen den weiten und unterhalb der blauen Linie den engen Bewertungsbereich bzw. sehr engen unterhalb der magentafarbenen Linie; s. Tab. 11, S. 148)

### 6.5.8.2 C/N-Verhältnisse nach Bestandstypen

Die C/N-Verhältnisse in den Fichten- und Kiefernbeständen sind in der Regel weiter als die in den Laubholzbeständen mit Buche und Eiche. In den Kiefernbeständen sind die C/N-Verhältnisse noch etwas weiter als bei der Fichte. Im Auflagehumus unter den Buchenbeständen haben sich die C/N-Verhältnisse zwischen der BZE I und BZE II erheblich verschlechtert, dies zeigt sich abgeschwächt auch bei der Eiche. Sonst traten nur geringfügige Veränderungen auf.

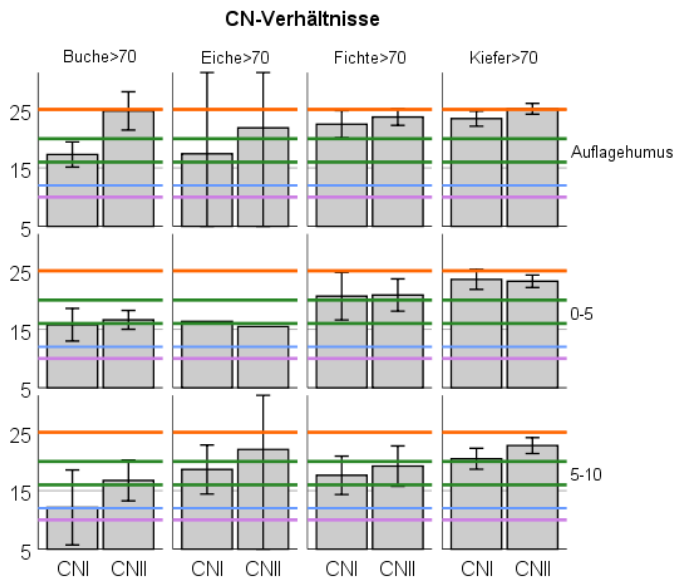


Abbildung 101: C/N-Verhältnisse bei der BZE I und II nach Bestand für den Auflagehumus und die Tiefenstufen 0–5 cm und 5–10 cm in Sachsen-Anhalt mit mindestens 4 BZE-Punkten (Loe: Lösslehm, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Sw: unverlehmtter Sand, Svc: verlehmtter Sand, ToS: Tonschiefer; die grünen Linien kennzeichnen den mittleren Bewertungsbereich, Werte oberhalb der orangen Linie kennzeichnen den weiten und unterhalb der blauen Linie den engen Bewertungsbereich bzw. sehr engen unterhalb der magentafarbenen Linie; > 70 = Bestandesanteil größer als 70 %, s.a. Tab. 11, S. 148)

## 7 Flugasche, Düngung, Waldkalkung und Bodenbearbeitung

*Jan Evers, Bernd Abrends*

Durch den Eintrag von Luftschadstoffen sind aktuell die wirkungsbezogenen Belastungsgrenzen, die Critical Loads (CL) für Versauerung und Eutrophierung, in vielen Wäldern von Sachsen-Anhalt überschritten (HELBIG et al. 2020; SCHAAP et al. 2018). Der Begriff Critical Loads bezeichnet eine Belastungsgrenze für ein ausgewähltes Schutzgut, unterhalb der nach dem bisherigen Kenntnisstand keine schädigenden Effekte zu erwarten sind (SCHULZE et al. 1989). Obwohl die durchschnittliche Stickstoff (N)-Deposition seit 1990er Jahren zurückgegangen ist, zeigen die Waldökosysteme nur eine geringe Reaktion auf die verringerten Eintragsraten (SCHMITZ et al. 2019) und entsprechend werden immer noch große Mengen an Stickstoff in den Waldböden zwischengespeichert (FLECK et al. 2019, BRUMME et al. 2021). Durch nationale und internationale Luftreinhaltemaßnahmen konnten die Sulfat Einträge wesentlich stärker reduziert werden (ENGARDT et al. 2017). Die Auswirkungen der hohen Eintragsraten sind jedoch noch heute allgegenwärtig (RIEK et al. 2021). Die Intensität der Auswirkungen ist jedoch in den einzelnen Regionen des Landes sehr unterschiedlich. So galt z. B. das bedeutende Industriedreieck Leipzig-Halle-Bitterfeld als eines der am stärksten verschmutzten Gebiete Deutschlands. Große Braunkohlekraftwerke und Chemiekombinate emittierten Millionen Tonnen Flugasche und andere gasförmige Verbindungen, die bis heute die ursprünglichen Standortseigenschaften überprägen. Ammoniumchlorid und Lösungsmittel aus der Filmfabrikation, Schwefelkohlenstoff aus der Viskosefaserherstellung und weitere diverse Schadstoffe wie Chlor, Fluor, Chlorwasserstoff, Schwefelwasserstoff und organische Verbindungen kamen hinzu, fehlende Filtertechnik und veraltete Anlagen verschärften die Umweltbelastungen. Emissionen aus Hausbrand, der landwirtschaftlichen Produktion und von Kohlekraftwerken können bei hohen Ausbreitungsreichweiten auch außerhalb von Ballungsräumen weiter entfernte Waldgebiete beeinflussen. Braunkohle mit einem relativ hohen Gehalt an Schwefelverbindungen stellte in der ehemaligen DDR die wichtigste Basis für Energieerzeugung und Chemieproduktion dar. Auskämmungseffekte der überwiegenden Nadelholzbestände aus Kiefer und Fichte erhöhten die Einträge in die Waldbestände zusätzlich (AHRENDTS et al. 2018a, 2020, MILNIK 2013, FÜRST et al. 2009, HOLZ 2007, ENDERS 2007, FRITZ und MAKESCHIN 2007). In Abb. 102 sind die Sedimentationsstaub-Immissionen im Raum Bitterfeld für den Zeitraum 1936–1990 dargestellt. Im Schwerpunkt wurden zwischen 1960 bis 1972 zwischen 20–45 t Staub je Hektar und Jahr emittiert, überwiegend durch Flugascheauswurf der Braunkohlekraftwerke (ALBRECHT 2009).



Abbildung 102: Sedimentationsstaub-Immissionen im Raum Bitterfeld zwischen 1932–1992 (nach ALBRECHT 2007, 2009, verändert)

Infolge dieser Einträge traten regional flächenhaftes Absterben, Verlichtungserscheinungen und Zuwachsverluste in den betroffenen Wäldern auf, zumeist handelte es sich um Kiefernbestände. Die Bestandesstrukturen lösten sich auf und dichte Decken von Landreitgras konnten sich ausbreiten. Das Immissionsgeschehen bestimmte in besonders betroffenen Regionen die Praxis der Bestandespflege. Entsprechend beschränkten sich in mittelalten- und alten Beständen die durchgeführten waldbaulichen Maßnahmen auf die Entnahme abgestorbener oder stark geschädigter Kiefern in einem Turnus von 2–5 Jahren. Massenvermehrungen einer Vielzahl von Schadinsekten setzten den Beständen zusätzlich zu. Forstliche Rauchschadenszonen wurden ausgewiesen, die als Basis für gerichtlich durchgesetzte Ausgleichszahlungen der Industriebetriebe an die Forstwirtschaft herangezogen wurden. Die bereitgestellten Finanzmittel wurden für die Sanierung, Wiederaufforstung und Waldpflege aufgewendet (ALBRECHT 2007, ENDERS 2007, BENDIX 2009, 2007). Da die Ausgleichszahlungen in die Jahrespläne der Industriekombinate eingestellt werden konnten, führten sie jedoch nicht zu der beabsichtigten Vermeidung der Schadstoffimmissionen (BENDIX 2007).

Um Waldbestände zu stabilisieren, wurden mehrfach großflächig per Kleinflugzeug erhebliche Mengen an Stickstoff (bis zu 120 kg pro Jahr und Hektar) ausgebracht. Die umfangreichsten Düngungen erfolgten im Raum Bitterfeld in den Jahren 1977–1979 mit einer gedüngten Waldfläche von insgesamt über 11.000 ha. Die Bestände reagierten mit einer Steigerung des Höhenzuwachses und der Nadelmasse, die Absterberaten verminderten sich (BENDIX 2009, KAINZ 2007). In Verbindung mit dem Eintrag der kalkhaltigen Flugasche ergab sich jedoch eine deutliche Überdüngung der Bestände. Neben einer erheblichen Stickstoffübersättigung stellten sich auch bodenchemische Verhältnisse fernab von Zuständen in natürlichen Systemen ein. FÜRST et al. (2009) berichten von pH-Werten zwischen 7–9 in Humusauflagen



von durch Flugasche beeinflussen Waldbeständen. Ohne Flugascheeinfluss würde der pH-Wert bei vergleichbaren Standorten zwischen 3–4 liegen. Die Stoffeinträge, vor allem die alkalischen Flugaschen, veränderten die Streu- und Substratqualität sowie die chemischen Eigenschaften der Oberböden nachhaltig. Neben höheren pH-Werten wurden deutlich erhöhte Vorräte an austauschbarem Calcium und Magnesium im Mineralboden festgestellt. Die Basensättigung in Oberböden der durch Flugasche beeinflussten Standorte –überwiegend unverlehmte Sande– erreichte das Niveau von Carbonatstandorten.

Deutliche Rückgänge der Flugasche und Schwefeleinträge waren erst nach 1990 zu verzeichnen. Obwohl durch Rauchfilter die Flugascheeinträge in den 1980er Jahren zurückgingen, stiegen die Schwefeleinträge über die Kohleverbrennung jedoch noch bis zum Ende der 80er Jahre weiter an. Im Vergleich zu 1991 lagen im Jahr 2018 die Feinstaubeträge bei 30 %, die Schwefeldioxideinträge bei 3 % und die Stickstoffdioxideinträge bei 45 % (ausgewählte Messstationen in Sachsen-Anhalt, LAU 2019).

Wie regional unterschiedlich die Niveaus und die Änderungsraten sein können, zeigt die Abb. 103. Dargestellt ist die Gesamtdeposition von 6 Standorten mit Depositionsmessungen in Kiefernbeständen aus zwei sehr unterschiedlich durch Emissionen belasteten Regionen in Sachsen-Anhalt. Die erste Region liegt nordöstlich von Magdeburg mit Beständen in Colbitz und Dolle. Weitere drei Bestände liegen im Dreiländereck der Bundesländer Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Sachsen in Wittenberg und Radis. Die dargestellten Gesamtdepositionen für den Zeitraum von 1985–1989 wurden anhand der Daten von SIMON u. WESTENDORF (1991) mit dem Kronenraumbilanzmodell von ULRICH (1994) ermittelt. Für den Zeitraum von 2000–2015 entstammen die Daten den Modellierungen des Umweltbundesamtes (SCHAAP et al. 2018). Auch wenn die beiden Datensätze nicht einer homogenen Methodik (daher sind die Punkte nicht durch Trendlinien verbunden) entstammen und insbesondere bei der Ermittlung der Stickstoffgesamtdeposition mit hohen Unsicherheiten gerechnet werden muss (vgl. AHRENDTS et al. 2020), zeigen die Daten eindrucksvoll die Größenordnung der Depositionsbelastungen in den 1980er Jahren in Sachsen-Anhalt. Sie können je nach Depositionstyp (Schwefel-Typ, Kalisalz-Typ, Stickstofftyp, Schwefel-Kalk-(Flugaschen-)Typ usw.; vgl. HOFMANN u. HEINSDORF 1990 sehr unterschiedlich ausfallen. So zeigte der Bestand in Wittenberg in der Vergangenheit bei allen Elementen hohe Belastungen durch die unmittelbare Nähe zu chemischen und anderen Produktionsanlagen (u.a. Stickstoffindustrie). Charakteristisch für hohe Belastungen mit Flugaschen aus der Braunkohlenverwertung sind die Bestände in Radis mit sehr hohen Calcium- und Sulfatdepositionen. Demgegenüber sieht man an den Standorten im Raum Colbitz/Dolle an den hohen Kaliumeinträgen in der Vergangenheit den deutlichen Einfluss der Kaliindustrie in dieser Region (z. B. Kaliwerk Zielitz). Die jeweiligen Depositionstypen sind durch unterschiedliche waldschadensverursachende Ausprägungen gekennzeichnet (HOFMANN u. HEINSDORF (1990).

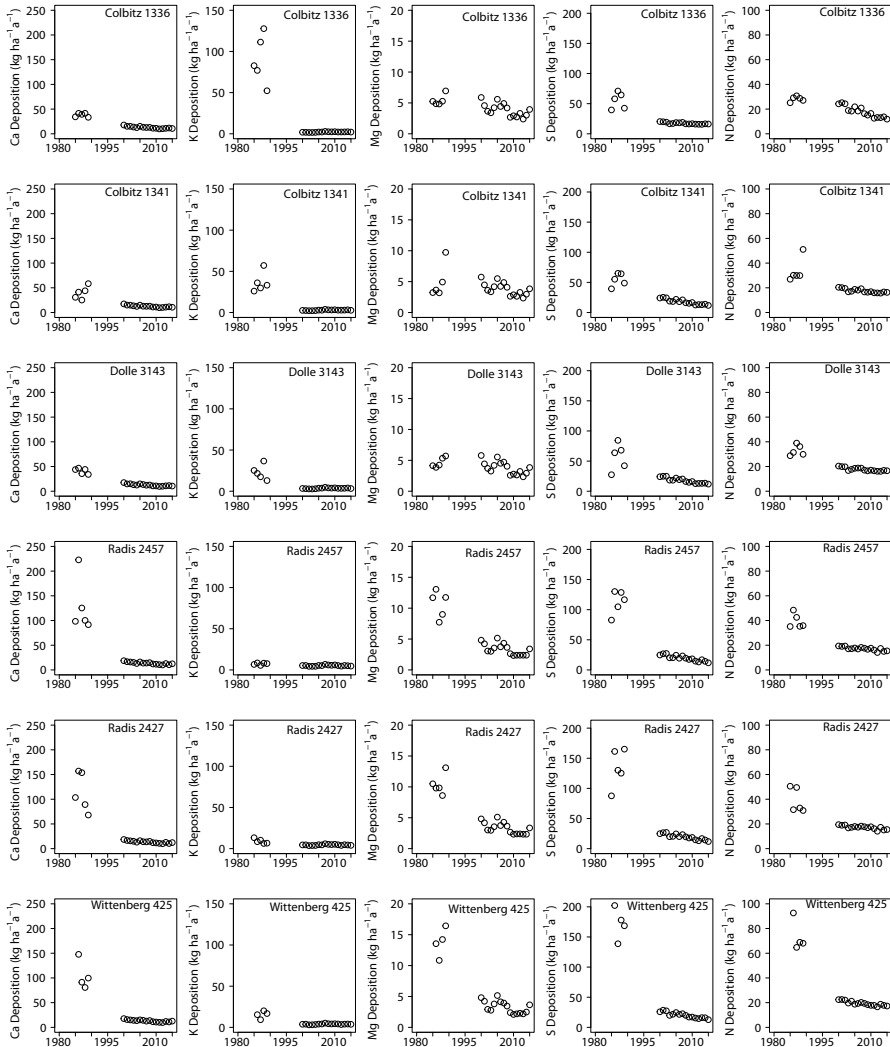


Abbildung 103: Entwicklung der Gesamtdosition von Calcium (Ca), Kalium (K), Magnesium (Mg), Schwefel (S) und Stickstoff (N) an 6 Kiefernstandorten in Sachsen-Anhalt (Datengrundlage: SIMON u. WESTENDORFF 1991, SCHAAP et al. 2018, weitere Hinweise siehe Text)

Neben den klassischen Rauchschäden v.a. durch Schwefeldioxid traten seit Beginn der achtziger Jahre erste Anzeichen der neuartigen Waldschäden in der ehemaligen DDR auf. Fichtennadeln färbten sich gelb, die Baumkronen verlichteten sich. Diese Schäden traten im Harz, Thüringer Wald, Vogtland und Westerzgebirge auf und resultierten aus über Ferntransport entstandenen Photooxidantien, die aufgrund der Schwefel- und Stickoxidgehalte eine saure Reaktion aufwiesen (Saurer Regen). An

Standorten mit geringem Basengehalt im Mineralboden konnte teilweise ein akuter Magnesium-, Calcium- und Kaliummangel in den Blattorganen beobachtet werden, so dass in einigen Regionen Deutschlands intensive Bodenschutzkalkungen durchgeführt werden mussten.

In Sachsen-Anhalt sind jedoch vergleichsweise relativ wenig Waldflächen gekalkt worden, insgesamt beträgt die gekalkte Waldfläche 13.000 ha. Das ist die geringste gekalkte Waldfläche im Vergleich der Bundesländer, die Waldkalkungen durchführen. Rheinland-Pfalz oder Niedersachsen kalkten im Vergleich über 600.000 ha (ANDREAE u. JACOB 2018). In Zusammenarbeit mit dem Landeszentrum Wald in Halberstadt (LZW) wurden im Rahmen des Modellvorhabens „Maßnahmen zur nachhaltigen Nährstoffversorgung und Gesunderhaltung von Wäldern“ in verschiedenen Revieren im Harz, der Nordöstlichen Altmark und Letzlingen unter strengen Prüfkriterien Waldkalkungen durchgeführt, um die Wirkung der Kalkung auf Boden, Ernährungszustand und Vegetation zu untersuchen. Da der mögliche Einfluss einer Waldkalkung auf den Mineralboden, den Ernährungszustand und die Vegetation nicht sofort, sondern erst nach mehreren Jahren nachweisbar wird, gibt es noch keine Ergebnisse aus diesen Versuchen in Sachsen-Anhalt (THOMS et al. 2018).

Im Kollektiv der BZE-Punkte in Sachsen-Anhalt wurden insgesamt nur 3 Punkte als gekalkt identifiziert. Entsprechend sind paarweise Auswertungen (gekalkt/ungekalkt) mit diesem Datensatz nicht sinnvoll. Relativ häufig sind jedoch die Folgen ehemaliger Bodenbearbeitung, vor allem der Streifenpflüfung, anzutreffen. Diese Maßnahme wurde an insgesamt 30 (38 %) der Stichprobenpunkte durchgeführt, in 8 Fällen davon in Verbindung mit Flugascheeinträgen. 5 BZE-Punkte sind nur durch Flugascheeintrag gekennzeichnet. Das BZE II Kollektiv umfasst 40 BZE-Punkte die weder durch Kalkung, Bodenbearbeitung oder Flugascheeinfluss beeinflusst wurden. Die Auswirkungen von Flugascheeinträgen auf die bodenchemische Situation der Waldböden werden im folgenden Abschnitt näher erläutert.

Die Abbildungen 104–115 zeigen die räumlichen Verteilungen der Vorräte in der BZE II und Veränderungen zur BZE I auf Profilebene für die Elemente Calcium, Magnesium, Kalium, Stickstoff und Kohlenstoff. Des Weiteren wurde die Basensättigung als bodenchemischer Indikator ausgewertet. Die Basensättigung ist ein relativ guter Indikator für die Versauerungsdynamik und für die Ausstattung eines Standortes mit wichtigen Makronährelementen wie  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  oder  $\text{K}^+$  (HARTMANN u. VON WILPERT 2016, MEESENBERG et al. 2019, SCHULTE-BISPING et al. 2001). Aufgrund der hohen Industriedichte und somit hohen Staub und Stoffeinträgen ist der Ballungsraum Bitterfeld (Chemiedreieck) mit 3 roten Punkten in der räumlichen Darstellung hervorgehoben. Vorwiegend durch Flugasche beeinflusste BZE-Punkte sind mit einem schwarzen Kreuz versehen. In der zugeordneten Balkengrafik sind der Norden Sachsen-Anhalts (nördlich Magdeburg), der Osten im Raum Dübener Heide und Fläming sowie 3 Punkte repräsentativ für den Raum Bit-

terfeld für das jeweilige Element quantitativ dargestellt. Hierbei wurde nur die Substratgruppe der unverlehmten Sande einbezogen, um Effekte des Ausgangssubstrates der Böden bei der Auswertung zu minimieren.

In Abb. 104 sind die für die unverlehmten Sande sehr hohen Calcium-Vorräte in der BZE II im Raum Bitterfeld ersichtlich (Abb. 104, linke Grafik, Abb. 105). Hier war mit dem Kraftwerk Zschornowitz einst eines der größten Braunkohlekraftwerke der Welt in Betrieb, welches nicht nur Strom in das Ballungszentrum um Bitterfeld, sondern auch überregional nach Magdeburg, Berlin, Sachsen und Thüringen lieferte. Es wurde 1992 stillgelegt. Da die BZE I-Beprobung dieser Standorte im November 1992 erfolgte, können die Zunahmen nicht auf dieses Kraftwerk zurückgeführt werden; das Niveau der Bodenvorräte im überregionalen Vergleich jedoch schon. Die durchschnittlichen Calciumvorräte im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm betragen für den unverlehmten Sand im Norden Sachsen-Anhalts sowohl in der BZE I und BZE II jeweils 600 kg Calcium je Hektar, dies entspricht dem Mittel des unverlehmten und ungekalkten Sandes in Niedersachsen (EVERS et al. 2019). Im Osten Sachsen-Anhalts liegen die Calciumvorräte in der BZE I bei rund 1000 kg/ha, welches in Niedersachsen den gekalkten Sanden entspricht (EVERS et al. 2019). Die Calciumvorräte nahmen in dieser Region um rund 20 % bezogen auf die BZE I ab, dies wurde auch in Niedersachsen bei den unverlehmten Sanden festgestellt. Im Raum Bitterfeld liegen die Calciumvorräte in Bereichen der hohen Nährstoffversorgung zwischen 4000–6500 kg/ha Calcium mit Zunahmen über 2000 kg weit über dem, was für die Standorte des unverlehmten Sandes typisch ist.

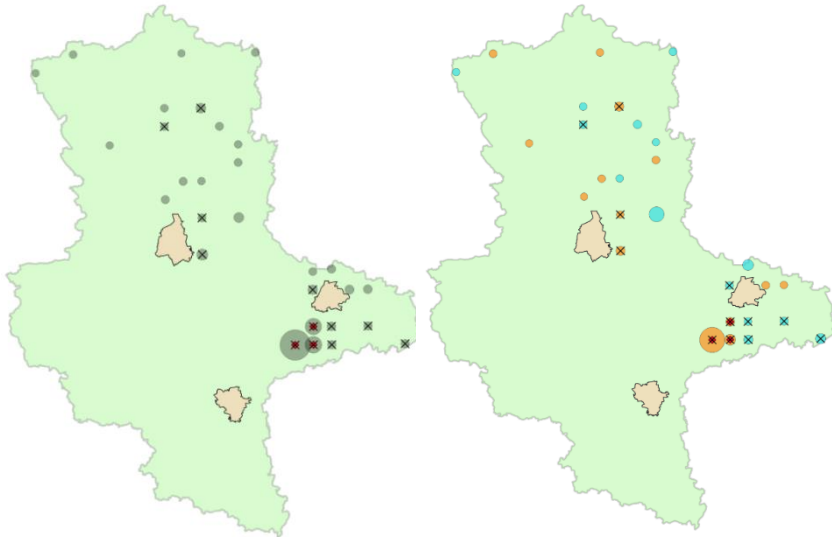


Abbildung 104: Calciumvorräte [kg/ ha] im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II (links) und Veränderungen der Calciumvorräte auf Profilebene BZE II – BZE I (rechts); die Größe der Kreise entspricht der Höhe der jeweiligen Vorräte, x Flugasche beeinflusst, roter Punkt Raum Bitterfeld, orange Zunahmen, blau Abnahmen der Calciumvorräte

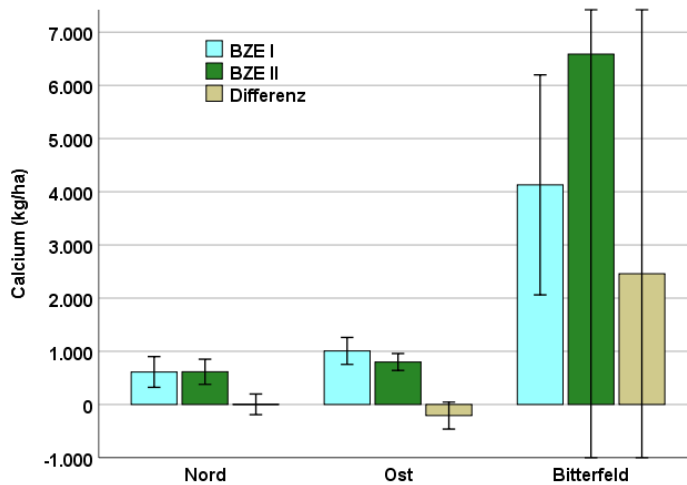


Abbildung 105: Calciumvorräte [kg/ ha] der BZE I, BZE II und Differenz im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II für den Norden, Osten und Raum Bitterfeld in Sachsen-Anhalt

Bei Magnesium zeigt sich ein ähnliches Bild, auch hier finden sich die höchsten Magnesiumvorräte und -zunahmen zwischen der BZE I und BZE II beim unverlehmten Sand im Raum Bitterfeld (rote Punkte, Abb. 106). Hier sind die Vorräte zum Zeitpunkt der BZE I mehr als doppelt so hoch, zum Zeitpunkt der BZE II fast dreimal so hoch wie das Mittel der im Norden und Osten (ohne Bitterfeld) gelegenden BZE-Punkte des unverlehmten Sandes (Abb. 107).

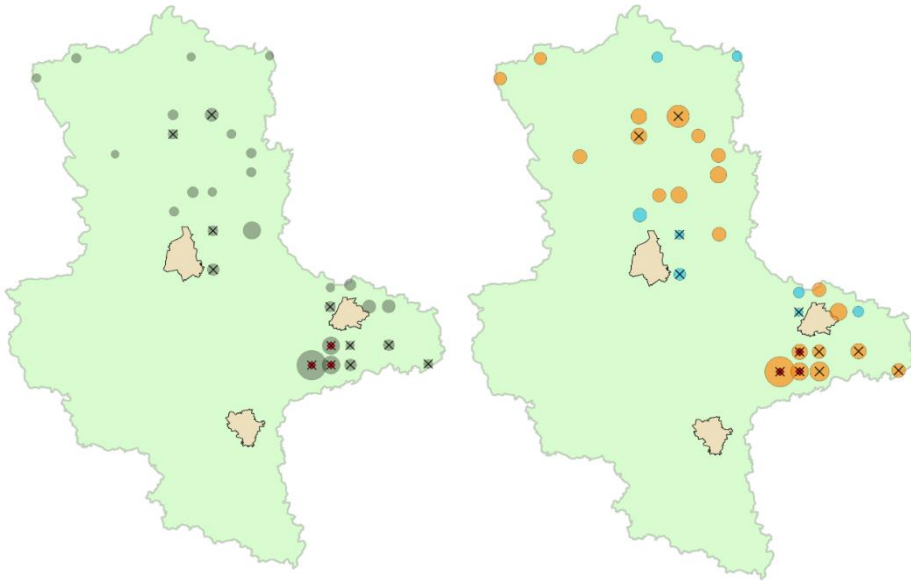


Abbildung 106: Magnesiumvorräte [kg/ha] im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II (links) und Veränderungen der Magnesiumvorräte auf Profilebene BZE II – BZE I (rechts), die Größe der Kreise entspricht der Höhe der jeweiligen Vorräte, x Flugasche beeinflusst, roter Punkt Raum Bitterfeld, orange Zunahmen, blau Abnahmen der Magnesiumvorräte

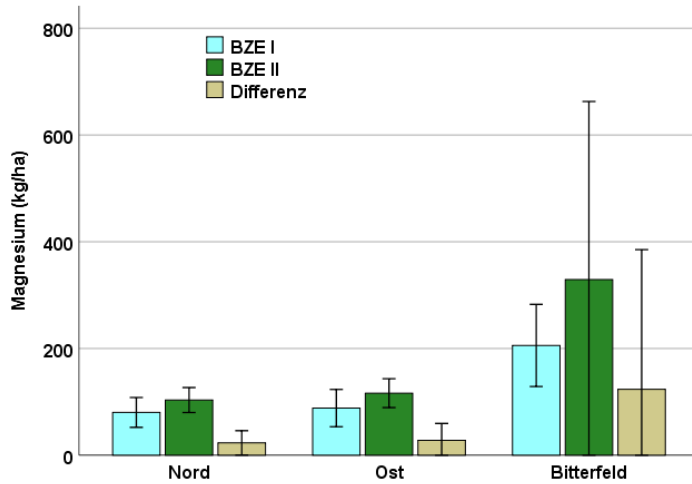


Abbildung 107: Magnesiumvorräte [kg/ha] der BZE I, BZE II und Differenz im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II für den Norden, Osten und Raum Bitterfeld in Sachsen-Anhalt

Auch bei den Kaliumvorräten der BZE II und den Veränderungen zur BZE I fällt der Osten Sachsen-Anhalts mit höheren Vorräten und Zunahmen von Kalium auf (Abb. 108 und 109). Neben den BZE-Punkten im Raum Bitterfeld trifft dies auch auf die BZE-Punkte im Fläming zu. Da aber die Zunahmen von Kalium analytisch aufgrund zu geringer Werte in der BZE I sicher deutlich überschätzt sind, wird nicht weiter auf die Differenzen eingegangen (siehe auch Kap. 6.5.3.3). Mit Kaliumvorräten zwischen 460 kg/ha (Norden), 550 kg/ha (Osten) und 730 kg (Raum Bitterfeld) erreicht der unverlehmte Sand doppelt bis fast vierfach so hohe Kaliumvorräte wie die unverlehmten Sande in Niedersachsen mit 200 kg/ha (EVERS et al. 2019).

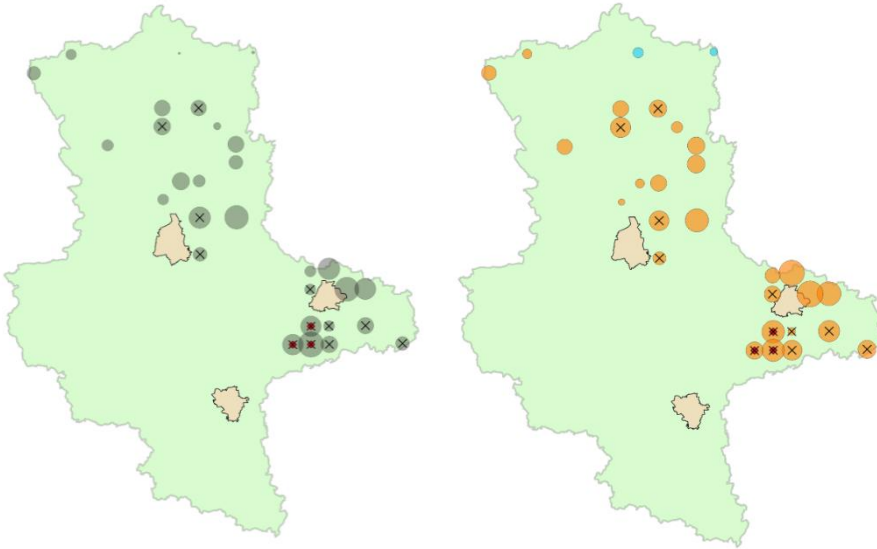


Abbildung 108: Kaliumvorräte [kg/ha] im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II (links) und Veränderungen der Kaliumvorräte auf Profülebene BZE II – BZE I (rechts), die Größe der Kreise entspricht der Höhe der jeweiligen Vorräte, × Flugasche beeinflusst, roter Punkt Raum Bitterfeld, orange Zunahmen, blau Abnahmen der Kaliumvorräte

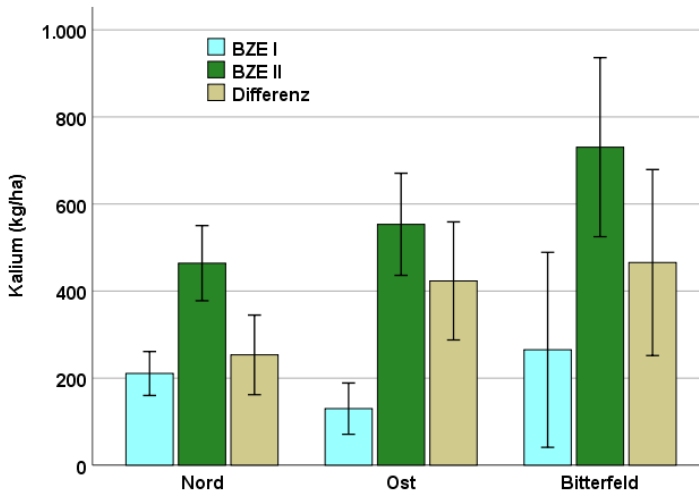


Abb. 109: Kaliumvorräte [kg/ha] der BZE I, BZE II und Differenz im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II für den Norden, Osten und Raum Bitterfeld in Sachsen-Anhalt



Die durchschnittliche Basensättigung auf Profilebene ist sowohl im Norden als auch im Osten (ohne Raum Bitterfeld) beim unverlehmten Sand zwischen der BZE I und BZE II leicht gesunken (Abb. 111), liegt aber mit 18 % (Norden) und 25 % (Osten) immer noch deutlich über den Vergleichswerten der BZE II für den unverlehmten Sand in Niedersachsen (ungekalkt 10 %, gekalkt 13 %; EVERS et al. 2019). Im Raum Bitterfeld weisen die Profile durchschnittliche Basensättigungen zwischen 70–80 % auf, dies sind sonst typische Werte für beispielsweise Lehme, Tone und Basalte oder Rheinweiß-Standorte des unverlehmten Sandes im Hessischen Ried (PAAR et al. 2016). Die Basensättigung nahm bei den unverlehmten Sanden in Sachsen-Anhalt von der BZE I zur BZE II häufig ab, bei den flugaschebeeinflussten Standorten kam es eher zu leichten Zunahmen (schwarze Kreuze, Abb. 110).

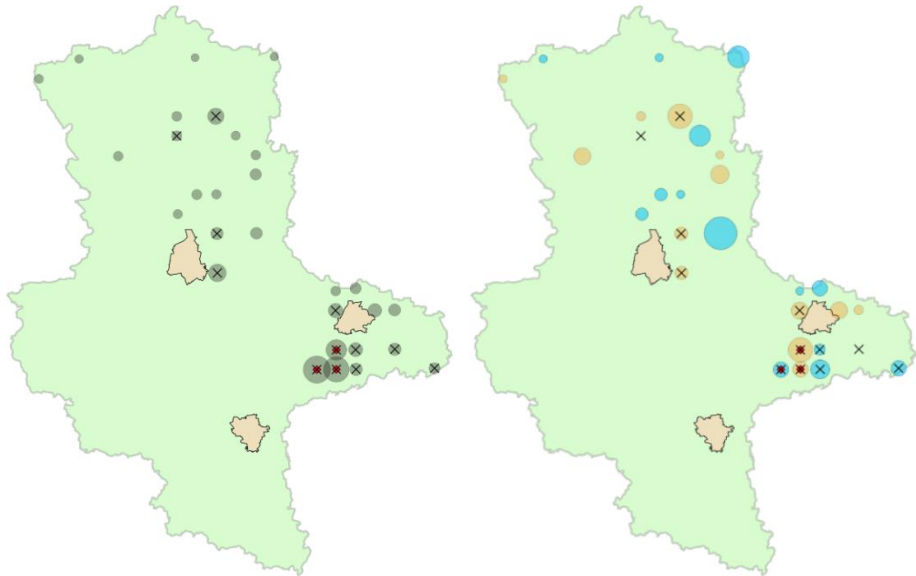


Abbildung 110: Durchschnittliche Basensättigung [%] in Mineralböden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II (links) und Veränderungen der Basensättigung auf Profilebene BZE II – BZE I (rechts), die Größe der Kreise entspricht der Höhe der jeweiligen Vorräte, x Flugasche beeinflusst, roter Punkt Raum Bitterfeld, orange Zunahmen, blau Abnahmen der Basensättigung

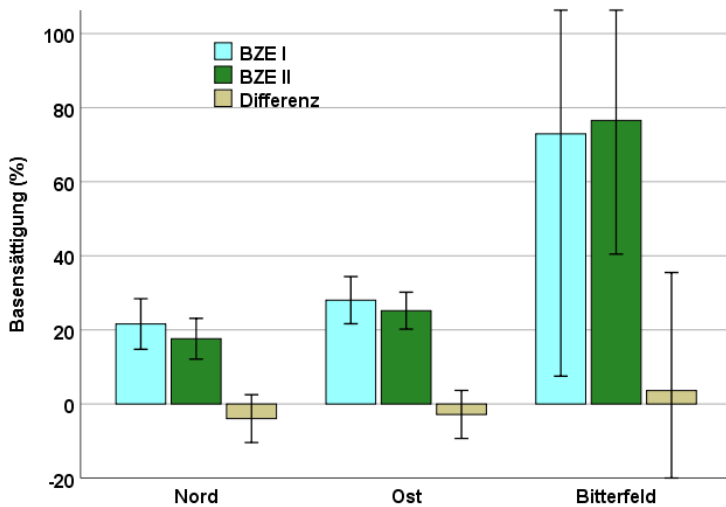


Abbildung 111: Durchschnittliche Basensättigung [%] der BZE I, BZE II und Differenz im Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II für den Norden, Osten und Raum Bitterfeld in Sachsen-Anhalt

Vergleichbare Muster wie bei Calcium, Magnesium, Kalium und der Basensättigung zeigen sich auch für die Elemente Kohlenstoff und Stickstoff. Relativ hohe Kohlenstoffvorräte sind zwar überall in Sachsen-Anhalt beim unverlehmten Sand zu beobachten, im Osten sind sie aber auffällig höher (Abb. 112 links). Mit rund 110 t/ha liegen die Kohlenstoffvorräte im Osten Sachsen-Anhalts (ohne den Raum Bitterfeld) um 15 t/ha höher als im Norden des Landes. Im Raum Bitterfeld (rote Punkte Abb. 112 links) speichern die drei BZE-Punkte des unverlehmten Sandes 120 t/ha Kohlenstoff bis 90 cm Bodentiefe (Abb. 113). Die Speicherraten zwischen der BZE I und BZE II sind mit 25 t/ha im Norden, 37 t/ha im Osten und 65 t/ha im Raum Bitterfeld sehr unterschiedlich (Abb. 113 rechts). Nur im Norden traten auch Kohlenstoffverluste auf (blaue Punkte). Die regionalen Unterschiede in Sachsen-Anhalt hinsichtlich der Kohlenstoffvorräte bestanden in der BZE I noch nicht, hier lagen die Vorräte zwischen 57 und 74 t/ha auf einem relativ ausgewogenem Niveau (Abb. 113).

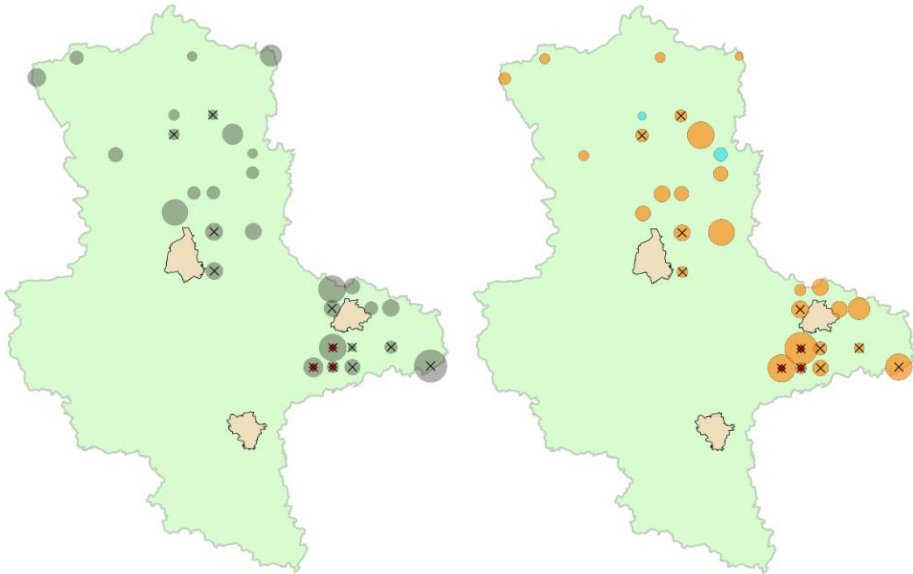


Abbildung 112: Kohlenstoffvorräte [t/ha] im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II (links) und Veränderungen der Kohlenstoffvorräte auf Profilebene BZE II – BZE I (rechts), die Größe der Kreise entspricht der Höhe der jeweiligen Vorräte, × Flugasche beeinflusst, roter Punkt Raum Bitterfeld, orange Zunahmen, blau Abnahmen der Kohlenstoffvorräte

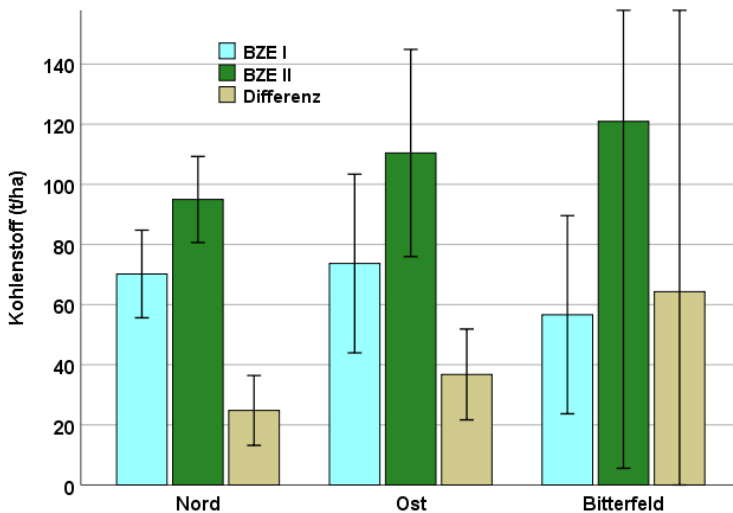


Abbildung 113: Kohlenstoffvorräte [t/ha] der BZE I, BZE II und Differenz im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II für den Norden, Osten und Raum Bitterfeld in Sachsen-Anhalt

Die Stickstoffvorräte in der Substratgruppe unverlehmter Sand auf Profilebene zeigen das gleiche Muster wie Kohlenstoff: mit 4600 kg/ha sind sie im Norden des Landes am geringsten, im Osten mit 5400 kg/ha um 17 % höher und im Raum Bitterfeld mit knapp 6400 kg/ha um knapp 30 % höher als im Norden. Die Veränderungen zur BZE I sind im Osten mit knapp 1600 kg/ha um den Faktor 2,7 höher als im Norden, im Raum Bitterfeld mit 2700 kg/ha sogar um den Faktor 4,5. Wie beim Kohlenstoff sind die Stickstoffvorräte zur BZE I bei knapp 4000 kg regional wenig differenziert.

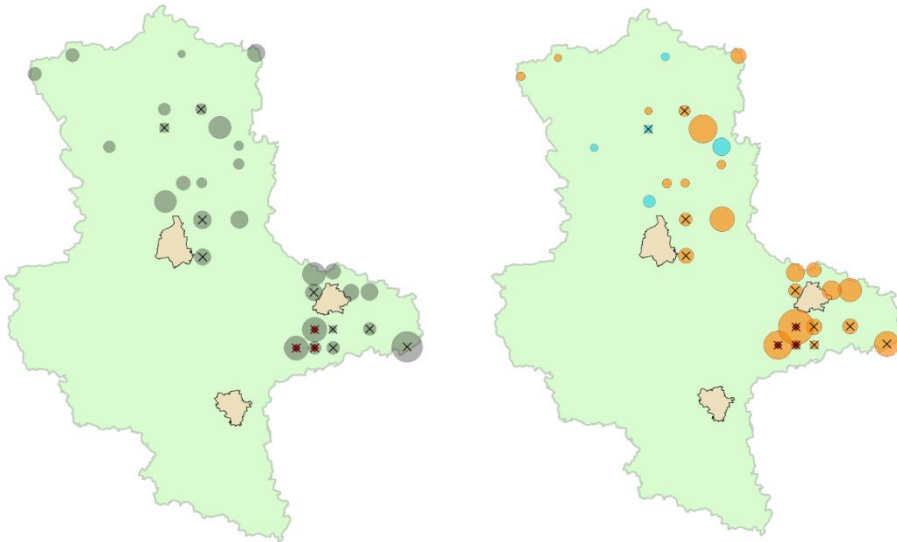


Abbildung 114: Stickstoffvorräte [kg/ha] im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II (links) und Veränderungen der Stickstoffvorräte auf Profilebene BZE II – BZE I (rechts), die Größe der Kreise entspricht der Höhe der jeweiligen Vorräte, x Flugasche beeinflusst, roter Punkt Raum Bitterfeld, orange Zunahmen, blau Abnahmen der Stickstoffvorräte

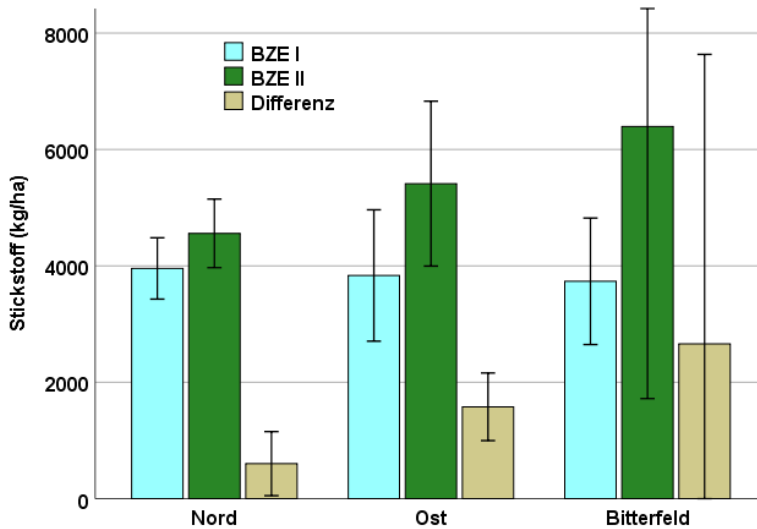


Abbildung 115: Stickstoffvorräte [kg/ha] der BZE I, BZE II und Differenz im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe in der Substratgruppe unverlehmter Sand der BZE II für den Norden, Osten und Raum Bitterfeld in Sachsen-Anhalt

Neben dem Einfluss von Stoffeinträgen (Deposition, Düngung, Kalkung) beeinflussen Bodenbearbeitungen wie Streifenpflug, Vollumbruch oder auch Bodenlockerungen die Vorräte im Mineralboden. Teilweise überlagert sich der Einfluss von Flugasche und Bodenbearbeitung. Am Beispiel von Kohlenstoff und Stickstoff werden im Folgenden die vier Strata (1) weder Flugascheeinfluss noch Bodenbearbeitung („kein Einfluss“) (2) nur Flugascheeinfluss (3) nur Bodenbearbeitung (4) Bodenbearbeitung und Flugascheeinfluss am jeweiligen BZE-Punkt mit ihren Mittelwerten und Streumaßen in Tabelle 13 und Abb. 116 angegeben. Berechnungsgrundlage waren wieder nur die BZE-Punkte innerhalb der Substratgruppe unverlehmter Sand, da relativ ähnliche Bodenverhältnisse bestehen und diese Substratgruppe in Sachsen-Anhalt verhältnismäßig häufig vertreten ist.

Tabelle 13: Durchschnittliche Kohlenstoffvorräte in der BZE I und II sowie Veränderungen [t/ha] auf Profilebene in Sachsen-Anhalt nach Flugasche und Bodenbearbeitung der Substratgruppe unverlehmter Sand (abzüglich eines Extrempunktes)

| Kohlenstoffvorrat              | [t/ha]   | n  | Mittel<br>[t/ha] | Median<br>[t/ha] | SD<br>[t/ha] | SF<br>[t/ha] | sig |
|--------------------------------|----------|----|------------------|------------------|--------------|--------------|-----|
| kein Einfluss                  | BZE I    | 9  | 72,0             | 72,5             | 26,5         | 8,8          |     |
|                                | BZE II   | 9  | 86,7             | 82,7             | 23,3         | 7,6          |     |
|                                | BZE II-I | 9  | 14,7             | 12,9             | 14,9         | 5,0          | *   |
| nur Flugasche                  | BZE I    | 4  | 53,0             | 52,8             | 10,2         | 5,1          |     |
|                                | BZE II   | 4  | 91,1             | 86,6             | 24,1         | 12,1         |     |
|                                | BZE II-I | 4  | 38,1             | 29,0             | 28,6         | 14,3         |     |
| nur Bodenbearbeitung           | BZE I    | 9  | 74,2             | 62,9             | 39,7         | 13,2         |     |
|                                | BZE II   | 9  | 114,9            | 103,8            | 30,3         | 10,1         |     |
|                                | BZE II-I | 9  | 40,7             | 35,3             | 23,2         | 7,7          | *   |
| Flugasche und Bodenbearbeitung | BZE I    | 8  | 70,6             | 69,7             | 29,1         | 10,3         |     |
|                                | BZE II   | 8  | 110,6            | 105,4            | 49,8         | 17,6         |     |
|                                | BZE II-I | 8  | 40,0             | 30,5             | 31,0         | 11,0         | *   |
| gesamt                         | BZE I    | 30 | 69,7             | 63,5             | 29,8         | 5,4          |     |
|                                | BZE II   | 30 | 102,1            | 95,7             | 35,0         | 6,4          |     |
|                                | BZE II-I | 30 | 32,4             | 27,0             | 25,8         | 4,7          | *   |

n = Anzahl, SD = Standardabweichung, SF=Standardfehler, sig=Signifikanzniveau <0,05

Im Vergleich zur mittleren Zunahme von rund 32 t/ha in der Substratgruppe unverlehmter Sand liegen die Zunahmen der nur durch Flugasche beeinflussten BZE-Punkte bei 38,1 t/ha, der nur durch Bodenbearbeitung gekennzeichneten BZE-Punkte bei 40,7 t/ha und der durch beide Faktoren beeinflussten Punkte bei 40,0 t/ha. Im Kollektiv ohne Flugasche und ohne Bodenbearbeitung dagegen liegen die Zunahmen mit rund 15 t/ha deutlich niedriger. Die Kohlenstoffzunahmen streuen jedoch erheblich, vor allem unter dem Einfluss von Flugasche und Bodenbearbeitung (Abb. 116). Kohlenstoffverluste kommen nur im Kollektiv „keine“ vor. Im Kollektiv „Flugasche“ konnte die Zunahme nicht abgesichert werden, in allen anderen Kollektiven sind die Zunahmen signifikant. Zwischen den Kollektiven ergaben sich nur signifikante Unterschiede zwischen dem Kollektiv „keine“ und „nur Bodenbearbeitung“.

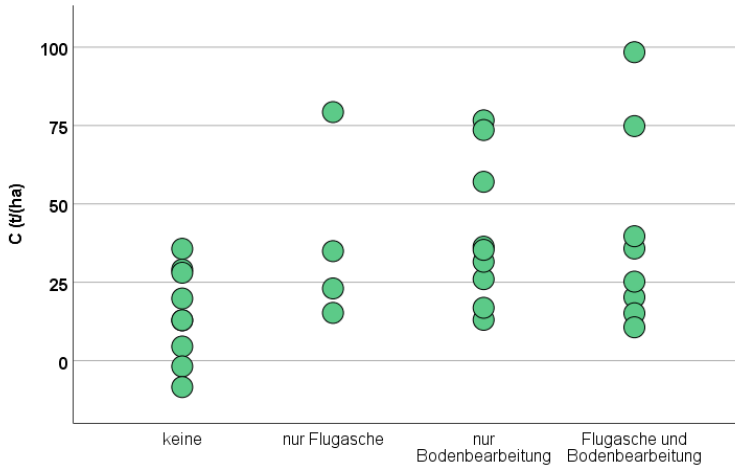


Abbildung 116: Veränderungen der Kohlenstoffvorräte [t/ha] zwischen BZE I und II für die Substratgruppe unverlehmter Sand nach Flugasche und Bodenbearbeitung in Sachsen-Anhalt

Der Einfluss durch Bodenbearbeitung und Flugasche fällt beim Stickstoffvorrat ähnlich aus wie bei den Kohlenstoffvorräten. Die entsprechenden Werte mit ihren Streumaßen sind in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Flugasche in Tabelle 14 und Abb. 117 angegeben. Berechnungsgrundlage waren wie bei Kohlenstoff nur die BZE-Punkte innerhalb der Substratgruppe unverlehmter Sand.

Tabelle 14: Durchschnittliche Stickstoffvorräte in der BZE I und II sowie Veränderungen [t/ha] auf Profilebene in Sachsen-Anhalt nach Flugasche und Bodenbearbeitung der Substratgruppe unverlehmter Sand

| Stickstoffvorrat               | [t/ha]   | n  | Mittel<br>[t/ha] | Median<br>[t/ha] | SD<br>[t/ha] | SF<br>[t/ha] | sig |
|--------------------------------|----------|----|------------------|------------------|--------------|--------------|-----|
| kein Einfluss                  | BZE I    | 9  | 3,88             | 4,13             | 0,54         | 0,18         |     |
|                                | BZE II   | 9  | 4,05             | 4,10             | 0,83         | 0,28         |     |
|                                | BZE II-I | 9  | 0,22             | 0,22             | 0,66         | 0,22         |     |
| nur Flugasche                  | BZE I    | 4  | 3,88             | 3,88             | 0,22         | 0,51         |     |
|                                | BZE II   | 4  | 4,81             | 4,25             | 0,55         | 0,34         |     |
|                                | BZE II-I | 4  | 0,91             | 0,35             | 1,48         | 0,49         |     |
| nur Bodenbearbeitung           | BZE I    | 10 | 4,27             | 3,76             | 1,62         | 0,51         |     |
|                                | BZE II   | 10 | 5,62             | 5,50             | 1,09         | 0,34         |     |
|                                | BZE II-I | 9  | 1,32             | 1,74             | 1,48         | 0,49         | *   |
| Flugasche und Bodenbearbeitung | BZE I    | 8  | 3,77             | 3,62             | 1,48         | 0,52         |     |
|                                | BZE II   | 8  | 5,50             | 5,33             | 2,08         | 0,73         |     |
|                                | BZE II-I | 8  | 1,78             | 1,31             | 1,24         | 0,44         | *   |
| gesamt                         | BZE I    | 31 | 3,98             | 3,93             | 1,19         | 0,21         |     |
|                                | BZE II   | 31 | 5,03             | 4,58             | 1,53         | 0,27         |     |
|                                | BZE II-I | 30 | 1,06             | 0,81             | 1,32         | 0,24         | *   |

n = Anzahl, SD = Standardabweichung, SF=Standardfehler, sig=Signifikanzniveau <0,05

Im Vergleich zur mittleren Zunahme von rund 1 t/ha in der Substratgruppe unverlehmter Sand liegen die Zunahmen der nur durch Flugasche beeinflussten BZE-Punkte mit 0,9 t/ha geringfügig unter diesem Wert. Die nur durch Bodenbearbeitung gekennzeichneten BZE-Punkte weisen mit 1,32 t/ha und der durch beide Faktoren beeinflussten Punkte (mit 1,78 t/ha) deutlich höhere Werte aus. Im Kollektiv ohne Flugasche und ohne Bodenbearbeitung dagegen liegen die Zunahmen mit 0,2 t/ha deutlich niedriger. Wie bei Kohlenstoff streuen auch die Vorratsveränderungen von Stickstoff erheblich, vor allem unter dem Einfluss von Flugasche und Bodenbearbeitung (Abb. 117). Stickstoffverluste kommen im Unterschied zu Kohlenstoff auch im Kollektiv „nur Flugasche“ und „nur Bodenbearbeitung“ vor. Signifikant waren die Zunahmen nur in den Kollektiven mit Bodenbearbeitung und im Gesamtkollektiv. Die Stickstoffzunahmen in den Kollektiven mit Bodenbearbeitung ließen sich gegen die BZE-Punkte ohne Einfluss absichern.



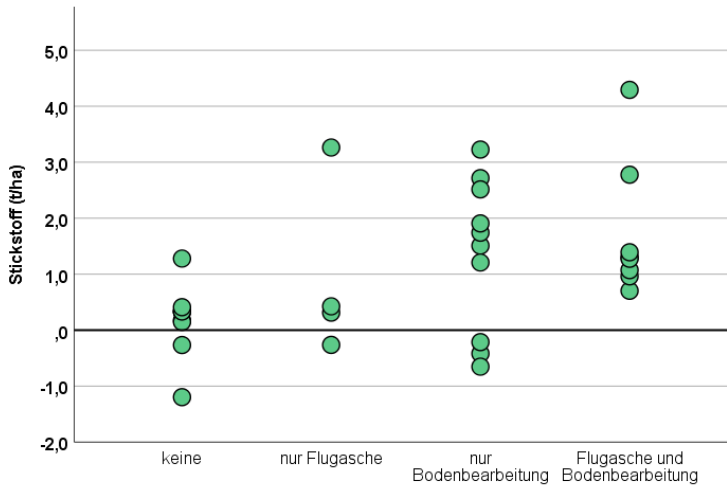


Abbildung 117: Veränderungen der Stickstoffvorräte [t/ha] zwischen BZE I und II für die Substratgruppe unverlehmter Sand nach Flugasche und Bodenbearbeitung in Sachsen-Anhalt

Die signifikanten Unterschiede in Zusammenhang mit der Bodenbearbeitung sind wahrscheinlich auf zwei Einflussfaktoren zurückzuführen. Bei allen Beständen fand die Bodenbearbeitung vor der BZE I statt. Aus anderen Untersuchungen ist bekannt, dass es direkt nach stärkeren Störungen wie Kahlschlägen, Entnahme größerer Baumgruppen oder Bestandesumbaumaßnahmen mit Bodenbearbeitung (z. B. Grubbern) zu erheblichen Verlusten von Kohlenstoff und Stickstoff kommen kann (HEINSDORF et al. 1986, HORNBECK et al. 1987, BLOCK 2006, HEGG et al. 2004, AHRENDTS et al. 2005). Hierdurch sind die Böden weiter von einem potenziellen Gleichgewichtszustand entfernt. Entsprechend können in der folgenden Bestandesentwicklung höhere Akkumulationsraten auftreten (BORMANN et al. 1995, HEINSDORF et al. 1986). Verstärkt wird dieser Effekt wahrscheinlich durch die hohe Akkumulationsraten in mittelalten Kiefernbeständen (BÖTTCHER u. SPRINGOB 2001, BRINKMANN u. NIEDER 2002). Zurückgeführt werden können diese hohen Speicherraten auf die überproportional hohen Streufalleinträge von Kiefern in diesem Altersabschnitt (AHRENDTS 2008).

Diese Auswertungen zeigen, dass die bodenchemischen Parameter und deren Dynamik teilweise stark durch die atmosphärischen Einträge in Sachsen-Anhalt beeinflusst wurden. Neben dem Osten des Landes (Landkreise Anhalt-Bitterfeld und Wittenberg) sind die BZE-Punkte im Raum Bitterfeld besonders betroffen. Hier liegen die Calciumvorräte und die Basensättigung deutlich über den Vergleichswerten des unverlehmten Sandes in Niedersachsen. Weiterhin auffällig für diese Region sind hohe Magnesium-, Kalium-, Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte im Auflagehumus

und Mineralboden. Zwischen der BZE I und BZE II wurden Zunahmen der Calcium- und Magnesiumvorräte vor allem im Raum Bitterfeld, für Kalium, Kohlenstoff und Stickstoff auch im Osten und am höchsten im Raum Bitterfeld festgestellt. Dies kann auf die atmosphärischen Stoffeinträge zurückgeführt werden. Überlagert werden diese Einflüsse durch Bodenbearbeitungen wie z. B. den Streifenpflug, die überall im Osten und häufig auch im Norden des Landes in Wäldern durchgeführt wurden. Auch hier konnten in der BZE höhere Kohlen- und Stickstoffvorräte sowie Zunahmen von der BZE I zur BZE II festgestellt werden.

Die BZE in Sachsen-Anhalt verfügt jedoch für die Absicherung und eine genaue Quantifizierung dieser Zusammenhänge über einen zu geringen Stichprobenumfang. Entsprechend sollten auch insbesondere die Änderungssignale mit großer Vorsicht interpretiert werden. Dennoch zeigen die Auswertungen eindrucksvoll, dass viele Standorte in historisch industriell geprägten Regionen durch sehr hohe anthropogene Stoffanreicherungen gekennzeichnet sind, die teilweise deutlich über dem Niveau naturnaher Systeme liegen dürften.

## 8 Waldernährung

*Inge Dammann, Egbert Schönfelder, Ulrike Talkner, Jan Evers, Uwe Paar*

### 8.1 Einleitung

Waldbäume verfügen über Anpassungsmechanismen, die es ihnen ermöglichen, innerhalb von genetisch bestimmten Grenzen auf Umweltveränderungen zu reagieren, um über Jahrzehnte bis Jahrhunderte an einem Standort existieren zu können. Hierzu gehören auch bauminterne Regulationsstrategien, wie z. B. die Aufrechterhaltung der Photosyntheseleistung durch die bevorzugte Versorgung der Nadeln und Blätter mit Nährelementen. In den Waldböden werden durch Verwitterung und Mineralisierung ständig Nährstoffe freigesetzt. Außerdem werden Stoffe über die Luft in die Waldökosysteme eingetragen. Von den Waldbäumen werden die Nährelemente in Abhängigkeit von der Nährstoffverfügbarkeit aufgenommen, wobei die Bäume die Elementaufnahme selektiv steuern, indem einige Elemente bevorzugt aufgenommen und andere diskriminiert werden (MARSCHNER 1995). Daher kann sich die Elementkonzentration in der Pflanze von der Konzentration in der Bodenlösung unterscheiden. Die Nährstoffkonzentrationen in Nadeln und Blättern sind das Ergebnis dynamischer Wechselwirkungen zwischen der Verfügbarkeit der Nährstoffe und deren Aufnahme, Transport und Allokation im Baum (KAHLE 2012, MARSCHNER 1995, HEINZE u. FIEDLER 1992).

Aufgrund des Bestrebens der Bäume, die Nadeln und Blätter möglichst optimal mit Nährstoffen zu versorgen, sind die Elementgehalte und -verhältnisse sensible Indikatoren für die Versorgung der Pflanzen. Ausreichend hohe Nährstoffgehalte und deren harmonische Zusammensetzung sind die Basis für gesundes Wachstum und die Widerstandsfähigkeit der Waldbäume gegen biotische und abiotische Risiken (FLÜCKIGER u. BRAUN 2003).

Pflanzen benötigen die sogenannten Makronährelemente, zu denen Stickstoff (N), Phosphor (P), Kalium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Schwefel (S) gehören, in relativ großen Mengen. Die sogenannten Mikronährelemente Eisen (Fe), Mangan (Mn), Zink (Zn) u. a. sind nur in sehr viel geringeren Mengen in der Pflanze enthalten (HEINZE u. FIEDLER 1992). Die Nährelemente sind wichtig, um die Pflanzenstruktur und die Funktionen von Enzymen, Nukleinsäuren sowie Membranen aufrecht zu erhalten und u. a. Photosynthese, Ionenbilanz, Osmose und Wachstum der Bäume gewährleisten zu können. Übersichten zur Aufnahme- und Bindungsform sowie zu der Bedeutung und den Funktionen von einzelnen Nährstoffen in der Pflanze zeigen u. a. HEINZE u. FIEDLER (1992), SCHULZE et al. (2002) und MARSCHNER (1995). Zu den im Phloem beweglichen Stoffen gehören Kalium, Magnesium, Phosphor und Schwefel, wenig beweglich sind Eisen, Mangan und Zink. Zu den unbeweglichen Stoffen wird Calcium gerechnet (HEINZE u. FIEDLER 1992).

Calcium kann von den Orten, zu denen es über das Xylem transportiert wurde, nicht wieder mobilisiert werden und reichert sich an.

Die ersten Blatt- und Nadelanalysen für Waldbäume stammen aus den frühen 1960er-Jahren aus Düngungsversuchen (MELLERT et al. 2004). In den Jahren 1950–1970 konzentrierte sich die Forschung darauf, über Düngungsversuche die Möglichkeiten der Wachstumssteigerung auf verschiedenen Standorten zu erfassen und über standörtlich determinierte Düngungen das Wachstum zu verbessern (HEINSDORF u. BRANSE 2002). Heute gehören waldernährungskundliche Daten zu den Bewertungselementen für umweltpolitische Fragestellungen wie die Erfolgskontrolle von Luftreinhaltmaßnahmen, die Entwicklung der Bodenversauerung und der Eutrophierung sowie der Nährstoffverfügbarkeit unter dem Einfluss des Klimawandels. Außerdem können sie in die Kalkungs- und Vollbaumnutzungsplanung einfließen.

Die flächenrepräsentativen Ergebnisse der BZE II zur Blatt- und Nadelanalyse geben einen Überblick über die Nährstoffversorgung für die Baumarten Kiefer, Fichte, Buche und Eiche in Sachsen-Anhalt. Für die einzelnen Baumarten werden die Elementgehalte und Elementquotienten insgesamt dargestellt. Für die Kiefer erfolgt außerdem eine Gliederung in die häufigsten Substratgruppen. Zeitliche Trends wurden aus dem Intensiven Monitoring, mit Erhebungen im ein- bzw. zweijährigen Turnus, abgeleitet, um die Ergebnisse der Einzelerhebungen (BZE) einordnen zu können.

## 8.2 Material und Methoden

Für die Baumarten Kiefer und Fichte sind auf der Basis von BZE-Punkten in Sachsen-Anhalt bisher zwei landesweite waldernährungskundliche Inventuren durchgeführt worden (BZE I und II). Die Außenaufnahmen der BZE I fanden im Spätherbst 1992 statt. Es wurden insgesamt 32 BZE-Punkte mit Kiefer und 8 mit Fichte nadelanalytisch untersucht. In den Laubholzbeständen unterblieb 1992 die Blattanalyse. Bei der BZE II wurden 44 BZE-Punkte mit Kiefer, 13 mit Eiche, 10 mit Fichte und 11 mit Buche einbezogen (s. Tab. 15).

*Tabelle 15: Landesweite Inventuren zur Blatt- und Nadelanalyse in Sachsen-Anhalt (BZE I und II). Anzahl der Erhebungspunkte insgesamt sowie je Baumart.*

| Inventur | Probenahmejahr | Anzahl der Erhebungspunkte | Anzahl der Erhebungspunkte je Baumart |       |        |       |
|----------|----------------|----------------------------|---------------------------------------|-------|--------|-------|
|          |                |                            | Kiefer                                | Eiche | Fichte | Buche |
| BZE I    | 1992           | 40                         | 32                                    | 8     | -      | -     |
| BZE II   | 2007           | 67                         | 44                                    | 13    | 10     | 11    |

Die grundsätzliche methodische Vorgehensweise ist im Kapitel 5.3.2 (Blatt- und Nadelernährung) beschrieben, die Behandlung der Proben und die Analysemethoden sind in Kapitel 11 (Qualitätssicherung) dargelegt. An 68 BZE II-Punkten in Sachsen-Anhalt wurden 2007 Nadeln und Blätter von je drei Probedäumen je Baumart als Mischprobe chemisch analysiert. Da an einigen Erhebungspunkten mehrere Baumarten vorkommen, sind insgesamt 78 Beprobungen von je drei Probedäumen erfolgt. Die Angaben zu den Elementgehalten (mg/g) beziehen sich auf die getrocknete Blatt- bzw. Nadelmasse (Trockensubstanz = TS).

*Tabelle 16: Grenzwerte (Median) für die Bewertung von Elementgehalten [mg/g] in Blättern und Nadeln (1. Nadeljahrgang) von Buche, Fichte, Kiefer und Eiche (GÖTTLEIN 2015)*

| Baumart/Bewertungsbereich | N     | P    | K     | Ca   | Mg   | S    | Fe    | Mn    | Zn    |
|---------------------------|-------|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| <b>Buche</b>              |       |      |       |      |      |      |       |       |       |
| OG Normalbereich          | 25,00 | 1,70 | 9,35  | 8,55 | 1,50 | 2,25 | 0,250 | 2,000 | 0,050 |
| UG Normalbereich          | 19,00 | 1,20 | 6,00  | 5,00 | 1,00 | 1,50 | 0,060 | 0,060 | 0,020 |
| Symptomgrenze             | 16,65 | 0,95 | 4,75  | 4,00 | 0,70 | 1,35 | 0,035 | 0,050 | -     |
| <b>Fichte</b>             |       |      |       |      |      |      |       |       |       |
| OG Normalbereich          | 17,00 | 2,00 | 7,65  | 5,30 | 1,40 | 1,60 | 0,190 | 2,000 | 0,060 |
| UG Normalbereich          | 13,10 | 1,30 | 4,50  | 2,00 | 0,80 | 1,00 | 0,042 | 0,050 | 0,020 |
| Symptomgrenze             | 11,70 | 1,05 | 3,50  | 1,00 | 0,60 | 0,80 | 0,021 | 0,020 | 0,012 |
| <b>Kiefer</b>             |       |      |       |      |      |      |       |       |       |
| OG Normalbereich          | 17,00 | 2,00 | 7,50  | 4,00 | 1,40 | 1,60 | 0,200 | 0,800 | 0,070 |
| UG Normalbereich          | 14,05 | 1,30 | 4,40  | 2,00 | 0,80 | 1,00 | 0,040 | 0,040 | 0,020 |
| Symptomgrenze             | 12,60 | 1,00 | 3,50  | 1,00 | 0,60 | 0,95 | 0,030 | 0,010 | 0,010 |
| <b>Eiche</b>              |       |      |       |      |      |      |       |       |       |
| OG Normalbereich          | 26,00 | 2,00 | 10,00 | 8,00 | 2,60 | 2,30 | 0,200 | 1,270 | 0,050 |
| UG Normalbereich          | 20,00 | 1,35 | 6,10  | 5,00 | 1,20 | 1,20 | 0,070 | 0,066 | 0,015 |
| Symptomgrenze             | 16,70 | 0,90 | 3,60  | 3,00 | 0,90 | 1,00 | 0,050 | -     | -     |

OG = Obergrenze, UG = Untergrenze

Für die Bewertung der Elementgehalte wurden die Grenzwerte (Median) nach GÖTTLEIN (2015) genutzt (s. Tab. 16). GÖTTLEIN (2015) führte die gängigen ernährungskundlichen Bewertungssysteme zusammen und ermittelte hieraus für die Hauptbaumarten zu den einzelnen Nährelementen das 25 %-Perzentil, den Median und das 75 %-Perzentil jeweils für die Symptomgrenze sowie die untere und obere Grenze der normalen Ernährung. Der errechnete Median teilt die in der Literatur angegebenen Werte in zwei Hälften, er gibt damit den „wahrscheinlichsten“ Grenzwert für die einzelnen Bewertungsbereiche aus den verwendeten Bewertungssystemen an. Die Symptomgrenze markiert den Grenzwert, unterhalb dessen sichtbare Mangelsymptome auftreten. Der Bereich zwischen der Symptomgrenze und der Untergrenze des Normalbereichs repräsentiert den Bereich latenten Mangels. Elementgehalte über dem Normalbereich weisen auf eine Überversorgung hin.

Es wurden primär die Elementgehalte des jüngsten Nadeljahrganges (1. Nadeljahrgang) betrachtet, weil dieser die aktuelle Versorgungslage am besten repräsentiert. Bei Buche und Eiche wurden die voll ausgereiften Blätter (ohne Regenerationstriebe) verwendet.

Als zusätzliches Bewertungskriterium wurden für die Fichte die Magnesiumgehalte des 3. Nadeljahrganges im Verhältnis zum jüngsten Nadeljahrgang einbezogen. Bei der gemeinsamen Betrachtung der Gehalte in verschiedenen Nadeljahrgängen wird ein starker Abfall von Gehalten in den älteren Nadeln gegenüber den jüngsten Nadeln als Hinweis auf einen Versorgungsengpass gewertet (REEMTSMA 1986).

Die Bewertung der Elementverhältnisse wurde für alle vier Baumarten nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012) und für Buche und Fichte zusätzlich nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) vorgenommen (s. Tab. 17). Bei Unterschieden zwischen den Referenzwerten wurde der strengere Wert für die Beurteilung der Stickstoffquotienten verwendet.

Tabelle 17: Grenzwerte harmonischer Elementverhältnisse für Buche, Fichte, Kiefer und Eiche nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

| Baumart | Elementverhältnis | FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) | MELLERT u. GÖTTLEIN (2012) |
|---------|-------------------|---------------------------|----------------------------|
| Buche   | N/P               | 10,0–17,1                 | 10,0–18,9                  |
|         | N/K               | 2,1–3,8                   | 1,9–3,8                    |
|         | N/Ca              | -                         | 1,3–3,5                    |
|         | N/Mg              | 10,4–21,5                 | 8,2–21,7                   |
| Fichte  | N/P               | 7,0–12,0                  | 6,3–11,7                   |
|         | N/K               | 1,9–3,6                   | 1,7–3,3                    |
|         | N/Ca              | -                         | 2,1–5,0                    |
|         | N/Mg              | 10,3–20,0                 | 10,7–21,0                  |
| Kiefer  | N/P               | -                         | 7,4–14,1                   |
|         | N/K               | -                         | 2,0–4,0                    |
|         | N/Ca              | -                         | 3,6–9,1                    |
|         | N/Mg              | -                         | 10,8–22,9                  |
| Eiche   | N/P               | -                         | 9,3–19,6                   |
|         | N/K               | -                         | 1,7–3,7                    |
|         | N/Ca              | -                         | 1,9–5,0                    |
|         | N/Mg              | -                         | 8,1–21,8                   |

Um die Ernährungssituation möglichst differenziert nach Bodeneigenschaften ableiten zu können, wurden die BZE II-Stichprobenpunkte in Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen nach 16 Substratgruppen klassifiziert (s. Kap. 6.2.1). Die BZE-Punkte mit Blatt- und Nadelanalysen verteilen sich in Sachsen-Anhalt auf 12 Substratgruppen (s. Tab. 18). Die Eingruppierung der BZE-Punkte erfolgte nach Ausgangssubstrat, Lagerung, Bodenart, Bodenmorphologie sowie bodenchemischen und -physikalischen Parametern (EVERS et al. 2013b). Entsprechend ihrer ökologischen Ansprüche und den waldbaulichen Entscheidungen der Forstverwaltung und der Waldeigentümer sind die Baumarten in den Substratgruppen unterschiedlich stark vertreten. Aufgrund der Stichprobenanzahl erfolgte eine Darstellung der Ernährungssituation getrennt für die ausgeschiedenen Substratgruppen nur für die Kiefer, soweit mindestens drei BZE-Punkte in der jeweiligen Substratgruppe vorkamen.

Tabelle 18: Übersicht über die Verteilung der BZE-Punkte mit Blatt- und Nadelanalysen 2007 in Sachsen-Anhalt auf Baumarten und Substratgruppen

| Substratgruppe          | Abk. | Kiefer | Eiche | Fichte | Buche |
|-------------------------|------|--------|-------|--------|-------|
| Basalt/Diabas           | BaD  | -      | -     | 1      | -     |
| Granit                  | Grt  | -      | -     | 2      | -     |
| Grauwacke               | Grw  | -      | -     | -      | 1     |
| Kreidesandstein         | KSSs | 1      | -     | -      | -     |
| Lehm                    | Leh  | 1      | 2     | -      | -     |
| Lösslehm                | Loe  | -      | 2     | 1      | 4     |
| Quarzit                 | Qua  | -      | -     | 1      | -     |
| Tonschiefer             | ToS  | -      | 1     | 4      | 2     |
| unverlehmte Sande       | Suv  | 33     | 3     | 1      | 1     |
| schwach verlehmte Sande | Ssv  | 5      | 2     |        | 1     |
| verlehmte Sande         | Sve  | 4      | 3     | -      | 1     |
| Zechstein/Rotliegendes  | Zec  | -      | -     | -      | 1     |
| gesamt                  |      | 44     | 13    | 10     | 11    |

Von den 67 untersuchten BZE-Punkten sind drei Fichtenpunkte im Harz gekalkt worden. Eine Auswertung zum Vergleich gekalkter und ungekalkter BZE-Punkte wurde aufgrund der geringen Stichprobenanzahl nicht durchgeführt.

Für die statistische Auswertung der Unterschiede zwischen den Inventurzeitpunkten wurde der Wilcoxon-Rangsummentest verwendet.

Für die Ermittlung zeitlicher Trends wurden die Elementgehalte in Kiefernadeln von zwei Intensiv-Monitoringflächen (s. Tab. 19) für den Zeitraum 1999–2007 berücksichtigt. Für die einzelnen Nährelemente wurde der Median für den Untersuchungszeitraum ermittelt. Für die statistische Analyse der zeitlichen Trends wurde ein gemischtes lineares Modell gewählt (PINHEIRO u. BATES 2000). Die zeitliche Variable „Jahr“ ging als fester Effekt in das Modell ein, die räumliche Variable „Fläche“ als zufälliger Effekt. Es wurden zwei Modellvarianten verglichen: In der einen Variante wurde nur das Niveau der Elementgehalte für die Flächen geschätzt, in der anderen zusätzlich zum absoluten Niveau auch das lineare Glied des Zeiteinflusses. Die Modellkomponenten wurden mit der ML (Maximum Likelihood)-Methode geschätzt. Die Modellvariante mit dem kleineren AIC (Akaike's Information Criterion) wurde zur Beurteilung der Trends ausgewählt. Zur Berechnung wurde das Statistikprogramm R (Version 2.9.1) mit der Library „nlme“ verwendet (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2009).



*Tabelle 19: Kiefernflächen des Intensiven Monitorings in Sachsen-Anhalt für die Ermittlung zeitlicher Trends der Nadelementgehalte 1999–2007*

| Fläche  | Baumart | Alter der Kiefer 2007 | Substratgruppe          | Waldregion         | Trophie      | Wasser-haus-halt |
|---------|---------|-----------------------|-------------------------|--------------------|--------------|------------------|
| Nedlitz | Kiefer  | 56                    | schwach verlehnte Sande | Tiefland (Fläming) | mittel       | mäßig frisch     |
| Klötze  | Kiefer  | 89                    | schwach verlehnte Sande | Tiefland (Altmark) | ziemlich arm | sehr frisch      |

Zusätzlich zu den Ergebnissen zur Nährstoffversorgung von Kiefer, Fichte, Buche und Eiche in Sachsen-Anhalt werden in den Abbildungen die gemeinsamen Mittelwerte für Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen (Drei-Länder-Mittelwert) des 8 x 8 km-Rasters der BZE II dargestellt. Der Drei-Länder-Mittelwert errechnete sich aus den Mittelwerten der Länder. Die Anzahl der analysierten Mischproben pro Baumart in den Ländern zeigt Tabelle 20.

*Tabelle 20: Übersicht der walderährungskundlich beprobten BZE II-Punkte in Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen für Kiefer, Eiche, Fichte und Buche (8 x 8 km-Raster)*

| Land                         | Kiefer | Eiche | Fichte | Buche |
|------------------------------|--------|-------|--------|-------|
| Sachsen-Anhalt               | 44     | 13    | 10     | 11    |
| Niedersachsen (inkl. Bremen) | 82     | 28    | 52     | 44    |
| Hessen                       | 47     | 44    | 67     | 80    |
| insgesamt                    | 173    | 85    | 129    | 135   |

## 8.3 Ergebnisse

### 8.3.1 Kiefer

#### 8.3.1.1 Ernährungsstatus 2007

Die Kiefer ist mit einem Flächenanteil von 47 % der Waldfläche die häufigste Baumart in Sachsen-Anhalt (MLU 2014). In der BZE II-Stichprobe ist die Kiefer vor allem in der Substratgruppe unverlehmte Sande ( $n = 33$ ) vertreten.

Die Nadelanalysen 2007 zeigen für die Kiefer Stickstoffgehalte im Luxusbereich, 82 % der Nadelgehalte überschreiten den Normalbereich (s. Abb. 118). Kiefern auf schwach verlehmtem und verlehmttem Sand weisen höhere Stickstoffgehalte auf als die Kiefern auf unverlehmtem Sand. Insgesamt liegen die Stickstoffgehalte der Kiefern in Sachsen-Anhalt höher als der Drei-Länder-Mittelwert.

Die Versorgung der Kiefer mit Phosphor, Kalium, Calcium, Schwefel, Eisen, Mangan und Zink ist bis auf wenige Ausnahmen insgesamt und auch für die unterschiedlichen Substratgruppen gut (Normalbereich). Lediglich in einem Kiefernbestand unterschreitet der Phosphorgehalt den Normalbereich; (latenter) Schwefelmangel zeigt sich an drei BZE-Punkten. An 9 BZE-Punkten liegen die Calciumgehalte der Kiefernadeln im Luxusbereich. Mangangehalte im Luxusbereich treten an 8 der 33 BZE II-Kiefernpunkte auf unverlehmtem Sand auf.

Ernährungsdefizite zeigen sich für die Magnesiumversorgung der Kiefern. Auf schwach verlehmttem Sand befindet sich der Median der Magnesiumgehalte im latenten Mangelbereich. Die Magnesiumgehalte auf unverlehmtem und verlehmttem Sand befinden sich überwiegend im Normalbereich.

Die N/P-, N/K- und N/Ca-Quotienten zeigen harmonische Elementverhältnisse an. Ungünstiger ist die Situation bei den N/Mg-Quotienten: An 13 Punkten (30 %) werden unharmonische Verhältnisse festgestellt (s. Abb. 119, Tab. 21).

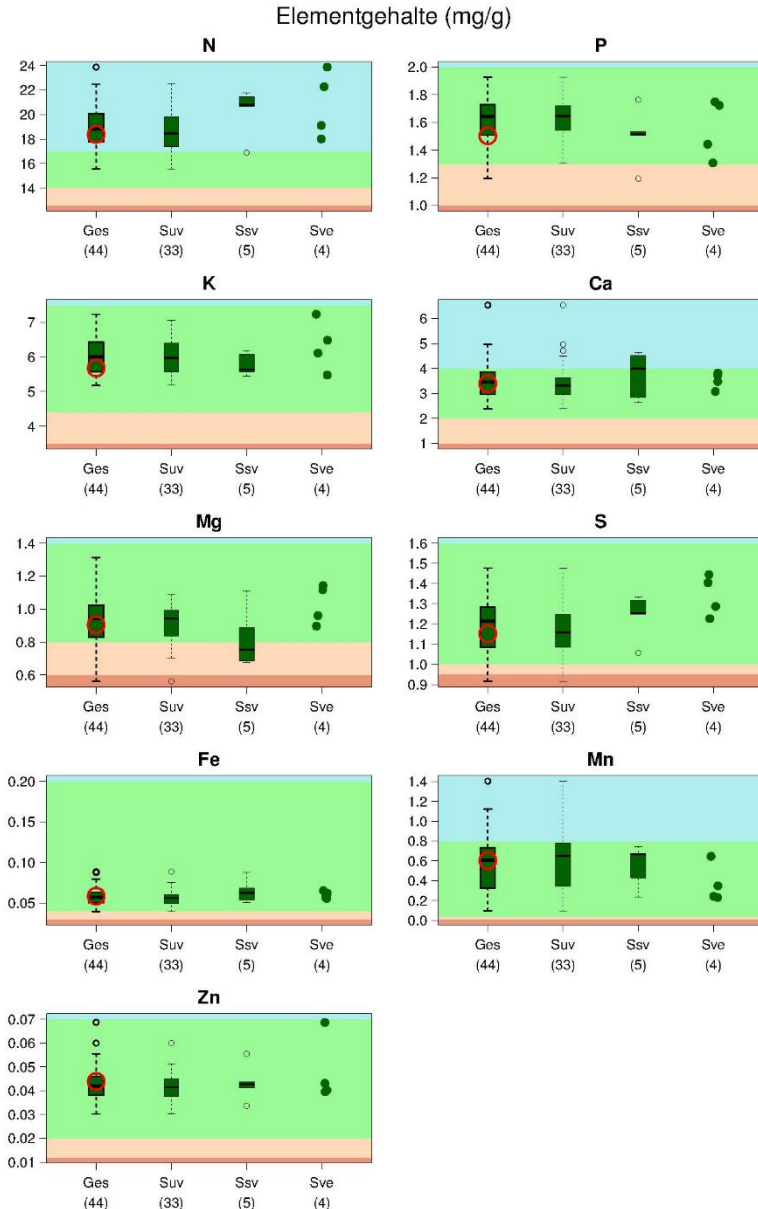


Abbildung 118: Elementgehalte [mg/g] in Kiefernnadeln (1. Nadeljabrgang) 2007. Verteilung für die Kiefer in Sachsen-Anhalt insgesamt ( $n = 44$ ) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn  $n \geq 3$ ; Darstellung der Einzelwerte als Punkte, wenn  $n = 4$ . Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 18, S. 248

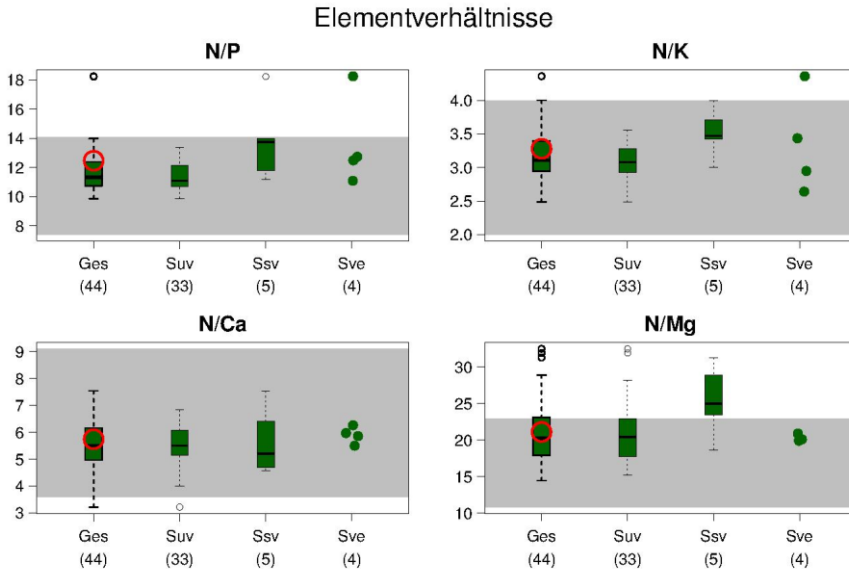


Abbildung 119: Elementverhältnisse in Kiefernadeln (1. Nadeljabrgang) 2007. Verteilung für die Kiefer in Sachsen-Anhalt insgesamt ( $n = 44$ ) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn  $n \geq 3$ ; Darstellung der Einzelwerte als Punkte, wenn  $n = 4$ . Bewertung nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012): hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse, weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 18, S. 248

Ohne (latenten) Mangel an Hauptnährelementen (Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium, Schwefel) und mit ausgewogenen Stickstoffquotienten werden 2007 26 BZE II-Kiefernpunkte (59 %) eingestuft (s. Abb. 120). Latenter Mangel an einem oder mehreren Hauptnährelementen und/oder unausgewogene Stickstoffquotienten werden an 16 (36 %) Kiefernpunkten vorgefunden. Vor allem latenter Magnesiummangel und unharmonische N/Mg-Quotienten führen zu dieser Einstufung. An 2 Kiefernpunkten unterschreiten der Magnesium- bzw. Schwefelgehalt in den Kiefernadeln die Symptomgrenze (= Mangel). Beide Punkte wurden auch 1992 bei der BZE I beprobt. Damals lag an beiden Punkten kein Magnesium- bzw. Schwefelmangel vor.

Tabelle 21: Zuordnung [Anteil in %] von 44 BZE II-Kiefernpunkten in Sachsen-Anhalt nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

| Element            | unter der Symptomgrenze = Mangel           | unter Normalbereich = latenter Mangel | im/über Normalbereich |
|--------------------|--|---------------------------------------|-----------------------|
| N                  | -  | -                                     | 100                   |
| P                  | -  | 2                                     | 98                    |
| K                  | -  | -                                     | 100                   |
| Ca                 | -  | -                                     | 100                   |
| Mg                 | 2  | 18                                    | 80                    |
| S                  | 2  | 4                                     | 94                    |
| Fe                 | -  | 2                                     | 98                    |
| Mn                 | -  | -                                     | 100                   |
| Zn                 | -  | -                                     | 100                   |
| Element-verhältnis | innerhalb harmonischer Elementverhältnisse |                                       |                       |
| N/P                | 95   |                                       |                       |
| N/K                | 98   |                                       |                       |
| N/Ca               | 98   |                                       |                       |
| N/Mg               | 70   |                                       |                       |

### 8.3.1.2 Flugascheeinfluss

Ein Einflussfaktor auf die Bodenchemie in Sachsen-Anhalt ist der historische Flugascheeinfluss (s. Kap. 7)

In Tabelle 22 sind die Elementgehalte und Elementverhältnisse für die Kiefer auf unverlehmtem Sand mit bzw. ohne Flugascheeinfluss dargestellt. Auf die Ernährungssituation der Kiefer 2007 hat sich der Flugascheeintrag weniger ausgewirkt als auf die Bodenchemie. Die Kiefern auf Standorten mit Flugascheeintrag haben im Vergleich zu Standorten ohne Flugascheeinfluss etwas höhere Nadelgehalte an Phosphor, Calcium und Magnesium.

Tabelle 22: *Mediane der Elementgehalte [mg/g] und der Elementverhältnisse in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang) an BZE II-Punkten auf unverlehmtem Sand insgesamt und getrennt nach Flugascheeinfluss. Bewertung der Elementgehalte nach GÖTTLEIN (2015) und der Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012).*

| Flugascheeinfluss | Anzahl BZE II-Punkte | Elementgehalt [mg/g] |      |     |     |      | Elementverhältnis [mg/mg] |     |      |      |
|-------------------|----------------------|----------------------|------|-----|-----|------|---------------------------|-----|------|------|
|                   |                      | N                    | P    | K   | Ca  | Mg   | N/P                       | N/K | N/Ca | N/Mg |
| ja                | 10                   | 18,7                 | 1,71 | 5,9 | 3,5 | 0,96 | 10,9                      | 3,1 | 5,3  | 20,1 |
| nein              | 23                   | 18,3                 | 1,62 | 6,0 | 3,2 | 0,90 | 11,5                      | 3,1 | 5,7  | 20,6 |
| insgesamt         | 33                   | 18,5                 | 1,65 | 6,0 | 3,3 | 0,94 | 11,1                      | 3,1 | 5,5  | 20,4 |

Blauer Hintergrund: Elementgehalt (Median) liegt im Luxusbereich.

Hellgrüner Hintergrund: Elementgehalt (Median) liegt im Normalbereich bzw. Elementverhältnis liegt im harmonischen Bereich.

### 8.3.1.3 Ernährungssituation in den Waldregionen

Die BZE-Kiefernpunkte liegen fast alle im Tiefland von Sachsen-Anhalt (s. Abb. 120), nur vier Kiefernpunkte sind dem Hügelland zuzuordnen. Deutliche regionale Unterschiede aufgrund der Ernährungssituation bestehen nicht. Kiefernpunkte mit guter und ausgewogener Hauptelementernährung wechseln kleinräumig mit (latentem) Mangel bzw. unausgewogenen Elementverhältnissen. Im Hügelland sind die Kiefern an den vier BZE-Punkten ausnahmslos gut versorgt.

Eine Überversorgung mit Stickstoff tritt an den Kiefernpunkten im östlichen Teil des Tieflandes und im Hügelland verstärkt auf (Luxusernährung). Im nördlichen Teil des Tieflandes kommen auch Stickstoffgehalte im Normalbereich vor (s. Abb. 21). Bei den Calciumgehalten ist die räumliche Verteilung ähnlich. Im östlichen Teil des Tieflandes und im Hügelland sind Calciumgehalte im Luxusbereich häufiger als im nördlichen Teil des Tieflandes.

Für die anderen Hauptnährelemente (Phosphor, Kalium, Magnesium und Schwefel) sind keine regionalen Unterschiede feststellbar.

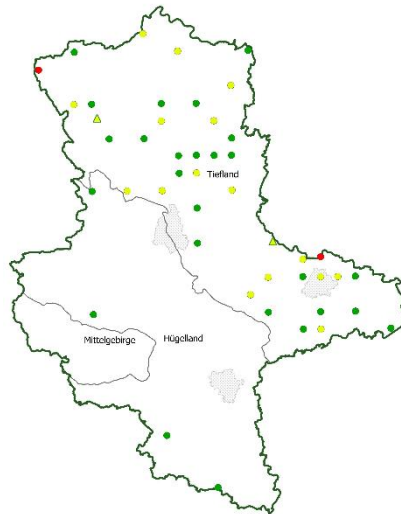


Abbildung 120: Ernährungssituation der Kiefer (1. Nadeljahrgang) in Sachsen-Anhalt; Punkte: BZE II-Raster (2007), Dreiecke: Kiefernflächen des Intensiven Monitorings (Median 1999–2007); grün: Hauptnährelemente mindestens im Normalbereich und Stickstoffquotienten ausgewogen, gelb: ein oder mehrere Hauptnährelemente im latenten Mangelbereich und/oder Stickstoffquotienten unausgewogen, rot: Mangelernährung

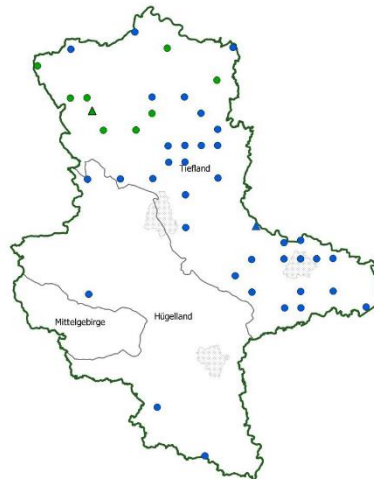


Abbildung 121: Stickstoffgehalte in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang) in Sachsen-Anhalt; Punkte: BZE II-Raster (2007), Dreiecke: Kiefernflächen des Intensiven Monitorings (Median 1999–2007); blau: Luxusbereich, grün: Normalbereich

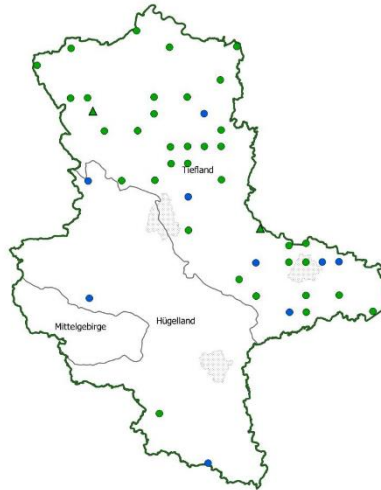


Abbildung 122: Calciumgehalte in Kiefernadeln (1. Nadeljabrgang) in Sachsen-Anhalt; Punkte: BZE II-Raster (2007), Dreiecke: Kiefernflächen des Intensiven Monitorings (Median 1999–2007); blau: Luxusbereich, grün: Normalbereich

#### 8.3.1.4 Zeitliche Veränderungen

Für die Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Ernährungssituation der Kiefer stehen zwei landesweite Erhebungen (BZE I und II) sowie die Ergebnisse von zwei Kiefernflächen des Intensiven Monitorings zur Verfügung.

Die Stickstoffgehalte in den Kiefernadeln sind zwischen den beiden BZE-Zeitpunkten 1992 und 2007 angestiegen. Während bei der BZE I 5 von 32 Kiefernpunkten (latenten) Stickstoffmangel aufwiesen und etwa die Hälfte luxuriös mit Stickstoff versorgt war, sind Stickstoffdefizite bei der BZE II nicht mehr aufgetreten (s. Abb. 123) und Stickstoffgehalte im Luxusbereich überwiegen (82 %).

Ein Vergleich der Phosphorgehalte zwischen der BZE I und BZE II kann nicht vorgenommen werden, da die Analysemethodik der BZE I vermutlich nicht mit der der BZE II vergleichbar ist.

Die Kaliumgehalte in den Kiefernadeln sind stabil, in beiden Erhebungen zeigen sich keine Kaliumdefizite.

Die Calciumgehalte sind angestiegen. Latenter Calciummangel kommt bei der BZE I vor, wird aber bei der BZE II nicht mehr festgestellt.



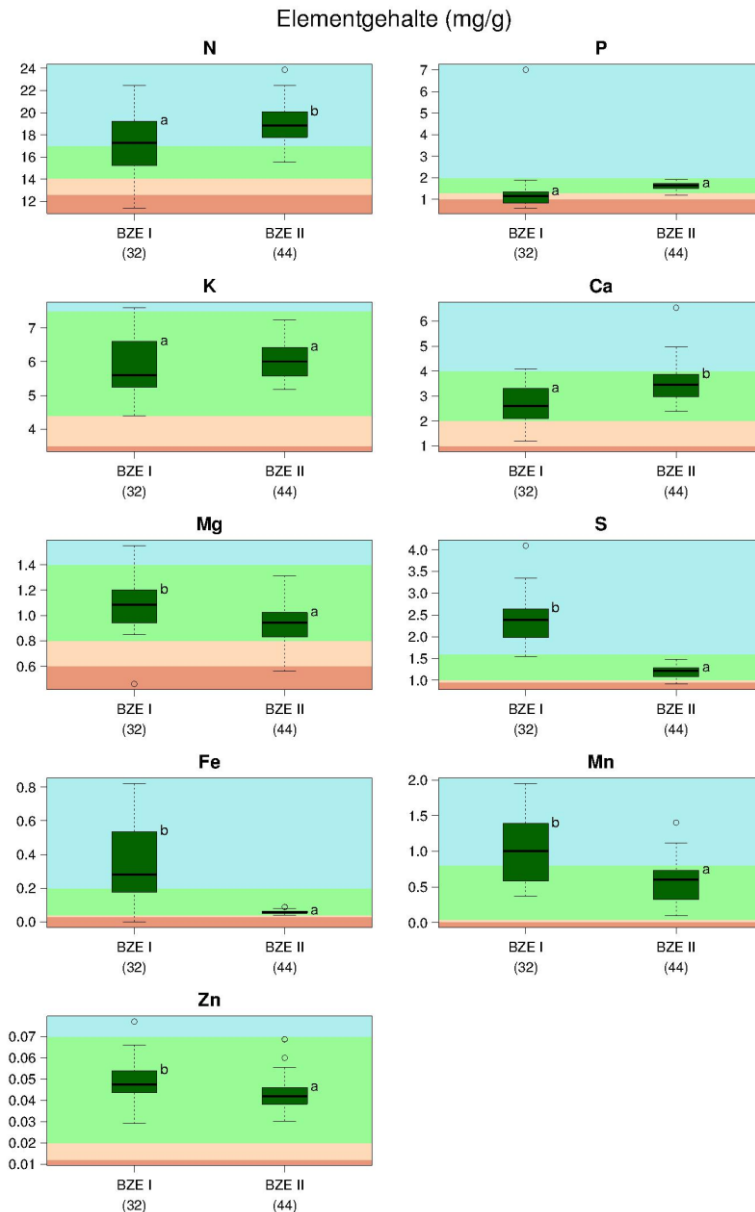


Abbildung 123: Vergleich der Elementgehalte für Kiefern der BZE I und II in Sachsen-Anhalt. Elementgehalte [mg/g] in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang). Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel, Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

Die Magnesiumgehalte haben abgenommen. Bei der BZE II liegen 20 % der Kiefernproben im (latenten) Magnesium-Mangelbereich.

Die Schwefel-, Eisen- und Mangan-gehalte haben deutlich abgenommen. Bei der BZE I lag der Median der Gehalte für diese drei Elemente im Luxusbereich, bei der BZE II dagegen im Normalbereich. Auch die Zinkgehalte haben abgenommen, befinden sich aber zu beiden Zeitpunkten im Normalbereich.

Entsprechend der Entwicklung bei den Elementgehalten sind 2007 die N/Ca-Verhältnisse niedriger und die N/Mg-Verhältnisse höher als 1992. Bei den N/K-Verhältnissen gibt es keine Veränderung.

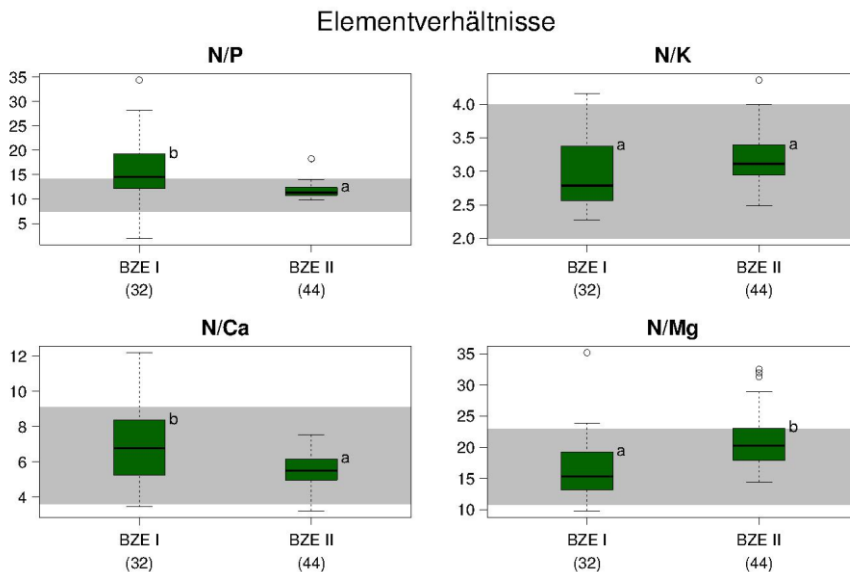


Abbildung 124: Vergleich der Elementverhältnisse für Kiefern der BZE I und II in Sachsen-Anhalt. Elementverhältnisse in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang). Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Bewertung nach GÖTTLEIN (2012): hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse, weiß: Elementverhältnisse unausgevoen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

Aus den beiden Flächen des Intensiven Monitorings, die in der Altmark (Klötze) bzw. im Fläming (Nedlitz) liegen, ergeben sich für den Zeitraum 1999–2007 keine zeitlichen Trends. Die Nährelementversorgung der Kiefer auf diesen beiden Flächen ist unterschiedlich (s. Tab. 23). Auf der Fläche Klötze weisen die Kiefernadeln im Vergleich zur Fläche Nedlitz insbesondere geringere Stickstoff-, Phosphor- und Magnesiumgehalte auf. Insgesamt sind die Übereinstimmungen der Kieferernährung im BZE II-Raster 2007 und der Fläche in Nedlitz größer als mit der in Klötze.

Der Vergleich der Ernährungssituation auf den Kiefernflächen des Intensiven Monitorings und den BZE-Kiefernpunkten erfolgte hier im Anhalt an den BZE II-

Zeitraum für die Jahre 1999–2007 Im Kapitel 3.4.3 sind die Ergebnisse von Nadelanalysen auf den Intensivmonitoringflächen bis 2019 dargestellt. In dieser längeren Zeitreihe werden zeitliche Trends sichtbar. Die walddernährungskundlichen Untersuchungen im Rahmen der BZE III 2022–2024 werden zeigen, ob die im Intensiven Monitoring ermittelten Trends sich bestätigen.

Tabelle 23: *Elementgehalte und Elementverhältnisse (Median) in Kiefernadeln 1992 (BZE I) und 2007 (BZE II) und Elementgehalte und Elementverhältnisse in Kiefernadeln auf zwei Kiefernflächen des Intensiven Monitorings (Median 1999–2007)*

| Elementgehalt [mg/g]      |        |        |                       |         |
|---------------------------|--------|--------|-----------------------|---------|
|                           | BZE I  | BZE II | Intensives Monitoring |         |
|                           | n = 32 | n = 44 | Klötze                | Nedlitz |
| N                         | 17,3   | 18,8   | 16,6                  | 17,9    |
| P                         | 5,6    | 1,64   | 1,10                  | 1,48    |
| K                         | 2,6    | 6,0    | 5,1                   | 5,3     |
| Ca                        | 1,09   | 3,5    | 2,6                   | 3,2     |
| Mg                        | 2,4    | 0,94   | 0,65                  | 0,78    |
| S                         | 0,28   | 1,2    | 1,0                   | 1,1     |
| Fe                        | 1,01   | 0,057  | 0,069                 | 0,071   |
| Mn                        | 0,048  | 0,604  | 0,690                 | 0,570   |
| Zn                        |        | 0,042  | 0,041                 | 0,048   |
| Elementverhältnis [mg/mg] |        |        |                       |         |
| N/P                       | -      | 11,3   | 15,2                  | 12,2    |
| N/K                       | 2,8    | 3,1    | 3,3                   | 3,4     |
| N/Ca                      | 6,8    | 5,5    | 6,4                   | 5,6     |
| N/Mg                      | 15,3   | 20,3   | 25,2                  | 22,3    |

Blauer Hintergrund: Elementgehalt im Luxusbereich

Hellgrüner Hintergrund: Elementgehalt im Normalbereich bzw. Elementverhältnis im harmonischen Bereich.

Orangener Hintergrund: Elementgehalt im latenten Mangel bzw. Elementverhältnis außerhalb der harmonischen Elementverhältnisse

### 8.3.2 Eiche

#### 8.3.2.1 Ernährungsstatus 2007

Die Eiche nimmt in Sachsen-Anhalt einen Anteil von 13 % an der Waldfläche ein (MLU 2014). In der BZE II-Stichprobe ist sie am häufigsten auf den Sanden ( $n = 8$ ) vertreten (s. Tab. 18, S. 248).

Die Stickstoffgehalte in den Eichenblättern befinden sich überwiegend (11 von 13) oberhalb des Normalbereichs, d. h. die Eiche ist mit Stickstoff luxuriös versorgt (s. Abb. 125). Auch mit Mangan ist die Eiche überreichlich versorgt; 7 von 13 Punkten weisen Luxusernährung auf.

Die Gehalte an Kalium, Calcium, Schwefel, Eisen und Zink liegen im Normalbereich.

Defizite bestehen für die Eiche in der Versorgung mit Phosphor und Magnesium. Die Phosphorgehalte liegen an 6 der 13 Eichenpunkte im latenten Mangelbereich, bei den Magnesiumgehalten sind es 5 Eichenpunkte.

Nur an vier BZE-Eichenpunkten sind 2007 ausgewogene Stickstoffquotienten festzustellen. Am häufigsten sind die unharmonische N/P und N/Mg-Quotienten. Der Median der N/P-Quotienten überschreitet den Grenzwert harmonischer Elementverhältnisse (s. Abb. 126, Tab. 24).

Auffällig ist ein Punkt im Harz, wo die Eichen die niedrigsten Calcium-, Phosphor-, Kalium- und Magnesiumgehalte im Eichenkollektiv aufweisen. Auch die Stickstoff-Quotienten sind hier unharmonisch.

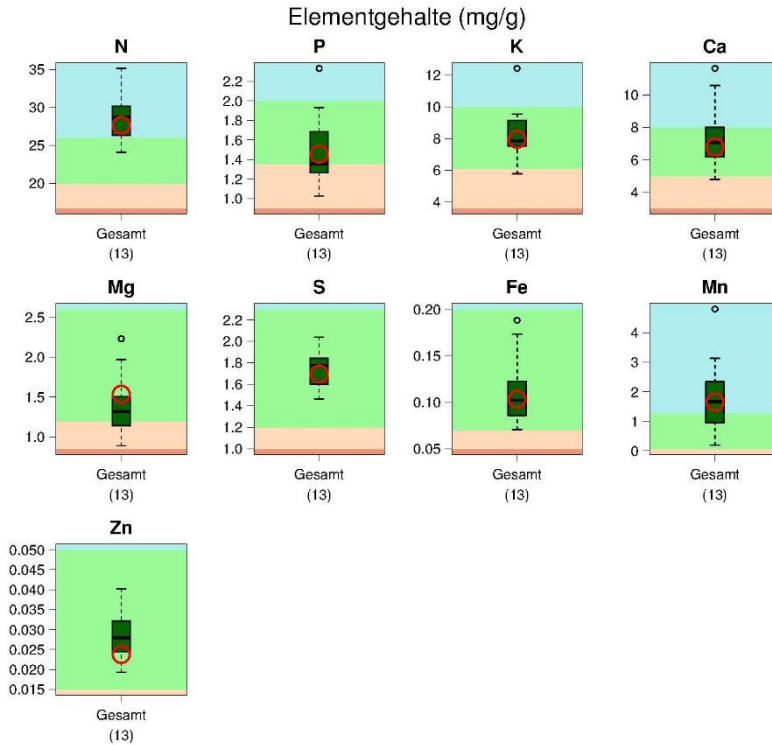


Abbildung 125: Elementgehalte [mg/g] in Eichenblättern 2007 ( $n = 13$ ) in Sachsen-Anhalt sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

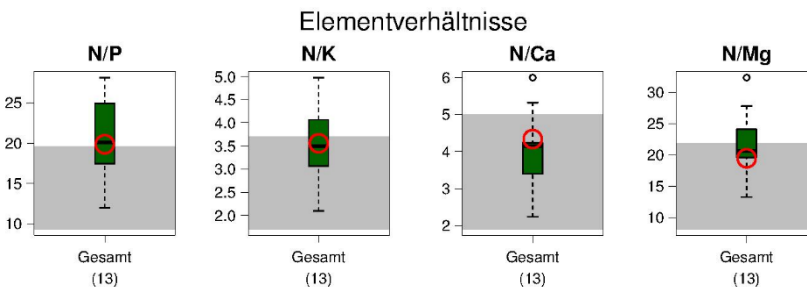


Abbildung 126: Elementverhältnisse in Eichenblättern 2007 ( $n = 13$ ) in Sachsen-Anhalt sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

Tabelle 24: Zuordnung [Anzahl] von 13 BZE II-Eichenpunkten 2007 in Sachsen-Anhalt nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anzahl mit harmonischem Elementverhältnis nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

| Element            | unter der Symptomgrenze = Mangel           | unter Normalbereich = latenter Mangel | im/über Normalbereich |
|--------------------|--|---------------------------------------|-----------------------|
| N                  | -  | -                                     | 13                    |
| P                  | -  | 6                                     | 7                     |
| K                  | -  | 1                                     | 12                    |
| Ca                 | -  | 1                                     | 12                    |
| Mg                 | 1  | 4                                     | 8                     |
| S                  | -  | -                                     | 13                    |
| Fe                 | -  | -                                     | 13                    |
| Mn                 | -  | -                                     | 13                    |
| Zn                 | -  | -                                     | 13                    |
| Element-verhältnis | innerhalb harmonischer Elementverhältnisse |                                       |                       |
| N/P                | 6  |                                       |                       |
| N/K                | 9  |                                       |                       |
| N/Ca               | 11   |                                       |                       |
| N/Mg               | 8  |                                       |                       |

An nur drei Eichenpunkten der BZE II zeigen sich weder (latente) Mangelwerte für die Hauptnährelemente noch unausgewogene Stickstoffquotienten (s. Abb. 127). Vor allem Phosphor- und Magnesiumdefizite bewirkten latenten Mangel und/oder unausgewogene Elementverhältnisse. An einem Punkt tritt Magnesiummangel auf.

### 8.3.2.2 Ernährungssituation in den Waldregionen

Die 13 BZE II-Eichenpunkte sind gleichmäßig über Sachsen-Anhalt verteilt (s. Abb. 127). Räumliche Muster zur Ernährungssituation lassen sich nicht ableiten.

Die drei BZE II-Eichenpunkte ohne latenten Mangel an Hauptnährelementen und mit ausgewogenen Stickstoffquotienten liegen im Tief- und im Hügelland. Mangelernährung kommt an einem Eichenpunkt im Harz vor.

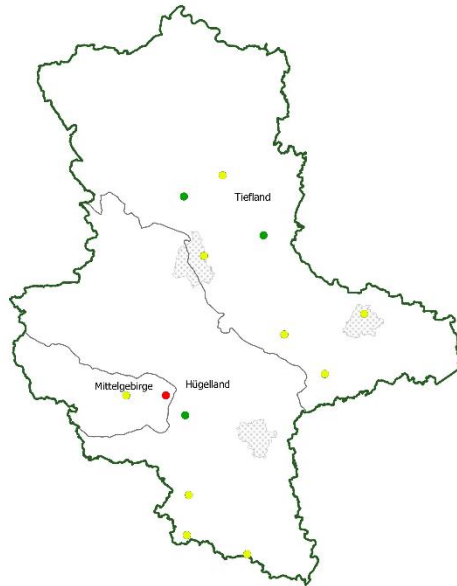


Abbildung 127: Ernährungssituation der Eiche in Sachsen-Anhalt; Punkte: BZE II-Raster (2007); grün: Hauptnährelemente mindestens im Normalbereich und Stickstoffquotienten ausgewogen, gelb: ein oder mehrere Hauptnährelemente im latenten Mangelbereich und/oder Stickstoffquotienten unausgewogen, rot: Mangelernährung

### 8.3.3 Fichte

#### 8.3.3.1 Ernährungsstatus 2007

Die Fichte nimmt in Sachsen-Anhalt einen Anteil von 11 % an der Waldfläche ein (MLU 2014). In der BZE II-Stichprobe ist sie in 6 Substratgruppen vertreten.

Für die Mehrzahl der Fichtenbestände besteht eine luxuriöse Versorgung mit Stickstoff und Calcium (s. Abb. 128). Die hohen Calciumgehalte stehen allerdings nicht im Zusammenhang mit Kalkungsmaßnahmen. Die drei gekalkten Fichtenpunkte heben sich nicht durch höhere Calciumgehalte von den ungekalkten Fichtenpunkten ab.

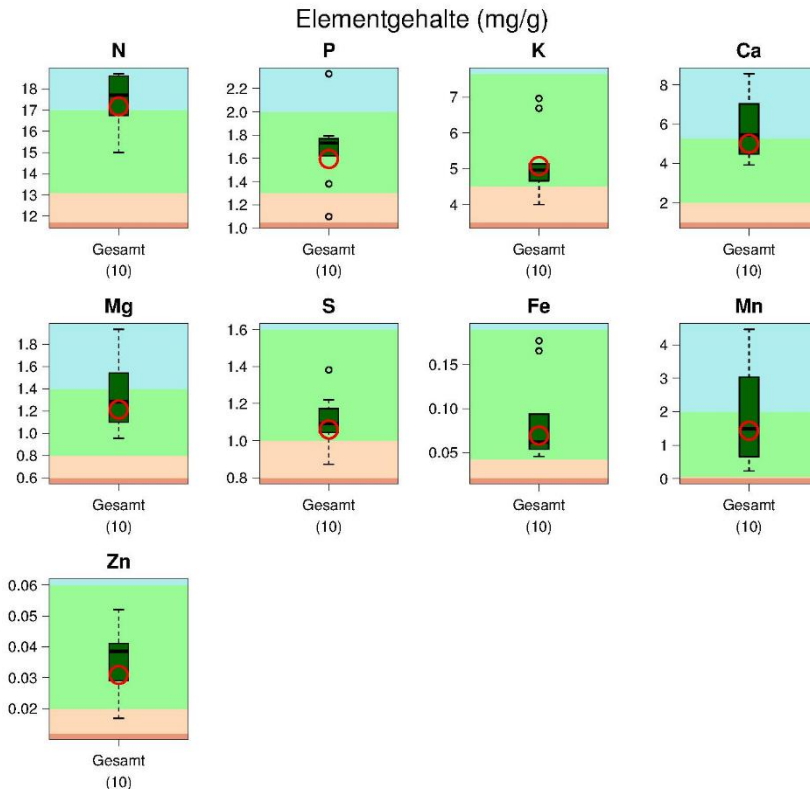
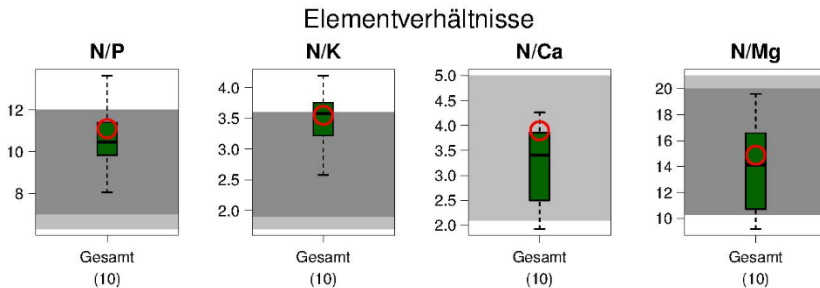


Abbildung 128: Elementgehalte [mg/g] in Fichtennadeln (1. Nadeljabrgang) 2007. Verteilung für die Fichte in Sachsen-Anhalt insgesamt (n = 10) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang



Die Magnesium-, Eisen- und Mangangehalte lassen keine Defizite erkennen. An einem Fichtenpunkt zeigt sich latenter Phosphor- und Schwefelmangel. Die Fichtennadeln an einem anderen Punkt weisen latenten Kalium- und Zinkmangel auf.

Während die N/P-, N/Ca- und N/Mg-Quotienten ausgewogene Elementverhältnisse anzeigen, befinden sich die N/K-Quotienten überwiegend im unharmonischen Bereich (s. Abb. 129).



*Abbildung 129: Elementverhältnisse in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang) 2007. Verteilung für die Fichte in Sachsen-Anhalt insgesamt ( $n = 10$ ) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen*

Die unharmonischen N/K-Quotienten (7 von 10 Fichtenpunkten) sind auch ausschlaggebend dafür, dass lediglich zwei Fichtenpunkte ohne Defizite an Hauptnährelementen sind und ausgewogene Elementverhältnisse aufweisen (s. Tab. 25, Abb. 130). Latenter Mangel an einem oder mehreren Hauptnährelementen und/oder unausgewogene Stickstoffquotienten werden dagegen an 8 Fichtenpunkten festgestellt. Mangelernährung ist 2007 im BZE II-Fichtenkollektiv nicht vorgekommen.

Tabelle 25: Zuordnung [Anzahl] von 10 BZE II-Fichtenpunkten (1. Nadeljahrgang) 2007 in Sachsen-Anhalt nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anzahl mit harmonischem Elementverhältnis nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

| Element           | unter der Symptomgrenze = Mangel           | unter Normalbereich = latenter Mangel | im/über Normalbereich |
|-------------------|--|---------------------------------------|-----------------------|
| N                 | -  | -                                     | 10                    |
| P                 | -  | 1                                     | 9                     |
| K                 | -  | 1                                     | 9                     |
| Ca                | -  | -                                     | 10                    |
| Mg                | -  | -                                     | 10                    |
| S                 | -  | 1                                     | 9                     |
| Fe                | -  | -                                     | 10                    |
| Mn                | -  | -                                     | 10                    |
| Zn                | -  | 1                                     | 9                     |
| Elementverhältnis | innerhalb harmonischer Elementverhältnisse |                                       |                       |
| N/P               | 8  |                                       |                       |
| N/K               | 3  |                                       |                       |
| N/Ca              | 9  |                                       |                       |
| N/Mg              | 9  |                                       |                       |

### 8.3.3.2 Ernährungssituation in den Waldregionen

BZE II-Punkte mit Fichte kommen vor allem im Harz vor (s. Abb. 130). Ein Fichtenpunkt liegt im Hügelland. Durch die Konzentration der Fichtenpunkte im Harz sind räumliche Muster der Ernährungssituation erwartungsgemäß nicht aufgetreten.

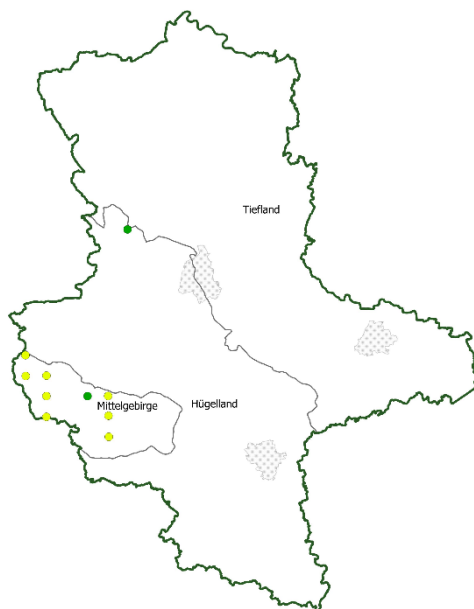


Abbildung 130: Ernährungssituation der Fichte in Sachsen-Anhalt; Punkte: BZE II-Raster (2007); grün: Hauptnährelemente befinden sich mindestens im Normalbereich und die Stickstoffquotienten sind ausgewogen, gelb: ein oder mehrere Hauptnährelemente befinden sich im latenten Mangelbereich und/oder Stickstoffquotienten sind unausgewogen

### 8.3.3.3 Vergleich 1. und 3. Nadeljahrgang 2007

Magnesium gehört zu den Elementen, die in der Pflanze leicht verlagert werden. Nach REEMTSMA (1986) findet bei einem Engpass in der Magnesiumversorgung eine Verlagerung von Magnesium aus den älteren in den jüngsten Nadeljahrgang statt. Dies äußert sich in geringeren Gehalten in älteren Nadeln (s. Tab. 26).

Eine Einstufung der Magnesiumversorgung an den BZE-Punkten mit Fichte nach REEMTSMA (1986) ergibt folgendes Bild: 8 der 10 BZE-Fichtenpunkte fallen in die Kategorie „gute bis reichliche Versorgung“ bzw. „mangelfreie Ernährung“. Zwei Punkte entfallen auf die Kategorie „zunehmender Mangel“. Ein Unterschreiten der Vergilbungsschwelle wurde nicht beobachtet. Die Bewertung nach REEMTSMA (1986) zeigt damit ebenfalls eine überwiegend gute Versorgungssituation der Fichte mit Magnesium an.

Tabelle 26: Beurteilung der Magnesiumgehalte von Fichte in verschiedenen Jahrgängen des 7. Quirls (nach REEMTSMA 1986)

| Magnesiumgehalte   | Bewertung                              |
|--|--|
| Im 1. Nadeljahrgang wird ein Basiswert von 1,0 mg/g erreicht oder überschritten und die Magnesiumversorgung ist in allen Jahrgängen weitgehend stabil.   | „gute bis reichliche Versorgung“       |
| Im 1. Nadeljahrgang werden 1,0 mg/g erreicht, in den älteren Nadeln fällt die Konzentration auf bis zu 0,7 mg/g ab.  | „mangelfreie Ernährung“                |
| Der Abfall der Gehalte in den Nadeljahrgängen ist steiler, wobei der 1. Nadeljahrgang noch über 1,0 mg/g und der 3. Nadeljahrgang zwischen 0,7 und 0,3 mg/g liegt.<br>Oder:<br>Im 1. Nadeljahrgang wird der Basiswert von 1,0 mg/g unterschritten, im 3. Nadeljahrgang liegen die Magnesiumgehalte über der Vergilbungsschwelle ( $> 0,3$ mg/g). | „zunehmender Mangel“                   |
| Die Magnesiumgehalte im 3. Nadeljahrgang sind $\leq 0,3$ mg/g.   | Unterschreiten der Vergilbungsschwelle |

#### 8.3.3.4 Zeitliche Veränderungen

Landesweite Inventuren zu den Elementgehalten und –verhältnissen in Fichtennadeln wurden 1992 (BZE I) und 2007 (BZE II) durchgeführt.

Wie bei der Kiefer haben die Stickstoffgehalte der Fichte zwischen der BZE I und der BZE II deutlich zugenommen (s. Abb. 131). 1992 reichte die Spanne der Stickstoffgehalte vom Mangel- bis in den Luxusbereich, 2007 überwiegt die luxuriöse Stickstoffernährung.

Ein Vergleich der Phosphorgehalte zwischen der BZE I und BZE II kann nicht vorgenommen werden, da die Analysemethodik der BZE I vermutlich nicht mit der der BZE II vergleichbar ist.

Die Kalium- und Calciumgehalte der Fichten haben abgenommen. Die Kaliumgehalte sind so stark zurückgegangen, dass 2007 auch latenter Kaliummangel auftritt. Die Calciumgehalte dagegen befinden sich sowohl 1992 als auch 2007 überwiegend im Luxusbereich.

Der Median der Magnesiumgehalte unterscheidet sich zwischen den beiden Erhebungen nicht, die Spanne der Magnesiumgehalte hat sich 2007 gegenüber 1992 verengt.

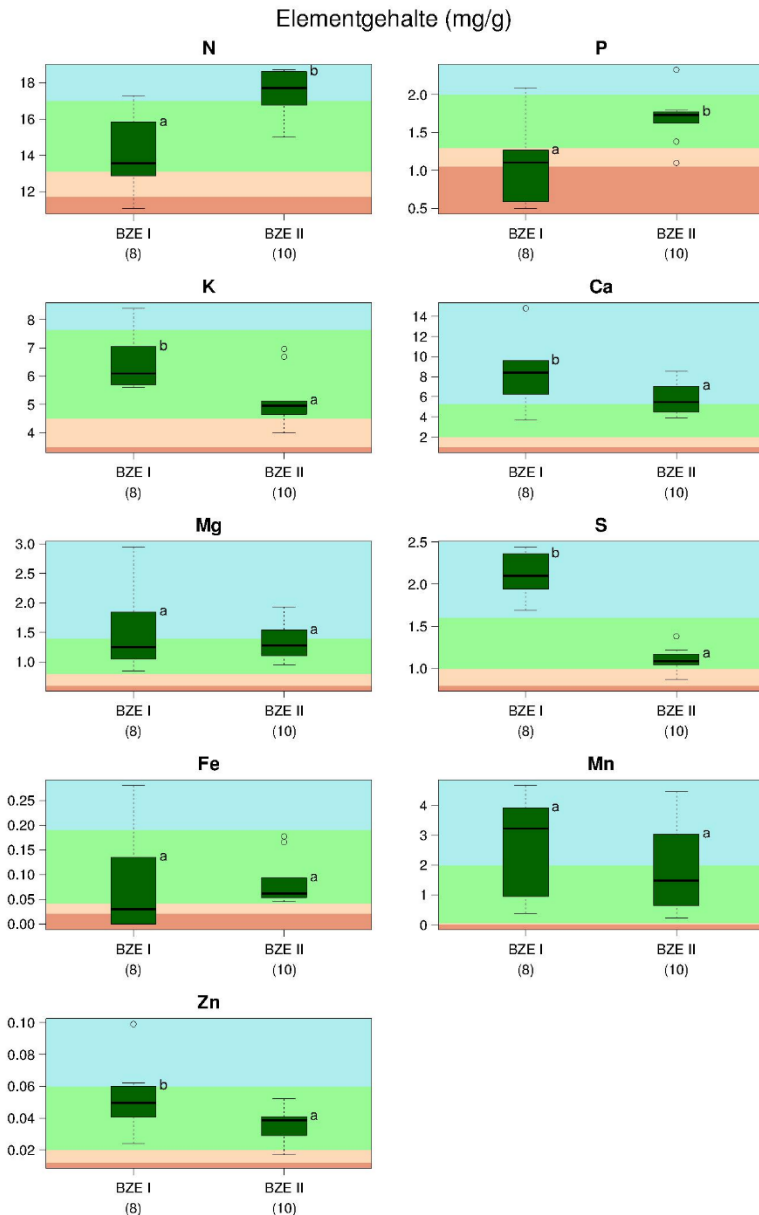


Abbildung 131: Vergleich der Elementgehalte für Fichten der BZE I und II in Sachsen-Anhalt. Elementgehalte [mg/g] in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang). Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

Die Schwefelgehalte haben sehr deutlich, die Zinkgehalte haben moderat abgenommen. 1992 waren die Schwefelgehalte an allen Fichtenpunkten luxuriös, 2007 liegen sie im Normalbereich. Die Zinkgehalte befinden sich zu beiden Inventurzeitpunkten im Normalbereich. Der bei der BZE I festgestellte extrem hohe Zinkgehalt auf einer Fichtenfläche am nördlichen Harzrand hat sich 2007 normalisiert.

Die Eisengehalte wiesen 1992 eine weite Spanne auf. Die 1992 festgestellten Extremwerte (Mangel- bzw. Luxusernährung) zeigen sich 2007 nicht mehr.

Mit der Zunahme der Stickstoffgehalte und der Abnahme der Kaliumgehalte ist 2007 der Anteil unausgewogener N/K-Quotienten höher als 1992 (s. Abb. 132). Die Kombination aus deutlich niedrigeren Stickstoffgehalten und z. T. sehr hohen Calcium- und Magnesiumgehalten führte 1992 zu unharmonischen N/Ca- und N/Mg-Quotienten. 2007 zeigen diese beiden Quotienten ausgewogene Verhältnisse.

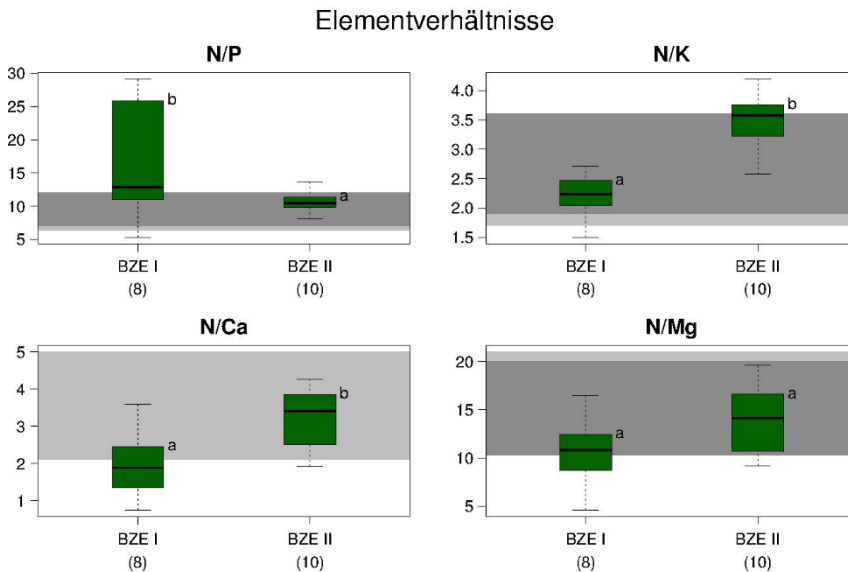


Abbildung 132: Vergleich der Elementverhältnisse für Fichten der BZE I und II in Sachsen-Anhalt. Elementverhältnisse in Fichtennadeln (1. Nadeljabrgang). Signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungen sind durch unterschiedliche Buchstaben neben den Boxen gekennzeichnet. Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

### 8.3.4 Buche

#### 8.3.4.1 Ernährungsstatus 2007

Die Buche nimmt in Sachsen-Anhalt einen Anteil von 7 % an der Waldfläche ein (MLU 2014). In der BZE-Stichprobe kommen die 11 Buchenpunkte auf 7 Substratgruppen vor.

Die Stickstoffgehalte der Buche liegen überwiegend (7 von 11 Buchenpunkten) im Normalbereich (s. Abb. 133). Eine Überversorgung mit Stickstoff ist bei Buche weniger stark ausgeprägt als bei Kiefer, Eiche und Fichte.

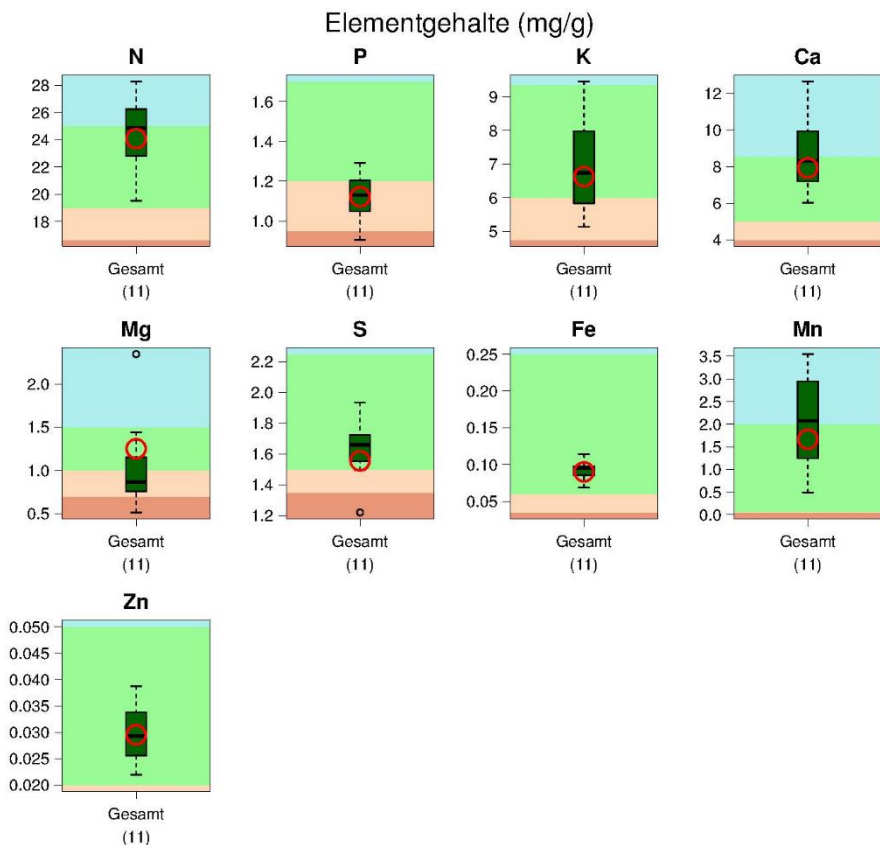


Abbildung 133: Elementgehalte [mg/g] in Buchenblättern 2007. Verteilung für die Buche in Sachsen-Anhalt insgesamt ( $n = 11$ ) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau: Luxusbereich, hellgrün: Normalbereich, hellrot: latenter Mangel, rot: Mangel; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang

Wie bei den anderen Baumarten ist auch bei der Buche die Calciumversorgung gut und auch die Gehalte an Schwefel, Eisen und Zink liegen im Normalbereich. Die Mangangehalte der Buchen befinden sich im Luxusbereich.

Phosphor- und Magnesiumdefizite sind häufig, der Median beider Elemente liegt im latenten Mangelbereich. Auch Kaliumdefizite treten auf, der Median der Kaliumgehalte liegt aber im Normalbereich.

Unharmonische Stickstoffquotienten sind bei der Buche weit verbreitet (s. Abb. 134), an allen untersuchten Buchenpunkten zeigen die N/P-Quotienten unharmonische Elementverhältnisse an, bei dem N/Mg-Quotienten entfallen nur 3 BZE-Buchenpunkte in den harmonischen Bereich (s. Tab. 27).

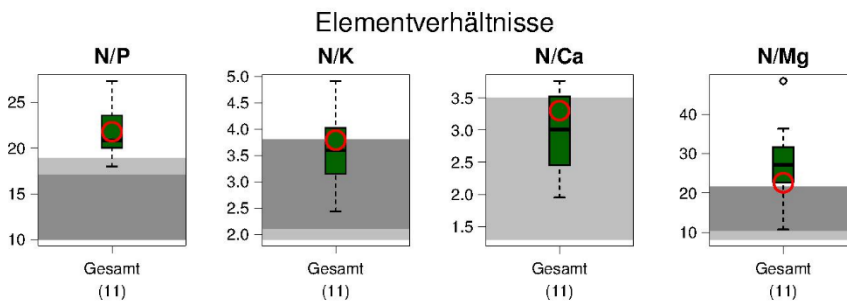


Abbildung 134: Elementverhältnisse in Buchenblättern 2007. Verteilung für die Buche in Sachsen-Anhalt insgesamt ( $n = 11$ ) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgenogen; Zahlen in Klammern: Stichprobenumfang



Tabelle 27: Zuordnung [Anzahl] von 11 BZE II-Buchenpunkten nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anzahl mit harmonischem Elementverhältnis nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

| Element            | unter der Symptomgrenze = Mangel           | unter Normalbereich = latenter Mangel | im/über Normalbereich |
|--------------------|--|---------------------------------------|-----------------------|
| N                  | -  | -                                     | 11                    |
| P                  | 1  | 7                                     | 3                     |
| K                  | -  | 4                                     | 7                     |
| Ca                 | -  | -                                     | 11                    |
| Mg                 | 2  | 6                                     | 3                     |
| S                  | 1  | 1                                     | 9                     |
| Fe                 | -  | -                                     | 11                    |
| Mn                 | -  | -                                     | 11                    |
| Zn                 | -  | -                                     | 11                    |
| Element-verhältnis | innerhalb harmonischer Elementverhältnisse |                                       |                       |
| N/P                | 0  |                                       |                       |
| N/K                | 7  |                                       |                       |
| N/Ca               | 7  |                                       |                       |
| N/Mg               | 3  |                                       |                       |

BZE II-Buchenpunkte ohne (latenten) Mangel an Hauptnährelementen und mit ausgewogenen Stickstoffquotienten gibt es 2007 nicht. 7 von 11 Punkten weisen latenten Mangel an einem oder mehreren Hauptnährelementen und/oder unausgewogene Stickstoffquotienten auf. An 4 Punkten tritt Mangelernährung auf.

### 8.3.4.2 Ernährungssituation in den Waldregionen

Die Buchen der BZE II-Stichprobe befinden sich vorwiegend im Mittelgebirge. Regionale Unterschiede in der Ernährungssituation zeigen sich nicht (s. Abb. 135).

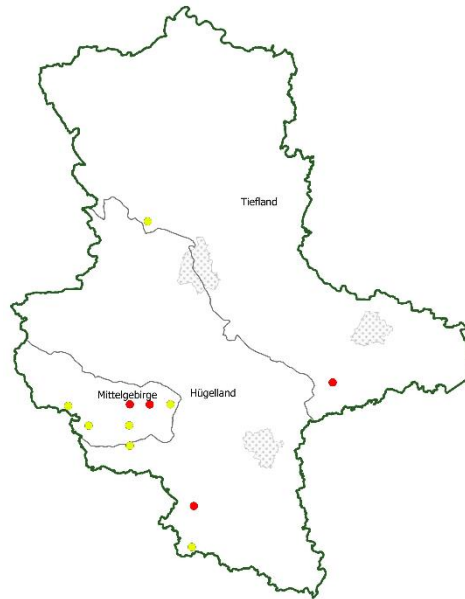


Abbildung 135: Ernährungssituation der Buche in Sachsen-Anhalt; Punkte: BZE II-Raster (2007); gelb: ein oder mehrere Hauptnährelemente befinden sich im latenten Mangelbereich und/oder Stickstoffquotienten sind unausgewogen, rot: Mangel

## 8.4 Einflussfaktoren auf die Ernährungssituation

Während Bodenanalysen das Nährstoffpotential eines Standorts aufzeigen, bilden Nadel- und Blattgehalte von Waldbäumen das verfügbare Nährstoffangebot über den gesamten wurzelerreichbaren Bodenraum ab und sind daher für die Beurteilung des Ernährungszustandes unter dem Einfluss von Standortseigenschaften, Umwelteinflüssen und forstlichen Maßnahmen besonders geeignet. Da die Nährstoffgehalte in Nadeln und Blättern Schwankungen unterliegen, sind bei der Beprobung Faktoren, die die Nährstoffgehalte beeinflussen, zu berücksichtigen. Einen Überblick über die Einflussfaktoren auf die Ernährungssituation der Waldbäume und die methodischen Voraussetzungen von Nadel- und Blattanalysen als Diagnoseinstrument geben u. a. HEINZE u. FIEDLER (1992), HÜTTL (1992), EVERS (1986), KNABE (1984), REEMTSMA (1964) und WEHRMANN (1959).

Für beide Inventuren zur Waldernährung in Sachsen-Anhalt wurden standardisierte Probenahmen durchgeführt (BML 1990, WELLBROCK et al. 2006), um einige Einflussfaktoren einzugrenzen. So lassen sich z. B. Einflüsse durch individuelle genetische Unterschiede, die soziologische Stellung, die Exposition am Baum, die Kronenposition, das Nadelalter oder jahreszeitliche Rhythmen mit einer vereinheitlichten systematischen Erhebung stark reduzieren.

### Baumarten

Die spezifischen Ernährungsansprüche der Baumarten wurden mit der Verwendung baumartenspezifischer Ernährungskennwerte berücksichtigt.

### Alter

Die Stichprobenbäume des BZE II-Kollektivs umfassen eine weite Altersspanne, die Probebäume waren 2007 in Sachsen-Anhalt zwischen 18 und 206 Jahre alt; in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt insgesamt 10 bis 223 Jahre. Der Einfluss des Baumalters auf die Hauptnährelementgehalte in den Nadeln und Blättern wurde in einer gemeinsamen Auswertung der BZE II-Waldernährungsdaten (2007) in Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen mittels einer Kovarianzanalyse geprüft. Für Stickstoff (Fichte, Buche, Eiche), Phosphor (Kiefer, Buche, Eiche), Kalium (Fichte, Eiche), Magnesium (Kiefer, Buche) und Schwefel (Fichte, Buche, Eiche) zeigen sich Abnahmen der Gehalte mit zunehmendem Baumalter. Eine Zunahme mit dem Baumalter tritt lediglich bei den Calciumgehalten in den Kiefernadeln auf. Die Änderungen der Hauptnährelementgehalte mit dem Baumalter betragen jedoch pro Jahr maximal 0,2 % des jeweiligen Medians. Für alle Hauptnährelemente gibt es also signifikante Zusammenhänge zwischen den Nadel- und Blattgehalten und dem Baumalter. Die Veränderungen sind jedoch so gering, dass sie bei der Bewertung der Ernährungssituation unberücksichtigt bleiben können.

### Nadel- und Blattgewichte

Auch die Beziehungen zwischen den Hauptnährelementgehalten und den Nadel- und Blattgewichten wurde für die BZE-Waldernährungsdaten (2007) in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt mittels einer Kovarianzanalyse untersucht. Für Kiefer und Buche zeigt sich kein durch das Nadel- bzw. Blattgewicht beeinflusster Trend. Bei den Eichen nehmen die Stickstoffgehalte in den Blättern mit steigendem Blattgewicht ab. In den Fichtennadeln nehmen die Calciumgehalte mit steigendem Blattgewicht ab und die Phosphorgehalte zu. Insgesamt ist die Beeinflussung der Hauptnährelementgehalte durch die Nadel- und Blattgewichte auf wenige Fälle beschränkt und wurde bei der Bewertung der Ernährungssituation ebenfalls nicht berücksichtigt.

## Witterung

Bei Einzelerhebungen bzw. diskontinuierlich erhobenen Waldernährungsdaten, wie sie bei der BZE vorliegen, können die durch die zeitliche Fluktuation bedingten Einflüsse auf den Ernährungsstatus nicht eingegrenzt werden (Asche 1997, Evers 1972). Zu jährlichen Fluktuationen im Ernährungszustand führt z. B. die Witterung eines Jahres mit unterschiedlichen Temperatur- und Wasserhaushaltsbedingungen, die Intensität der Fruchtbildung sowie Insekten- und Pilzbefall. Zur Ergänzung der Blatt- und Nadelproben im Rahmen der BZE II in Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen wurden im gleichen Zeitraum die Flächen des Intensiven Monitorings und Versuchsflächen zur Kalkung in diesen Ländern beprobt und einheitlich im Labor der NW-FVA analysiert, sodass auch die Vergleichbarkeit zwischen den Ländern und den unterschiedlichen Ebenen des Monitorings gegeben war.

Jahrweise Schwankungen der Blatt- und Nadelinhaltsstoffe können durch unterschiedliche *Witterungsbedingungen* verursacht werden, wenn z. B. witterungsabhängige Prozesse wie die Streuzersetzung, die Mineralisierungsraten oder das Baumwachstum variieren (EVERS 1972, ASCHE 1997). Dabei wirken sich sowohl die Witterungsverhältnisse im Probennahmejahr als auch die der Vorjahre auf die Entwicklung der Nadeln und Blätter und deren Inhaltsstoffe aus. Vor der Nadelprobenahme zur BZE I im Spätherbst 1992 war es in Sachsen-Anhalt mehrere Jahre (1988–1992) überdurchschnittlich warm. Die Niederschläge waren in dieser Zeitspanne in drei Jahren unterdurchschnittlich und in zwei Jahren entsprachen sie dem langjährigen Referenzwert (s. Abb. 136) (SUTMÖLLER 2017). Dementsprechend lag die pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicherfüllung in der Vegetationszeit von 1988–1992 unter dem Durchschnittswert (s. Abb. 137) (SCHMIDT-WALTER et al. 2016). Die Nadelprobenahme erfolgte also im Anschluss an eine warm-trockene Phase. Darüber hinaus war 1992 ein Fruktifikationsjahr. Rund 60 % der älteren Fichten und Buchen fruktifizierten mittel und stark.

Im Vorfeld der BZE II-Probennahme entsprach das Niederschlagsaufkommen in 2005 und 2006 nahezu den langjährigen Mittelwerten. Die Temperatur lag in beiden Jahren über den Referenzwerten. Dies führte zu unterdurchschnittlichen Bodenwasservorräten. 2007 war es dann deutlich zu nass und zu warm und die Bodenwasservorräte lagen weit über dem Durchschnitt (s. Abb. 136 und Abb. 137), sodass in der Phase der Blatt- und Nadelentwicklung sowie im Probennahmezeitraum 2007 das Risiko für Trockenstress für die Waldbäume an den meisten Stichprobenpunkten gering war. Fruchtbildung sowie Insekten- und Pilzbefall waren im Probennahmejahr durchschnittlich ausgeprägt (DAMMANN et al. 2007).

Während die Ergebnisse der Nadelprobenahme 1992 durch Trockenphasen geprägt sind, repräsentieren die Ergebnisse der Blatt- und Nadelanalyse 2007 in Sachsen-Anhalt – obwohl es wärmer als in der Referenzperiode war – aufgrund der guten Wasserversorgung sowie der mittleren Verhältnisse für die Fruchtbildung sowie für den Insekten- und Pilzbefall eine durchschnittliche Ernährungssituation.

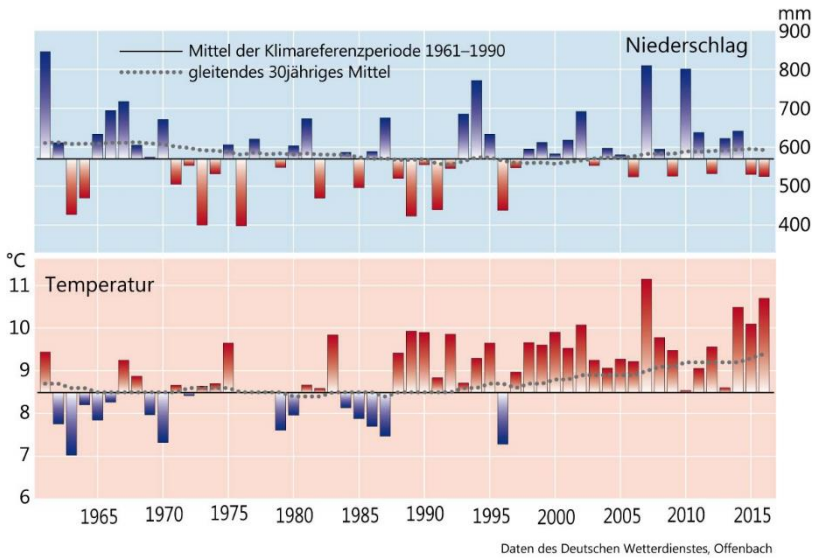


Abbildung 136: Abweichungen von Niederschlag und Temperatur vom Mittel der Klimareferenzperiode 1961–1990 und gleitendes 30-jähriges Mittel in Sachsen-Anhalt, Jahreswerte für das Vegetationsjahr (Oktober bis September) (SUTMÖLLER 2017)

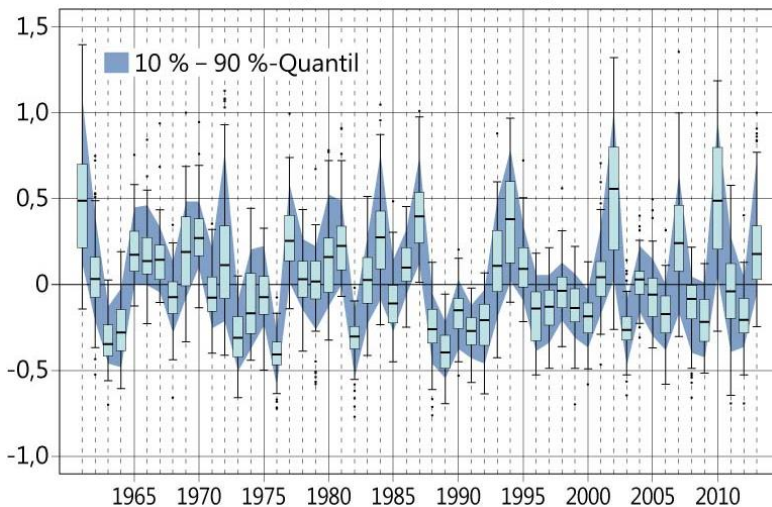


Abbildung 137: Pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicherfüllung in der Vegetationsperiode für die BZE II-Punkte in Sachsen-Anhalt im Zeitraum 1961–2013; Verteilung (Median, Quantil-Bereich (25–75 %, 10 %- und 90 %-Quantil) dargestellt als relative Abweichung vom Mittelwert des Zeitraums 1961–1990) (SCHMIDT-WALTER et al. 2016)

### Standort und Witterung

Die Effekte von Standort und Witterung sind für die verschiedenen Nährelemente unterschiedlich stark. TALKNER et al. (2011) errechneten auf der Basis der Flächen des Intensiven Monitorings in Deutschland die räumliche und zeitliche Varianz verschiedener Elemente in Buchenblättern und Fichtennadeln. Bei der Buche war für die Elemente Calcium, Magnesium und Schwefel der Anteil der räumlichen Varianz an der Gesamtvarianz groß, d. h. die Gehalte dieser Elemente in den Blättern wurden hauptsächlich von standörtlichen Faktoren beeinflusst. Jährliche Schwankungen spielten eine untergeordnete Rolle. Auch für die Kalium- und Phosphorblattgehalte der Buche waren die standörtlichen Faktoren von überwiegender Bedeutung, allerdings spielte die zeitliche Varianz für diese Elemente eine etwas größere Rolle als für Calcium, Magnesium und Schwefel. Bei den Stickstoffblattgehalten wurde hingegen der größte Teil der Varianz durch die zeitliche Komponente erklärt, der Standort spielte eine kleinere Rolle. Für die Fichte ging die Varianz für die Calcium- und Magnesiumgehalte der Nadeln ebenfalls hauptsächlich auf standörtliche Faktoren zurück und auch für Phosphor und Kalium war der räumliche Einfluss groß. Anders als bei der Buche war bei der Fichte für Schwefel der zeitliche Einfluss etwas größer als der räumliche und für Stickstoff zeigte sich ein etwas größerer Einfluss des Standorts im Vergleich zum Beprobungsjahr.

Die Bedeutung der Standortverhältnisse für die Verfügbarkeit von Nährstoffen lässt sich im BZE-Kollektiv für Sachsen-Anhalt aufgrund der geringen Stichprobenanzahl für Eiche, Fichte und Buche nicht ermitteln. Bei der Kiefer werden kaum Unterschiede in den Elementgehalten zwischen den Substratgruppen festgestellt, da die Kiefer in Sachsen-Anhalt vor allem auf Sanden vorkommt. Auf Bundesebene, wo die Kiefer auch auf reicheren Standorten auftritt, reagiert auch die Kiefer auf die chemische Zusammensetzung der Böden (RIEK et al. 2016). Die Calcium- und Magnesiumgehalte in Kiefernadeln auf Kalkverwitterungsböden und auf Böden mit physiologisch günstigeren Humusformen sind in der bundesweiten BZE am höchsten.

### Historische Waldnutzung

Historische Waldnutzungen haben in Sachsen-Anhalt auf nahezu allen Waldflächen stattgefunden und das heutige Waldbild nachhaltig mitgeprägt. Die Nutzung der Wälder durch den Menschen war vor der Einführung von Kunstdünger und der Verwendung fossiler Energiequellen sehr vielfältig. Vieheintrieb, Köhlerei, Glasverhüttung, Streunutzung und Holzeinschlag für Salinen brachten enorme Entzüge an Nährstoffen mit sich und führten regional zur zeitweisen Entwaldung. In der Folge waren viele Waldstandorte an Nährstoffen verarmt und Stickstoff wurde bis vor wenigen Jahrzehnten als der begrenzende Faktor für das Wachstum der Waldbestände angesehen (KREUTZER 1993, MELLERT et al. 2004).

### Säureinträge

Seit den 1960er-Jahren setzte mit den Säureinträgen in die Wälder eine überregionale Beeinflussung der Ernährungssituation ein. Mit den anthropogenen Sulfat-Schwefeleinträgen haben sich erhebliche chemische Veränderungen des Bodens vollzogen. Beträchtliche Säuremengen sind in den Böden gespeichert, der Eintrag basischer Stoffe (Calcium, Magnesium, Kalium) wurde stark reduziert und erhebliche Mengen dieser Nährstoffe sind durch Auswaschung mit dem Sickerwasser verlorengegangen. Anhaltend hohe Stickstoffeinträge in die Waldökosysteme haben ebenfalls zur Versauerung beigetragen und können u. a. durch die Anregung des Wachstums Nährstoffungleichgewichte induzieren.

## 8.5 Diskussion und Bewertung der Ernährungssituation

### 8.5.1 *Stickstoffeutrophierung und Bodenversauerung*

#### 8.5.1.1 *Stickstoffeutrophierung*

Nicht nur die Stickstoffgehalte in den Nadeln und Blättern sind in der BZE 2007 hoch, vielfach werden auch unharmonische N-Quotienten festgestellt. Abweichungen von harmonischen N-Quotienten ergeben sich allerdings nicht nur aufgrund hoher Stickstoffgehalte in Nadeln und Blättern, vielmehr entstehen unharmonische Verhältnisse häufig durch niedrige Blatt- und Nadelgehalte an Phosphor, Kalium, Calcium und Magnesium.

Besonders ausgeprägt ist die Stickstoffübersorgung bei Kiefer, Eiche und Fichte. 82 % der Stickstoffgehalte in den Kiefernadeln an den BZE-Punkten liegen 2007 im Luxusbereich, bei der Eiche sind es 85 %, bei der Fichte 70 % und bei der Buche 36 %. Die geringe Variabilität der Stickstoffgehalte 2007 bei allen untersuchten Baumarten spricht für einen starken, auf den verschiedenen Standorten der BZE nivellierenden Einfluss durch erhöhte Stickstoffeinträge. Trotz verschiedener Bemühungen zur Reduktion der Stickstoffemissionen und hieraus resultierender rückläufiger Einträge übersteigt der anorganische atmosphärische Stickstoffeintrag in die Wälder nach wie vor den Bedarf der Wälder für das Baumwachstum. Der jährliche Eintrag auf den Flächen des Intensiven Monitorings in Sachsen-Anhalt lag im Mittel der Jahre 2013–2017 zwischen 13,6 kg/ha (Nedlitz Kiefer) und 16,2 kg/ha (Klötze Douglasie) (SCHELER 2018). Wegen der hohen Relevanz der Witterung für die jährliche Stickstoffmineralisierung hatte die ausgeglichene Wasserversorgung im Blatt- und Nadelbeprobungsjahr an fast allen BZE-Punkten vermutlich ebenfalls einen synchronisierenden Einfluss auf die Stickstoffgehalte in den Nadeln und Blättern.

Die im Vergleich zur BZE II niedrigeren Stickstoffgehalte in Kiefern- und Fichtennadeln bei der BZE I sind vermutlich zum Teil durch die warm-trockene Witte-

rung vor und im Beprobungsjahr 1992 bedingt. Langjährige Zeitreihen zu Stickstoffgehalten in Kiefernadeln auf Versuchsflächen in Brandenburg zeigten 1991/1992 einen abrupten Rückgang (HEINDORF u. BRANSE 2002) in der Entwicklung der Stickstoffgehalte.

Die Effekte hoher Stickstoffeinträge auf die Wälder sind vielfältig und variieren je nach Standort und Baumartenzusammensetzung: Anregung des Wachstums auf stickstofflimitierten Standorten, stickstoffinduzierte Nährstoffungleichgewichte, Verschiebungen im Verhältnis der Spross-/Wurzelbiomasse, Abnahme der Wurzelmykorrhiza, Abnahme der Frosthärte, Anfälligkeit für Pathogene, Veränderung der Humusqualität, Bodenversauerung, Auswaschung von Nährstoffkationen, Nitratbelastung des Grundwassers (ABER et al. 1989, FLÜCKIGER u. BRAUN 1999, KÖLLING 1991, MELLERT u. KÖLLING 2006).

Einige Autoren gehen davon aus, dass Stickstoff als primär wachstumsregulierender Faktor von anderen Nährelementen wie Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium abgelöst wird (PRIETZEL et al. 2008, BRAUN et al. 2010). FLÜCKIGER et al. (2011) untersuchten in Stickstoffdüngungsversuchen in der Schweiz die Auswirkungen erhöhter Stickstoffbelastungen auf die Stabilität des Waldes. Durch die Stickstoffdüngung wurden für Fichte und Buche generelle Abnahmen der Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern sowie eine Zunahme der N/P-Verhältnisse festgestellt. Die Stickstoffdüngung hemmte sowohl die Feinwurzelbildung als auch das Myzelwachstum von Mykorrhizapilzen, mit möglichen negativen Auswirkungen auf die Wasser- und Nährstoffversorgung der Bäume. Ein gehemmtes Triebwachstum trat auf, wenn die Stickstoffdüngung einen Mangel an Phosphor, Magnesium oder Kalium verursachte.

Für die Waldbäume in Sachsen-Anhalt ist die Stickstoffernährung von besonderer Bedeutung, da hier die Überversorgung mit Stickstoff im Vergleich zum Bundesdurchschnitt (Kiefer, Eiche: 50 %, Fichte, Buche: 25 % Luxusernährung; RIEK et al. 2016) besonders hoch ist und sandige Böden mit eher geringer Basenausstattung vorherrschen.

#### 8.5.1.2 Bodenversauerung

Bis in die 1990er-Jahre war die Schwefeldeposition in die Wälder der Hauptfaktor der Bodenversauerung. Mit dem Rückgang der Schwefelemissionen haben sich seitdem die relativen Anteile deutlich verschoben, 2016 lag der Anteil des anorganischen Stickstoffs am Gesamtsäureeintrag auf den Flächen des Intensiven Monitorings in Sachsen-Anhalt zwischen 83 und 88 % (SCHELER 2017).



## Schwefel

Schwefel wird von Pflanzen über die Wurzel aus dem Boden und über die Blattoorgane aus der Luft aufgenommen (FALLER et al. 1970).

Alle vier untersuchten Baumarten sind 2007 in Sachsen-Anhalt gut mit Schwefel ernährt. An allen Eichenpunkten, an 41 von 44 Kiefernpunkten, an 9 von 11 Buchenpunkten und an 9 von 10 Fichtenpunkten befindet sich der Schwefelgehalt in den Blättern und Nadeln im Normalbereich.

In der Phase hoher Schwefeleinträge in die Wälder wurden die Schwefelgehalte in Nadeln und Blättern als Indikator für Immissionsbelastungen herangezogen. Zum Zeitpunkt der BZE I wurden bundesweit 44 % der Fichten- und 87 % der Kiefernstandorte als belastet (Schwefelgehalte im 1. Nadeljahrgang > 1,4 mg/g) eingestuft (RIEK u. DIETRICH 2000). Im BZE-Kollektiv Sachsen-Anhalt entfielen bei der BZE I alle Kiefern- und Fichtenproben in diesen Bereich. 2007 sind Schwefelgehalte > 1,4 mg/g im 1. Nadeljahrgang in Fichtennadeln nicht mehr vorgekommen, bei den Kiefern weisen 9 % solche Werte auf.

Die wirkungsvolle Reduzierung der Schwefeleinträge in die Wälder durch die Luftreinhaltepolitik zeigt sich in der auffälligen Abnahme der Schwefelgehalte in den Kiefern- und Fichtennadeln an den BZE-Punkten. Die Schwefelgehalte sind 2007 nur noch halb so hoch wie 1992. Die bundesweite Auswertung der BZE-Blatt- und Nadelgehalte (RIEK et al. 2016) ergab ebenfalls einen deutlichen Rückgang der Schwefelgehalte zwischen der BZE I und der BZE II für Kiefer, Fichte und Buche. Auf europäischer Ebene (JONARD et al. 2014) zeigte sich eine Abnahme der Schwefelgehalte in Nadeln und Blättern für Kiefer, Fichte, Buche und Traubeneiche. Bei Kiefer und Traubeneiche waren die Abnahmen auf den besser mit Schwefel versorgten Intensiv-Monitoringflächen höher als auf den Flächen mit Schwefeldefiziten.

Mit dem Rückgang der anthropogenen Schwefeleinträge in die Wälder sind die Bäume zunehmend auf die Schwefelvorräte im Boden angewiesen. Dies kann auf Böden mit geringen Schwefelvorräten zu einer Unterversorgung führen.

## Calcium und Magnesium

Ein ganz wesentliches Problem der Bodenversauerung stellt der Verlust von Nährstoffen dar, denn mit fortschreitender Bodenversauerung gehen Nährstoffkationen aus dem Boden mit dem Sickerwasser verloren (ULRICH 1982, MEESENBERG et al. 2016, DE VRIES et al. 2014), damit reduziert sich das Nährstoffreservoir für die Waldbäume. Auf den Intensiv-Monitoringflächen im Solling (Niedersachsen) kam es in der Bodentiefe 0-50 cm innerhalb von 40 Jahren zu einer Reduktion der Vorräte an austauschbaren Kationen um 60 % (MEESENBERG et al. 2016).

Die Calcium- und Magnesiumernährung der Waldbäume ist ganz wesentlich durch die Ausstattung der bodenbildenden Gesteine mit Calcium und Magnesium bedingt. Modifiziert wird die Beziehung zwischen der Calcium- und Magnesiumernährung und den Standortverhältnissen durch die Austräge von basischen Kationen

im Prozess der Bodenversauerung – in Abhängigkeit von den anthropogenen Eintragsraten – und ehemalige Einträge durch Flugascheneinwehungen. Die standörtliche Komponente der Calcium- und Magnesiumernährung lässt sich in der walder-nährungskundlichen Erhebung im Rahmen der BZE in Sachsen-Anhalt allerdings nicht nachvollziehen, da die Kiefern vorzugsweise auf sandigen Substratgruppen stocken und Eiche, Fichte und Buche nur an wenigen BZE-Punkten präsent sind. Die Calciumgehalte in den Nadeln und Blättern liegen 2007 überwiegend im Normalbereich, häufig auch im Luxusbereich. Lediglich an einem Eichenpunkt wird latenter Mangel festgestellt. Die N/Ca-Quotienten zeigen 2007 überwiegend harmonische Verhältnisse an.

Während die Calciumgehalte in den Kiefernadeln von 1992 zu 2007 zugenommen haben, gingen die Calciumgehalte in den Fichtennadeln zurück. Die bundesweite Auswertung der BZE-Daten zeigt eine Verbesserung der Calciumgehalte für alle vier Hauptbaumarten (RIEK et al. 2016).

Die Magnesiumversorgung der Fichte ist gut. Dies ergibt sich sowohl aus den Nadelgehalten als auch aus den harmonischen N/Mg-Quotienten. Eine Bewertung nach REEMTSMA (1986) bestätigt die gute Magnesiumernährungssituation der Fichte in Sachsen-Anhalt. Bei Kiefer und Eiche befinden sich dagegen 20 % bzw. 38 % der BZE-Punkte im (latenten) Mangelbereich. Die Gehalte in den Buchenblättern umfassen alle Bewertungsstufen vom Mangel- bis zur Luxusernährung, es überwiegt der (latente) Magnesiummangel (8 von 11 BZE-Punkten). Die Magnesiumgehalte in den Kiefernadeln sind 2007 niedriger als 1992, was vermutlich durch den Rückgang basischer Stäube verursacht ist. Bei der Fichte unterscheiden sich die Magnesiumgehalte zwischen den beiden Inventuren nicht.

## Kalium

Der Status der Kaliumernährung ist für die untersuchten Baumarten sehr unterschiedlich. Für die Kiefer ist die Kaliumernährung gut. Bei Eiche und Fichte kommt vereinzelt latenter Kaliummangel vor. An 4 von 11 Buchenpunkten sind die Buchen nicht ausreichend mit Kalium versorgt (latenter Mangel). Rund ein Drittel der Buchen und zwei Drittel der Fichten befinden sich im Bereich unharmonischer N/K-Quotienten.

Neben den Kaliumvorräten im Boden spielt bei der Kaliumernährung auch die Kaliumverfügbarkeit eine Rolle. So können auf aggregierten Böden auch bei hohen Kaliumvorräten durch die Prozesse der Bodenversauerung die wurzelerreichbaren Aggregatoberflächen an Kalium verarmt sein (V. WILPERT 2003). Da im Zuge der Bodenversauerung auch die biologische Aktivität nachlässt, können nicht im ausreichenden Maße neue Aggregatoberflächen mit wurzelerreichbarem Kalium gebildet werden, um den Bedarf der Bäume zu decken. Auch Trockenjahre führen zu einer angespannten Kaliumversorgung, wenn Kalium nur unzureichend aus dem Aggre-

gattinnern nachgeliefert werden kann (MEINING et al. 2013). Zudem können antagonistische Effekte durch eine verstärkte Aufnahme an Calcium, Magnesium oder Ammonium eine Senkung der Kaliumgehalte nach sich ziehen (HEINZE u. FIEDLER 1992).

Die Kaliumgehalte in den Kiefernadeln haben sich seit der BZE I nicht verändert, für die Fichte ist eine starke Abnahme der Kaliumgehalte signifikant. Aus der Literatur ergibt sich kein einheitliches Bild für Veränderungen der Kaliumernährungssituation. In Rheinland-Pfalz (GREVE et al. 2016) und Niedersachsen (DAMMANN et al. 2019) nahmen die Kaliumgehalte der Fichten zwischen der BZE I und der BZE II ab, die der Kiefer zu. In der bundesweiten BZE verbesserte sich die Kaliumernährung der Fichte von der BZE I zur BZE II leicht, für Kiefer, Buche und Eiche ergab sich keine gerichtete Entwicklung (RIEK et al. 2016). JONARD et al. (2014) ermittelten auf den Flächen des Intensiven Monitorings in Europa Abnahmen der Kaliumgehalte für Traubeneiche und Fichte, bei Buche und Kiefer gab es keine Veränderung.

Die eher angespannte Kaliumversorgung von Fichte und Buche birgt Risiken, denn unausgewogene N/K-Quotienten können die Widerstandsfähigkeit gegenüber Krankheitserregern vermindern (FLÜCKIGER u. BRAUN 2003) und Kaliummangel kann die Frostempfindlichkeit der Fichte erhöhen (HARTMANN et al. 2007). Da Kalium eine wichtige Funktion bei der Aufrechterhaltung des Turgors in den Nadeln und Blättern spielt und damit eine wichtige Steuergröße für die Transpiration der Bäume ist, erscheint eine Abnahme der Kaliumgehalte vor dem Hintergrund steigender Temperaturen im Verlauf des Klimawandels kritisch.

## Mangan

In den Kiefern- und Fichtennadeln überwiegen 2007 Mangangehalte im Normalbereich, bei Buche und Eiche befinden sich mehr als die Hälfte der BZE-Punkte im Luxusbereich. Überschreitungen des Normalbereichs treten in Niedersachsen insgesamt selten auf (DAMMANN et al. 2019), in Hessen dagegen sind für Kiefer und Eiche Mangangehalte im Luxusbereich die Regel (DAMMANN et al. 2016). Die Mangangehalte in den Kiefernadeln in Sachsen-Anhalt haben seit der BZE I abgenommen, bei der Fichte gibt es keine Veränderung zwischen den beiden BZE-Inventuren.

Die Verfügbarkeit von Mangan hängt vom Mangangehalt im Boden ab, wird aber vor allem über die pH-Werte im Boden bestimmt. Oberhalb von pH 5 ist Mangan weitgehend im Boden gebunden, zwischen pH 5 und pH 4 geht es verstärkt in Lösung, unterhalb von pH 4 lässt die Bindungsfähigkeit des Bodens für Mangan nach und es kann zu erheblichen Auswaschungsverlusten kommen (ULRICH 1981). Nach AUGUSTIN et al. (2005) wird Mangan unter etwa pH 4,5 verfügbar und verschwindet unter pH 3,5 wegen der Auflösung der Manganoxide wieder. Dieser nicht-lineare Prozess charakterisiert einen wichtigen Wendepunkt, an dem der Boden vom Austauscher-Pufferbereich in den stark sauren Aluminium-Pufferbereich

übergeht. Daher wird Mangan auch als Indikator für Verwitterungsprozesse bzw. Bodenversauerungsprozesse bezeichnet (v. WILPERT 2003, AUGUSTIN et al. 2005). Klare Zusammenhänge zwischen Manganvorräten im Boden und Gehalten in den Nadeln und Blättern bestätigen auch die Untersuchungen von ASCHE (1997), GÄRTNER et al. (1990) und RUSS et al. (2011).

BRAUN u. FLÜCKIGER (2009) nennen Mangantoxizitätsbereiche für Buche (> 1,2–1,5 mg/g) und für Fichte (> 5 mg/g). Die Fichten in Sachsen-Anhalt erreichen diese toxischen Bereiche nicht. Bei der Buche liegen allerdings 8 der 11 Buchenproben über 1,2 mg/g, 6 Buchenproben überschreiten auch die Schwelle von 1,5 mg/g. Die Buchenblattproben der BZE wiesen jedoch keine sichtbaren Anzeichen für Mangantoxizität auf. Hohe Stickstoffeinträge, zunehmende Verarmung der Bäume an Phosphor und Magnesium sowie vermehrter Witterungsstress dürften das Auftreten von Mangantoxizität fördern (BRAUN u. FLÜCKIGER 2009).

## Eisen

Eisen wird wie Mangan im Prozess der Bodenversauerung mobil. Eine verstärkte Mobilisierung von Eisen in der Bodenlösung setzt unter pH-Werten von 3,8 ein (Eisen-Pufferbereich). Die vier untersuchten Baumarten sind gut mit Eisen versorgt, (latenter) Mangel tritt an einem BZE-Kiefernplot auf. Die Eisengehalte der Kiefern haben zwischen der BZE I und II deutlich abgenommen, bei der Fichte gab es keine signifikante Änderung.

Trotz der bereits erzielten Erfolge zur Minderung der Säureeinträge in die Wälder ist zu erwarten, dass die Auswaschung von Nährstoffen weiter fortschreitet und die Bodenversauerung weiterhin einen starken negativen Einfluss auf die Nährstoffversorgung der Wälder hat.

### 8.5.2 Phosphorernährung

Defizite in der Phosphorernährung sind bei der BZE 2007 für die beiden Laubbaumarten festzustellen. Kiefer und Fichte zeigen jeweils an einem BZE-Punkt latenten Phosphormangel. Im Bereich unharmonischer N/P-Quotienten befinden sich 5 % der Kiefern, 2 von 10 Fichten, 7 von 13 Eichen und alle Buchen.

In besonderem Maß ist die Buche betroffen, bei der die unzureichende Phosphorernährung am stärksten ausgeprägt ist. Für die Verfügbarkeit von Phosphor, d. h. die Mobilisierung bzw. Fixierung von Phosphor, werden vor allem Bodeneigenschaften wie die Verwitterungsrate, der Versauerungsgrad und die biologische Aktivität des Bodens als bestimmende Faktoren genannt (RUMPF et al. 2008). Offenbar werden diese standörtlichen Faktoren durch überregional wirksame Einflüsse wie z. B. die Stickstoffdeposition und den Klimawandel überlagert.

Hohe Stickstoffeinträge können eine angespannte Phosphorernährung zur Folge haben (MOHREN et al. 1986, BRAUN et al. 2010, JONARD et al. 2014). In Stickstoffdüngexperimenten auf Fichten- und Buchenflächen in der Schweiz bewirkte die Stickstoffzugabe eine Abnahme der Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern, während die Stickstoffgehalte nur moderat anstiegen (BRAUN et al. 2010). Zusammen mit dem Anstieg der Temperatur in den letzten Jahrzehnten bewirken die anthropogenen Stickstoffeinträge ein gesteigertes Wachstum der Waldbäume und können dadurch Nährstoffungleichgewichte induzieren, die auch Phosphor betreffen. Die Wirkungen eines Überangebots von Stickstoff auf die Phosphorversorgung der Bäume sind vielfältig. So wird u. a. das für die Phosphoraufnahme wichtige Mykorrhizawachstum gehemmt (NILSSON u. WALLANDER 2003), die Zusammensetzung der mikrobiellen Bodengemeinschaften verändert (WALDROP et al. 2004) und der Abbau der organischen Substanz gestört (PEÑUELAS et al. 2013).

Auch der Anstieg der Temperatur in den letzten Jahrzehnten könnte für die Phosphorernährung von Bedeutung sein. PEUKE u. RENNENBERG (2004) stellten an Buchensämlingen nach einer Trockenperiode eine Abnahme der Phosphorgehalte in allen Pflanzengeweben fest. Im Zusammenwirken mit der Verlängerung der Vegetationszeit (FABIAN u. MENZEL 1998), dem Anstieg der Temperatur (IPCC 2014) und erhöhten CO<sub>2</sub>-Emissionen (CEULEMANS et al. 1999) haben hohe Stickstoffeinträge nicht nur eine Wachstumssteigerung (SOLBERG et al. 2009, LAUBHANN et al. 2009), sondern auch eine Intensivierung der Fruktifikation bewirkt. Nicht auszuschließen ist, dass die seit ca. 25 Jahren beobachtete intensive Fruchtbildung der Buche (PAAR et al. 2011, SCHMIDT 2006) zu einer Abnahme der Phosphorgehalte in den Buchenblättern beiträgt, denn in Jahren mit Fruchtbildung besteht erhöhter Phosphorbedarf. KHANNA et al. (2009) ermittelten für eine Buchenfläche im Solling Phosphorfrachten mit dem Streufall, die in Mastjahren 8,1 kg/ha betragen, in Jahren ohne Mast dagegen nur 2,7 kg/ha.

TALKNER et al. (2015) verweisen darauf, dass aufgrund des hohen Phosphorbedarfs der Bäume bei nur geringen Phosphoreinträgen in die Wälder dem internen Phosphorkreislauf besondere Bedeutung zur Erhaltung der Phosphorverfügbarkeit zukommt. Sowohl die Humusaufgabe als auch die organische Substanz im Mineralboden spielen eine bedeutende Rolle für die Phosphorernährung der Buche (TALKNER u. ZEDERER 2020). Die Verfügbarkeit von Phosphor im Boden ist im Vergleich zu anderen Makronährelementen niedrig (PEUKE u. RENNENBERG 2004, BLUME et al. 2010). Deshalb spielt die Wiederverwertung von Phosphor aus dem Streufall durch Mineralisierung eine wichtige Rolle im Phosphorkreislauf (YANAI 1992). Außerdem wird ein Teil des Phosphors im Herbst aus den Blättern in den Baum zurückverlagert und kann bei Bedarf wiederverwertet werden. Hierzu passt die Beobachtung von KHANNA et al. (2009) auf Buchen-Intensivmessflächen, wo bei einer angespannten Phosphorernährungssituation im Solling und im Göttinger Wald 47–51 % des Phosphors aus den Buchenblättern in die Bäume zurückverlagert wurden, während es auf der Fläche Zierenberg mit hohen Phosphorblattgehalten nur

25 % waren. Anpassungsmechanismen der Buche auf phosphorarmen Standorten zeigen sich im Feinwurzelwachstum, der Mykorrhizierung und bei der Zirkulation und Speicherung von Phosphor innerhalb der Buchen (KRÜGER et al. 2020).

Geringe Phosphorgehalte in den Blättern können ein verringertes Wachstum der Buche bewirken. Bei Untersuchungen in der Schweiz (FLÜCKIGER et al. 2011) war bei Phosphorgehalten unter 1,0 mg/g der Zuwachs der Buchen vermindert. In der gleichen Studie nahm das Triebwachstum bei steigenden Phosphorgehalten zu, bis ein Blattgehalt von ca. 1,0 mg P/g erreicht war. Der Großteil der Buchen im BZE-Kollektiv in Sachsen-Anhalt befindet sich 2007 im Bereich latenten Mangels, wo noch keine Wachstumseinbußen zu erwarten sind.

Die Bestimmung der Phosphorgehalte bei der BZE I in Sachsen-Anhalt erfolgte vermutlich mit einer anderen Methode als bei der BZE II. Die Ergebnisse sind daher nicht vergleichbar. Im BZE-Kollektiv und im Intensiven Monitoring in Niedersachsen wird kein zeitlicher Trend für die Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern festgestellt (DAMMANN et al. 2019). Auf hessischen Intensiv-Monitoringflächen nahmen die Phosphorgehalte in den Buchenblättern zwischen 2005 und 2008 ab (DAMMANN et al. 2016). In Frankreich wurden Abnahmen von 23 % zwischen 1969/1971 und 1996/1997 (DUQUESNAY et al. 2000) ermittelt, in der Schweiz nahmen die Phosphorgehalte zwischen 1984 und 2007 um 27 % ab (FLÜCKIGER et al. 2011). Die Auswertung von 79 Buchen-Intensivmonitoringflächen in Europa (TALKNER et al. 2015) ergab eine Abnahme der Phosphorgehalte von 13 % innerhalb von 20 Jahren (1991–2010). Diese Abnahme erfolgte unabhängig von der Höhe der Phosphorgehalte in den Buchenblättern. Weniger eindeutig sind die Trends zur Phosphorennährung der Fichte. Eine Abnahme der Phosphorgehalte in Fichtennadeln wurde z. B. in Rheinland-Pfalz (GREVE et al. 2016) und in der Schweiz (FLÜCKIGER et al. 2011) ermittelt, auf europäischer Ebene ergab sich kein Trend (JONARD et al. 2014).

Anhaltend hohe Stickstoffeinträge und klimatische Veränderungen könnten die angespannte Phosphorennährungssituation verschärfen. Zur Sicherung der Phosphorversorgung ist auf vielen Standorten eine humuspfleghche Waldbewirtschaftung von zentraler Bedeutung (PUHLMANN et al. 2020). Weitere Untersuchungen zu den Regulierungsmechanismen der Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor und zu den Ursachen der abnehmenden Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern sind daher notwendig.

### 8.5.3 Bodenschutzkalkung

In Sachsen-Anhalt wird die Kalkungsbedürftigkeit von Waldflächen anhand der Basensättigung und der Magnesiumernährung festgelegt (NW-FVA 2010). Als kalkungsbedürftig sind solche Böden anzusehen, bei denen in 30–60 cm Bodentiefe die Basensättigung < 15 % beträgt, und bei denen kein Ausschlussgrund für eine Kalkung vorliegt. Neben dem Bodenzustand muss geprüft werden, ob die Bestände

ausreichend mit Magnesium ernährt sind. Hierzu sind Ergebnisse von Nadel/Blattanalysen erforderlich.

Kalkungsbedürftig sind terrestrische Standorte (Feuchtegruppe T) in den Nährkraftstufen Z, M und K, sofern sie stark versauert sind (Basensättigung < 15% in 30–60 cm Bodentiefe). Im Harz kommen stark versauerte Böden vor allem auf Standorten mit Granit, Kieselschiefer und Quarzit als Ausgangsmaterial der Bodenbildung vor.

Von der Bodenschutzkalkung ausgeschlossen sind besonders arme (Nährkraftstufe A) und besonders reiche (Nährkraftstufe R) Standorte und Biotope nach § 30 BNatSchG bzw. § 37 NatSchG LSA sowie unbestockte oder nur gering überschirmte Flächen und Erstaufforstungen auf ehemals landwirtschaftlich genutzten Böden.

Ziel der kompensatorischen Bodenschutzkalkung ist es, die im Folgenden genannte Wirkungskette zu unterstützen:

- Verringerung der Risiken aus bereits abgelaufener und aktueller Bodenversauerung
- Erhöhung der Speicherfähigkeit der Böden für Nähr- und Schadstoffe
- Stabilisierung des Ernährungszustandes
- Verbesserung der Vitalität der Bestände (Belaubungs- und Vergilbungsgrad)
- Förderung der Durchwurzelung des Mineralbodens
- Förderung der Bodenvegetation
- Förderung der bodenwühlenden Fauna und der Entwicklung hin zu Mineralboden-Humusformen

In der BZE-Stichprobe Sachsen-Anhalt waren 2007 drei Fichtenpunkte im Harz gekalkt. Aufgrund dieser geringen Stichprobenanzahl lassen sich hieraus keine allgemeingültigen Aussagen ableiten.

### Magnesium

Aufgrund der für das BZE-Kollektiv aufgezeigten Defizite in der Magnesiumversorgung sowie der teilweise unausgewogenen N/Mg-Verhältnisse von Kiefer, Eiche und Buche in Sachsen-Anhalt sind Kalkungsmaßnahmen zu empfehlen. Kalkungseffekte auf die Magnesiumgehalte der Blätter und Nadeln wurden für alle vier Hauptbaumarten in der bundesweiten BZE und in Versuchen zur wissenschaftlichen Begleitung der Bodenschutzkalkung ermittelt (RIEK et al. 2016, EVERS et al. 2008, GUCKLAND et al. 2011, GREVE 2014).

## Calcium

Mit Calcium sind die Baumarten der BZE-Stichprobe in Sachsen-Anhalt gut versorgt, so dass Kalkungsmaßnahmen zur Anhebung der Calciumgehalte in den Nadeln und Blättern nicht erforderlich sind. Die Auswertung der bundesweiten BZE-Daten weisen für Buche und Eiche höhere Calciumgehalte in den Blättern der gekalkten gegenüber den ungekalkten BZE-Punkten auf (RIEK et al. 2016) und auch in Versuchen zur Bodenschutzkalkung sind solche Effekte beschrieben worden (EVERS et al. 2008, v. WILPERT 2003, HUBER et al. 2006, GREVE 2014).

Eine Verbesserung der Calcium- und Magnesiumversorgung nach Kalkungsmaßnahmen erfolgt umso stärker, je schlechter die ursprüngliche Versorgung mit diesen Elementen ist (GUCKLAND et al. 2011) und steigt mit der Kalkungshäufigkeit (RIEK et al. 2016).

## Phosphor

Eine Verbesserung der unzureichenden Phosphorernährung von Buche und Eiche an den BZE-Punkten in Sachsen-Anhalt durch die Kalkung erscheint eher unwahrscheinlich. In der Literatur finden sich Studien zu einer Erhöhung der Phosphorgehalte in Nadeln und Blättern im Anschluss an Kalkungsmaßnahmen (KULHAVÝ et al. 2009, DAMMANN et al. 2016), häufiger wird allerdings kein Kalkungseffekt nachgewiesen (GUCKLAND et al. 2011, JONARD et al. 2010, v. WILPERT 2003). HAYNES (1982) geht davon aus, dass auf versauerten Standorten die Verfügbarkeit von Phosphor für die Pflanzen sehr komplex und schwer zu definieren ist. Bei der Kalkung von sauren Böden werden in Abhängigkeit von individuellen Bodeneigenschaften unterschiedliche Mechanismen wirksam, die sowohl eine Abnahme, ein Gleichbleiben oder eine Zunahme der Phosphoraufnahme durch die Bäume hervorrufen können.

## Kalium

Die z. T. niedrigen Kaliumgehalte bei Fichte und Buche sowie die Abnahme der Kaliumgehalte in Fichtennadeln zwischen der BZE I und II deuten darauf hin, dass die Kaliumernährung beider Baumarten nicht stabil ist und bei der Planung von (wiederholten) Kalkungen zu berücksichtigen ist. Effekte der Bodenschutzkalkung auf die Höhe der Kaliumgehalte in Blättern und Nadeln werden in der Literatur nicht einheitlich beschrieben. Von Abnahmen nach (wiederholten) Kalkungsmaßnahmen berichten EVERS et al. (2008), WEIS et al. (2009) und RIEK et al. (2016). Keine Veränderung beobachteten HUBER et al. (2006), KULHAVÝ et al. (2009) und JONARD et al. (2010). Auf den Versuchsflächen zur Bodenschutzkalkung fanden GUCKLAND et al. (2011) abnehmende Kaliumgehalte bei Buche und Fichte nach Kalkungsmaßnahmen und führten diesen Effekt auf Ionenkonkurrenz zurück. Bei der Buche gab es einen Zusammenhang mit den Calciumgehalten, bei der Fichte mit den Magnesiumgehalten im Boden. GREVE (2014) weist darauf hin, dass niedrigere Kaliumgehalte



in Fichtennadeln gekalkter Standorte auch eine Folge reduzierten Bedarfs sein können, möglicherweise übernimmt z. B. das mit der Kalkung zugeführte Magnesium pflanzenphysiologische Funktionen von Kalium.

### Schwefel

Trotz der drastischen Abnahme der Schwefelgehalte in den Kiefern- und Fichtennadeln zwischen den beiden BZE-Zeitpunkten wird 2007 für alle 4 untersuchten Baumarten eine weitgehend gute Schwefelversorgung festgestellt. Im bundesweiten BZE-Datensatz waren die Schwefelgehalte von Fichten und Eichen an den gekalkten BZE-Punkten signifikant niedriger als an den ungekalkten (RIEK et al. 2016).

### Eisen, Mangan und Zink

Mit Eisen, Mangan und Zink zeigen sich alle 4 Baumarten in Sachsen-Anhalt gut versorgt. In der bundesweiten BZE II-Auswertung ergaben sich höhere Zinkgehalte an gekalkten Fichten- und Buchenpunkten. Für Eisen (alle vier Baumarten) und Mangan (Fichte und Buche) wurden im bundesweiten Datensatz verringerte Nadel- und Blattgehalte nach (wiederholter) Kalkzufuhr beobachtet (RIEK et al. 2016).

### Stickstoff

Keinen oder nur geringe Kalkungseffekte auf die Stickstoffgehalte fanden HUBER et al. 2006, KULHAVÝ et al. 2009, JONARD et al. (2010) und RIEK et al. (2016).

Obwohl die Säureinträge in die Wälder durch Luftreinhaltemaßnahmen stark reduziert wurden, werden z. T. immer noch die kritischen Belastungsgrenzen für Säure überschritten (Meesenburg 2016). Auch die im Boden gespeicherten Säurelasten beeinträchtigen weiterhin die Bodenfunktionen. Daher wird sich auch die Auswaschung von Nährstoffen aus dem Wurzelraum der Bäume voraussichtlich weiter fortsetzen. Zur Stabilisierung der Waldökosysteme ist in Sachsen-Anhalt die Fortführung standortsangepasster Kalkungsmaßnahmen vorgesehen. Bei der Kalkungsplanung sind aus Sicht der Waldernährung neben den Aspekten der Verminderung von Auswirkungen der Bodenversauerung auch die möglichen negativen Wirkungen auf die Kaliumernährung der Waldbäume zu berücksichtigen.

#### 8.5.4 *Vollbaumnutzung*

Neben den standörtlichen Gegebenheiten können Informationen zum Ernährungszustand der Waldbäume auch zur Steuerung der Nutzung von Nichtderbholz herangezogen werden. Da die Nadel- und Blattprobennahme an den BZE-Punkten 2007 unter durchschnittlichen Rahmenbedingungen stattfand, geben die BZE-Ernährungsdaten mittlere Verhältnisse der Ernährungssituation in Sachsen-Anhalt wieder. Die Nährstoffgehalte und Stickstoffquotienten der Momentaufnahme BZE

2007 sind daher geeignet, um Hinweise für betriebliche Fragestellungen, wie die Möglichkeiten und Grenzen der Vollbaumnutzung, abzuleiten.

Mit veränderten energiepolitischen Rahmenbedingungen und neuen Möglichkeiten der Aufarbeitung und Verwertung haben sich neue Märkte für forstliche Biomasse entwickelt (BLOCK u. MEIWES 2013, RASPE u. GÖTTLEIN 2008). Bei der konventionellen Derbholznutzung verbleiben die nährstoffreichen Äste (< 7 cm Durchmesser), Zweige, Nadeln und Blätter im Wald und damit dem Nährstoffkreislauf erhalten, während bei einer Vollbaumnutzung alle oberirdischen Baumkompartimente dem Nährstoffkreislauf der Wälder entzogen werden. Bei der Vollbaumnutzung werden daher im Vergleich zur Derbholznutzung überproportional mehr Nährstoffe entnommen. Für eine Intensivierung der Nutzung unterhalb der Derbholzgrenze sollte sich die Wahl der dafür geeigneten Baumarten und Standorte deshalb an den Standortpotentialen und der Ernährungssituation ausrichten. Die Bewertung des Ernährungszustandes im Hinblick auf die Einschätzung unterschiedlicher Intensitäten der Nutzung wird hier wie folgt vorgenommen:

(1) Befinden sich die Mediane der Hauptnährelemente (Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium, Schwefel) in den Nadeln und Blättern, d. h. die Hälfte der BZE-Punkte einer Substratgruppe, innerhalb bzw. oberhalb des Normalbereichs und die Stickstoffquotienten im Bereich harmonischer Elementverhältnisse, liegen aus walderernährungskundlicher Sicht keine Ausschlussgründe für eine Intensivierung der Nutzung vor.

(2) Befindet sich der Median eines Nährstoffs einer Substratgruppe im latenten Mangelbereich und/oder ein Stickstoffquotient außerhalb der harmonischen Elementverhältnisse, sollte eine Intensivierung der Nutzung nur eingeschränkt (nach Prüfung der örtlichen Verhältnisse) erfolgen.

(3) Befindet sich der Median eines Hauptnährelements im Mangelbereich, also unter der Symptommgrenze, so wird dies für die betroffene Substratgruppe aus walderernährungskundlicher Sicht als Ausschlussgrund für eine Intensivierung der Nutzung gewertet. Dies kam 2007 bei keiner der untersuchten Baumarten im BZE-Kollektiv vor.

In der flächendeckenden, repräsentativen Stichprobenerhebung der BZE ist die Anzahl der Stichprobenpunkte mit Fichte, Eiche und Buche gering. Die Aussagen zur Biomassennutzung beschränken sich hier deshalb auf die Kiefer.

Die Kiefer insgesamt und auch die Kiefer auf den Hauptsubstratgruppen auf Sand erfüllen die unter (1) genannten Voraussetzungen für die Nutzung, d. h. es ergeben sich aufgrund der Ernährungssituation der Kiefer keine Ausschlussgründe für eine Intensivierung der Nutzung. Die bessere und ausgewogenere Magnesiumernährung der Kiefern auf unverlehmten und verlehmtten Sanden spricht für eine Bevorzugung dieser Substratgruppen bei der Vollbaumnutzung.

## 8.6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse von Blatt- und Nadelanalysen ermöglichen eine unmittelbare Einschätzung der Versorgung der Waldbäume mit Nährstoffen und der Belastung mit Schadstoffen. Diese waldernährungskundlichen Daten können zur Bewertung von Bodenveränderungen durch Versauerung und Eutrophierung, die Erfolgskontrolle von Luftreinhaltemaßnahmen und Bodenschutzkalkungen sowie der Waldbewirtschaftung (z. B. Energieholznutzung) beitragen. Im Beprobungsjahr 2007 waren die Rahmenbedingungen (Witterung, Insekten- und Pilzbefall, Fruchtbildung) für die Blatt- und Nadelanalyse so, dass die Ergebnisse mittlere Verhältnisse abbilden.

Für die Kiefer wurde 2007 die Analyse der Nährelemente an 44 Punkten durchgeführt, sodass für diese Baumart fundierte Ergebnisse zur Ernährung vorliegen. Die Stichprobenanzahl der Eiche, Fichte und Buche ist in Sachsen-Anhalt niedrig, daher sind lediglich Tendenzen ableitbar. Ein Vergleich der waldernährungskundlichen Ergebnisse mit anderen Ländern zeigt aber, dass die für Sachsen-Anhalt vorgefundenen Verhältnisse mit denen anderer Länder im Einklang stehen. So zeigt sich beispielsweise die angespannte Ernährungssituation der Buche in Sachsen-Anhalt auch im bundesweiten BZE-Datensatz.

Relativ entspannt ist 2007 die Ernährungssituation der Kiefer in Sachsen-Anhalt. Als einzige der untersuchten Baumarten befinden sich bei der Kiefer im BZE-Kollektiv 2007 alle untersuchten Nährelemente (Median) mindestens im Normalbereich und auch die Mediane der Stickstoffquotienten liegen ausschließlich innerhalb der Grenzwerte harmonischer Ernährung. Mehr als die Hälfte der Kiefernpunkte weist 2007 keinen (latenten) Mangel an Hauptnährstoffen oder unharmonische Stickstoffquotienten auf (59 %). Bei Eiche, Fichte und Buche ist dagegen eine gute und ausgewogene Versorgung mit Hauptnährstoffen selten (Eiche: 3 von 13, Fichte: 2 von 10, Buche 0 von 11).

Phosphordefizite sind weit verbreitet. Vor allem die Buche weist (latenten) Phosphormangel auf (8 von 11 Buchenpunkten); bei der Eiche sind es 6 von 13. Kiefer und Fichte hingegen sind besser mit Phosphor versorgt, je 1 Punkt weist latenten Phosphormangel auf. Auch Kaliumdefizite sind bei der Buche am häufigsten (4 von 11 Punkten). Bei der Kiefer tritt kein latenter Kaliummangel auf; bei Eichen und Fichte an jeweils 1 Punkt. Die Magnesiumversorgung der Fichte ist gut (mindestens Normalbereich). Bei den anderen Baumarten sind Magnesiumdefizite häufiger: 25 % der Kiefern sowie 5 von 13 Eichenpunkten weisen Magnesiumdefizite auf. Bei der Buche sind es 8 von 11 Punkten. Eine unzureichende Schwefelversorgung ist auf wenige BZE-Punkte begrenzt (Kiefer: 3, Eiche: 0, Fichte: 1, Buche: 2).

Die aus der Ernährungssituation abgeleiteten Empfehlungen zur Vollbaumnutzung ergeben für die Kiefer nach den hier verwendeten Kriterien keine Einschränkungen für die Vollbaumnutzung.

In Sachsen-Anhalt wurden für Kiefer und Fichte bisher zwei landesweite Ernährungsinventuren durchgeführt. Seit der ersten Erhebung haben sich einige Faktoren,

die die Ernährung der Waldbäume beeinflussen, verändert. Die starke Reduktion der Schwefelemissionen führte zu einer Abnahme der Schwefelgehalte in den Nadeln beider Baumarten. Dass bislang nur eine geringe Verminderung der Stickstoffeinträge erreicht wurde, zeigt sich 2007 an den hohen Stickstoffgehalten in den Nadeln und Blättern aller vier Baumarten. Die im Vergleich zu 2007 niedrigeren Stickstoffgehalte in Kiefern- und Fichtennadeln könnten durch die Witterungssituation bei der Probenahme 1992 bedingt sein. Die Mangangehalte sind bei Kiefer und Fichte gesunken.

Insgesamt lassen sich die Maßnahmen zur Luftreinhaltung und die Situation zur Bodenversauerung anhand der Blatt- und Nadelinhaltsstoffe im Rahmen der BZE nachvollziehen. Es zeigt sich, dass landesweite Inventuren mit mehrjährigen Intervallen die Ernährungssituation und die Nährstoffverfügbarkeit über lange Zeiträume plausibel abbilden können. Allerdings machen die Ergebnisse der Inventur 1992 deutlich, dass bei diskontinuierlichen Erhebungen nicht auszuschließen ist, dass jährliche Schwankungen der Nadel- und Blattinhaltsstoffe langfristige Trends überlagern. Zur Bewertung waldernährungskundlicher Ergebnisse hat sich die im Forstlichen Umweltmonitoring praktizierte Kombination aus landesweiten Inventuren mit einer hohen Anzahl an Beprobungspunkten im mehrjährigen Turnus mit Nadel- und Blattanalysen von regelmäßig im ein- bis zweijährigen Turnus beprobten, ausgewählten Flächen (Intensives Monitoring) und Experimentalflächen als sinnvoll erwiesen.

## 9 Vegetation

*Marcus Schmidt, Egbert Schönfelder, Uwe Paar, Jan Evers*

### 9.1 Einführung

Im Zuge der Bodenzustandserhebung II wurde in den Bundesländern Niedersachsen, Bremen, Hessen und Sachsen-Anhalt erstmalig die Waldvegetation auf der Grundlage einer systematischen, repräsentativen Stichprobe erfasst. Die gemeinsame Auswertung der an denselben Stichprobenpunkten erfassten Vegetationsdaten und Umweltvariablen (insbesondere bodenchemische Kenngrößen) ermöglicht Aussagen zu den Zusammenhängen zwischen der Pflanzenartenzusammensetzung der Waldbestände und dem Bodenzustand. Nachfolgend sollen Ergebnisse zu den Kenngrößen pH(H<sub>2</sub>O), Basensättigung und dem C/N-Verhältnis sowie zu den austauschbaren Vorräten der basischen Kationen Calcium, Magnesium und Kalium aus der Ake (effektive Kationenaustauschkapazität), jeweils bezogen auf den mineralischen Oberboden, vorgestellt werden.

Es ist ein Hauptziel der Darstellung dieser Ergebnisse, dass die Erkenntnisse über Zusammenhänge zwischen dem Vorkommen von weit verbreiteten Pflanzenarten und dem Auftreten bodenchemischer Kenngrößen direkt in der Praxis Anwendung finden können. Dabei wird in erster Linie die Identifizierung von Indikator- oder Zeigerarten(-gruppen) für die Forstliche Standortskartierung angestrebt. Diese können für eine Feldeinschätzung des chemischen Oberboden-zustandes sowie des Nährstoffhaushaltes (Trophie) von Waldböden herangezogen werden oder als zusätzliche Informationsquelle dienen.

### 9.2 Methodik

#### 9.2.1 Datenerhebung

Für alle BZE-Punkte wurden in den Vegetationsperioden 2006 bis 2008 Vegetationsaufnahmen nach der gleichen Methodik durchgeführt. Dabei wurden innerhalb eines Radius von 30 m um den Mittelpunkt der BZE-Fläche nach einem einheitlichen Lageschema (s. Kap. 5) 400 m<sup>2</sup> (20 x 20 m) große Dauerbeobachtungsflächen eingerichtet, auf denen die Arten der Baum-, Strauch- und Krautschicht mit Deckungsgrad in Prozent und die Arten der Moosschicht (Moose, Flechten) ohne quantitative Angaben erfasst wurden (WELLBROCK et al. 2006, dort weitere methodische Details). Insgesamt wurden 388 Vegetationsaufnahmen in den Bundesländern Niedersachsen (169), Bremen (4), Hessen (139) und Sachsen-Anhalt (76) und an den Stichprobenpunkten der BZE II durchgeführt.

### 9.2.2 Datenauswertung

Um Zusammenhänge zwischen den an den BZE-Punkten erfassten Pflanzenarten und den gemessenen Umweltvariablen (v. a. Bodenchemie) herauszuarbeiten, wurden alle BZE-Punkte nach den Variablen klassifiziert. Dabei wurden (mit Ausnahme der Pufferbereiche) die Grenzen der Klassen an den Definitionsbereich (tatsächliches Vorkommen der Messwerte) angepasst. Bezugshorizont ist der Mineralboden in 0–5 cm Bodentiefe, da hier die Differenzierung der Trennartengruppen am eindeutigsten war.

Eine Kontingenztafel (Häufigkeitstabelle) mit den Vorkommen der Pflanzenarten (ohne Berücksichtigung von Deckungsgraden) und den jeweiligen Variablenausprägungen bildet die Grundlage für einen Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest. Bei dem Test wird davon ausgegangen, dass die Artvorkommen unabhängig verteilt sind. Wenn diese Hypothese zutrifft, sind die Residuen nahe Null, wenn nicht, geben sie die Höhe der Abweichung vom erwarteten Ergebnis (Erwartungswert) an. Voraussetzung für ein belastbares Testergebnis ist eine Mindesthäufigkeit der insgesamt 142 bis auf das Niveau von Arten oder Artengruppen bestimmbaren Pflanzensippen von 15 Vorkommen. Diese Voraussetzung erfüllten insgesamt 120 Gefäßpflanzen- und Moosarten bzw. -sippen. Bei den Baum- und Straucharten wurde nur das Vorkommen in der Krautschicht (Verjüngung) berücksichtigt. Da bei den Wirtschaftsbaumarten mit geringer Fähigkeit zur Fernausbreitung (Fichte, Rotbuche, Rot-, Stiel- und Trauben-Eiche) anders als bei ausbreitungsstarken Baumarten (z. B. Ahorn- oder Birken-Arten, Spätblühende Trauben-Kirsche) das Vorkommen von Verjüngung nicht unbedingt das natürliche ökologische Verhalten widerspiegelt, sondern die Bedingungen, unter denen diese Baumarten bevorzugt angebaut werden, wurden die Ergebnisse für diese Baumarten nicht berücksichtigt.

Die mithilfe des Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstests ermittelten Residuen fanden jeweils Eingang in eine Hauptkomponentenanalyse (PCA). Sie dient hier in erster Linie der graphischen Darstellung von Zusammenhängen zwischen Artvorkommen und Umweltvariablen bzw. der Darstellung von Korrelationen der Variablen untereinander (LEYER u. WESCHE 2007).

### 9.2.3 Darstellung und Anwendung der Ergebnisse

Eine positive Abweichung von dem normierten Erwartungswert von mindestens 0,5 wird hier als Beleg für einen Zusammenhang zwischen dem Vorkommen einer Pflanzenart und der Messwertklasse einer bodenchemischen Kenngröße interpretiert. Für die meisten der insgesamt 113 berücksichtigten Arten ergeben sich dabei ökologisch gut interpretierbare Muster ihres Auftretens bzw. Fehlens im Bereich bestimmter Messwertklassen (s. Abb. 138). Diese Muster wurden anschließend in ein sogenanntes Trennartenschema (s. Tab. 28) übertragen, das den Bereich des Vorkommens der an den BZE-Punkten gefundenen Pflanzenarten für die unter-

suchten bodenchemischen Kenngrößen veranschaulicht. Die einzelnen Kästen decken einen oder mehrere Pufferbereiche ab, in denen die in ihnen aufgeführten Pflanzenarten nach den Ergebnissen der BZE II den Schwerpunkt ihres Vorkommens haben.

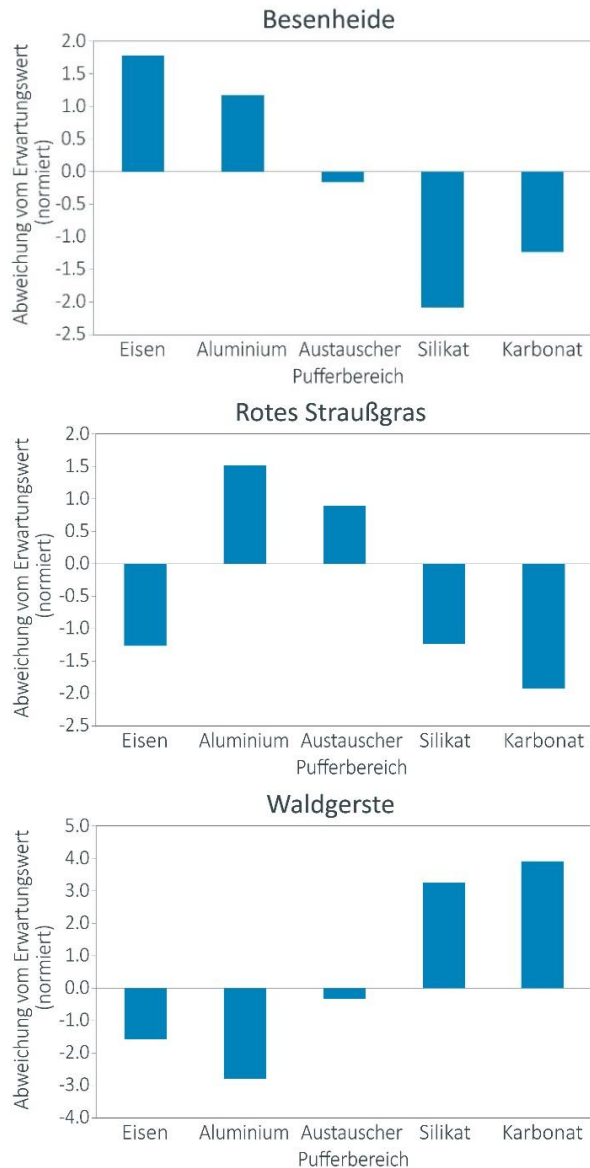


Abbildung 138: Graphische Darstellung der Abweichungen vom normierten Erwartungswert am Beispiel des Auftretens der Pflanzenarten Besenheide, Rotes Straußgras und Waldgerste in den verschiedenen Pufferbereichen

Die für die verschiedenen bodenchemischen Kenngrößen abgeleiteten Trennartenschemata können in der Forstlichen Standortskartierung Anwendung finden, indem die Trennarten(-gruppen) als Indikatoren für bestimmte bodenchemische Eigenschaften herangezogen werden. Dabei reicht in der Regel das Auftreten einer einzelnen Zeigerart für die Zuordnung des zu kartierenden Standorts zu einem bodenchemischen Kennwertbereich nicht aus. Vielmehr steigt die Aussagekraft mit zunehmender Anzahl der vorgefundenen Trenn- oder Zeigerarten. Um die Indikatoreigenschaften der Waldgefäßpflanzen und -moose im Rahmen eines Kartierverfahrens für die belastbare Ansprache eines bodenchemischen Kennwertbereichs nutzen zu können, ist eine möglichst große Zahl von Indikatorarten notwendig. Zusätzlich gibt auch das Fehlen anderer Arten(-gruppen) wichtige Hinweise. Den Bezugsraum der Ergebnisse bilden in erster Linie die Bundesländer Niedersachsen, Bremen, Hessen und Sachsen-Anhalt. Darüber hinaus können die Ergebnisse auch in angrenzenden Gebieten mit ähnlichen klimatischen und bodenökologischen Bedingungen Anwendung finden.

In das nachfolgende Trennartenschema (s. Tab. 28) wurden nur diejenigen Arten übernommen, für die sich ein ökologisch gut interpretierbares Muster ergibt. Dies gilt beispielsweise nicht für den Adlerfarn, dessen Schwerpunkt zwar eindeutig im Eisen-Pufferbereich liegt, der aber – möglicherweise bedingt durch Kalkungsmaßnahmen – auch im Silikat- und Carbonat-Pufferbereich eine positive Abweichung vom Erwartungswert zeigt.

*Tabelle 28: Beispiel eines Trennartenschemas für das Vorkommen der in Abbildung 138 dargestellten Pflanzenarten in verschiedenen Pufferbereichen*

| Pufferbereich |                  |              |            |           |
|---------------|------------------|--------------|------------|-----------|
| Eisen-        | Aluminium-       | Austauscher- | Silikat-   | Carbonat- |
| Besenheide    |                  |              |            |           |
|               | Rotes Straußgras |              |            |           |
|               |                  |              | Waldgerste |           |



## 9.3 Ergebnisse und Diskussion

### 9.3.1 $pH(H_2O)$

Der pH-Wert eines Bodens, auch als Bodenreaktion oder Säuregrad bezeichnet, ergibt sich aus der Wasserstoff-Ionen-Aktivität in der Bodenlösung. Er hat Einfluss auf zahlreiche chemische und biologische Prozesse im Boden und ist eine der wichtigsten bodenökologischen Kenngrößen, aus der sich viele für das Pflanzenwachstum bedeutsame Bodeneigenschaften, wie die Basen- und Nährstoffversorgung (Trophie) ableiten lassen (BLUME et al. 2010). So ergeben sich aus dem pH-Wert einerseits Hinweise auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen (z. B. Stickstoff, Magnesium oder Calcium) und andererseits auf toxisch wirkende Konzentrationen von Elementen wie Aluminium oder Mangan. Dementsprechend ist die Bindung vieler Pflanzenarten und Pflanzengesellschaften an bestimmte pH-Bereiche, auch als Pufferbereiche bezeichnet (ULRICH 1981), unter einheitlichen klimatischen Bedingungen sehr eng.

In der Forstlichen Standortskartierung geben Bodenmerkmale wie die Humusform (Mull, Moder, Rohhumus) oder Podsolierungserscheinungen (Bleichung im Oberboden infolge einer Versauerung) Hinweise auf den Pufferbereich, in dem sich ein Waldboden befindet (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Darüber hinaus können aber auch Pflanzenarten als Indikatoren für bestimmte pH-Bereiche dienen. Mit dem im Rahmen der Bodenzustandserhebung II erhobenen Vegetationsdatensatz liegt eine einzigartige Datengrundlage vor, aus der für die untersuchten Bundesländer das Vorkommen von Waldbodenpflanzen in bestimmten Pufferbereichen (pH-Wert gemessen in  $H_2O$  für 0–5 cm Bodentiefe) abgeleitet werden kann.

Bereits in der Hauptkomponentenanalyse (s. Abb. 139) wird deutlich, dass die wichtigste floristische Trennung entlang der ersten Achse (X-Achse) zwischen dem Eisen- und Aluminium-Pufferbereich auf der einen und dem Austauscher-, Silikat- und Carbonat-Pufferbereich auf der anderen Seite erfolgt. Diese relativ scharfe Grenze wird letztlich auch in dem Trennartenschema (s. Tab. 29) deutlich. Nur wenige Pflanzenarten kennzeichnen „grenzüberschreitend“ gleichzeitig den Aluminium- und den Austauscher-Pufferbereich.

Tabelle 29: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Pufferbereiche von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0–5 cm Bodentiefe)*

| Pufferbereich  |   |              |          |           |
|--|---|--------------|----------|-----------|
| Eisen-   | Aluminium-  | Austauscher- | Silikat- | Carbonat- |
| Gewelltes Gabelzahnmoos, Schwanenhals-Sternmoos, Zweizähni-<br>giges Kammkelchmoos   |   |              |          |           |
| Artengruppe Echte Brombeere, Besenförmiges Gabelzahnmoos, Besenheide, Breitblättriger Dornfarn, Drahtschmiele, Echtes Schlafmoos, Einseitwendiges Kleingabelzahnmoos, Europäischer Siebenstern, Faulbaum, Gewöhnlicher Dornfarn, Gewöhnliches Pfeifengras, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Grünstengelmoos, Hänge-Birke, Harzer Labkraut, Heidelbeere, Langgestrecktes Schnabelmoos, Rankender Lerchensporn, Rotstengelmoos, Späte Trauben-Kirsche, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos, Vogelbeere, Wald-Frauenhaar |   |              |          |           |
|  | Artengruppe Hain-Greiskraut, Flatter-Binse, Gewelltes Schiefbüchsenmoos, Gewöhnlicher Hohlzahn, Himbeere, Kleiner Sauerampfer, Pillen-Segge, Schmalblättriges Weidenröschen, Wald-Ehrenpreis, Wald-Geißblatt, Wald-Greiskraut, Wolliges Honiggras |              |          |           |

(Fortsetzung Tabelle 29)

| Pufferbereich |  |  |   |                                      |
|---------------|--|--|---|--------------------------------------|
| Eisen-        | Aluminium-   | Austauscher-   | Silikat-  | Carbonat-                            |
|               | Land-Reitgras, Roter Fingerhut, Roter Holunder, Rotes Straußgras, Salbei-Gamander, Wald-Reitgras |  |   |                                      |
|               |  | Behaarte Hainsimse, Bleiche Segge, Dreinervige Nabelmiere, Hasenfuß-Segge, Wald-Sauererklee, Weiches Honiggras, Weißliche Hainsimse  |   |                                      |
|               |  | Gewelltes Katharinenmoos, Gewöhnliche Brennnessel, Gewöhnliches Flattergras, Großes Springkraut, Knotige Braunwurz, Rasen-Schmiele, Wald-Frauenfarn, Wald-Schaumkraut, Winkel-Segge, Zwiebel-Zahnwurz  |   |                                      |
|               |  | Artengruppe Echte Goldnessel, Artengruppe Gewöhnlicher Wurmfarne, Artengruppe Knäuelgras, Berg-Ahorn, Busch-Windröschen, Einblütiges Perlgras, Gewöhnliche Esche, Gewöhnliches Scharbockskraut, Große Sternmiere, Hain-Rispengras, Kleines Springkraut, Schwarzer Holunder, Spitz-Ahorn, Vogel-Kirsche, Waldmeister, Wald-Segge, Wald-Veilchen, Wald-Ziest |   |                                      |
|               |  |  | Berg-Weidenröschen, Eichenfarn, Riesen-Schwengel  |                                      |
|               |  |  | Blut-Ampfer, Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnlicher Rainkohl, Gewöhnliches Hexenkraut, Gewöhnliches Rispengras, Kleinblütiges Weidenröschen, Krückenförmiges Kurzbüchsenmoos, Samt-Kurzbüchsenmoos, Stink-Storchnabel, Wald-Bingelkraut, Waldgerste, Wald-Zwenke, Zaun-Wicke |                                      |
|               |  |  |   | Gewöhnliche Hasel, Gewöhnlicher Efeu |

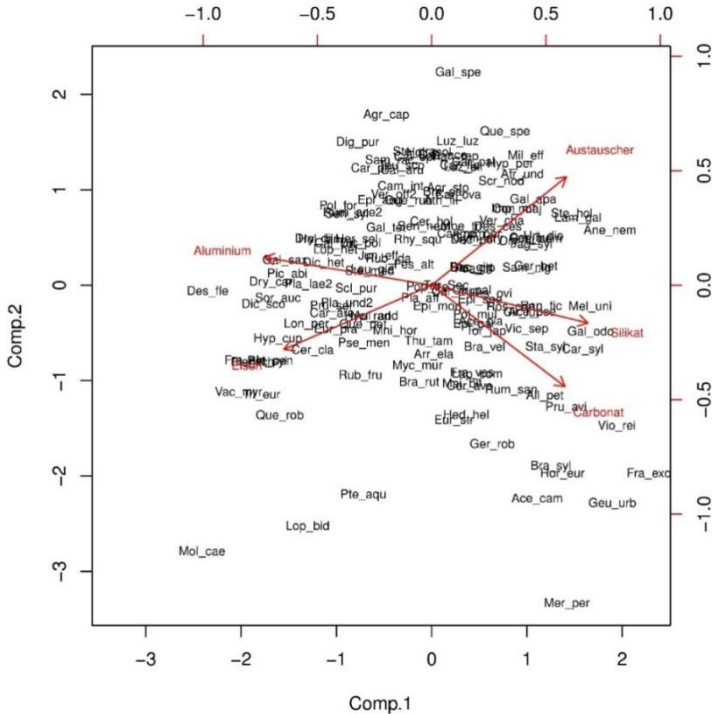


Abbildung 139: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und die fünf Pufferbereiche. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), zwischen dem Eisen- und Aluminium-Pufferbereich auf der einen und dem Silikat- und Carbonat-Pufferbereich auf der anderen Seite. Der Austauscher-Pufferbereich nimmt eine Zwischenstellung ein.

Die Grenze zwischen dem Aluminium- und dem Austauscher-Pufferbereich entspricht etwa der bodenökologischen Grenze zwischen den natürlichen Waldgesellschaften Hainsimsen-Buchenwald (Eisen- oder Aluminium-Pufferbereich) und Waldmeister-Buchenwald (Austauscher-Pufferbereich). Auf Böden mit höheren pH-Werten schließt sich ökologisch der Waldgersten-Buchenwald an, dessen kennzeichnende Arten ihren Schwerpunkt im Silikat- und/oder Carbonat-Pufferbereich haben.

### 9.3.2 Basensättigung

Als Basensättigung bezeichnet man den prozentualen Anteil der Summe der basischen Kationen Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium an der gesamten effektiven Kationenaustauschkapazität. Die Basensättigung ist somit eine wichtige Kenngröße in Bezug auf das Nährstoffangebot eines Waldbodens. Je höher der Anteil der basischen Kationen und je geringer der Anteil von Protonen und sauren Kationen (Aluminium, Eisen, Mangan), desto besser ist die Ernährung der Waldbäume. Voraussetzung ist allerdings die Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe durch eine ausreichende Bodenfeuchte. In der Forstlichen Standortkartierung wird die Basensättigung oft zusätzlich zum pH-Wert bestimmt, da bei pH-Werten unter 5 keine enge Beziehung zwischen Basensättigung und pH-Wert bestehen muss (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Auf vielen Standorten mit einer geringen Basensättigung sind in der Vergangenheit ein- oder mehrmalig Kalkungsmaßnahmen durchgeführt worden, durch die die Basensättigung erhöht wurde. Von den in die Auswertung einbezogenen BZE-Punkten sind insgesamt 48 % ein- oder mehrmalig gekalkt worden.

Bei der Auswertung der Vegetationsdaten der BZE II wurden in Orientierung an dem Bewertungsrahmen der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) zunächst sieben Klassen der Basensättigung in 0–5 cm Bodentiefe gebildet. In der Auswertung zeichnete sich jedoch eine Dreigliederung ab, bei der sich zwei große Trennartengruppen von Gefäßpflanzen und Moosen gegenüberstehen, von denen die eine bei Basensättigungen unter 30 % und die andere bei Werten über 70 % gehäuft auftritt (s. Abb. 140, Tab. 30). Dazwischen steht eine kleine Gruppe von Pflanzenarten, deren Vorkommensschwerpunkt bei Basensättigungswerten zwischen 30 und 50 % liegt. Dies spiegelt auch das Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse (s. Abb. 140) wider. Hier wird deutlich, dass sich im Bereich der niedrigen Werte unter 30 % und der hohen Werte über 70 % eine Trennung der einzelnen Klassen über Pflanzenarten nicht vornehmen lässt.

Tabelle 30: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Basensättigung [%] von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0–5 cm Bodentiefe)*

| Basensättigung [%] |  |   |  |         |         |          |
|--------------------|--|---|--|---------|---------|----------|
| 0–7                | > 7–20   | > 20–30   | > 30–50  | > 50–70 | > 70–85 | > 85–100 |
|                    | Besenheide, Gewelltes Gabelzahnmoos, Harzer Labkraut, Hasenfuß-Segge, Pillen-Segge, Roter Holunder, Rotstengelmoos, Schmalblättriges Weidenröschen, Sparriger Runzelpeter, Wald-Frauenhaar   |   |  |         |         |          |
|                    | Besenförmiges Gabelzahnmoos, Draht-Schmiele, Echtes Schlafmoos, Europäischer Siebenstern, Faulbaum, Flatter-Binse, Gewöhnlicher Dornfarn, Gewöhnliches Pfeifengras, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Hänge-Birke, Heidelbeere, Vogelbeere |   |  |         |         |          |
|                    | Einseitswendiges Kleingabelzahnmoos, Kleiner Sauerampfer   |   |  |         |         |          |
|                    | Breitblättriger Dornfarn, Land-Reitgras, Verschiedenblättriges Kammelchmoos  |   |  |         |         |          |
|                    | Späte Trauben-Kirsche  |   |  |         |         |          |
|                    |  | Grünstengelmoos, Behaarte Hainsimse                             |  |         |         |          |
|                    |  | Langgestrecktes Schönschnabelmoos, Himbeere, Wolliges Honiggras |  |         |         |          |
|                    |  |   | Gewöhnlicher Hohlzahn, Rankender Lerchensporn, Salbei-Gamander   |         |         |          |
|                    |  |   | Wald-Schaumkraut   |         |         |          |
|                    |  |   | Busch-Windröschen, Großes Springkraut, Stink-Storchschnabel, Wald-Segge, Wald-Zwenke, Zwiebel-Zahnwurz |         |         |          |

(Fortsetzung Tabelle 30)

| Basensättigung [%] |        |         |         |  |   |  |
|--------------------|--------|---------|---------|--|---|--|
| 0–7                | > 7–20 | > 20–30 | > 30–50 | > 50–70  | > 70–85   | > 85–100   |
|                    |        |         |         | Artengruppe Echte Goldnessel,<br>Artengruppe Gewöhnlicher<br>Wurmfarn, Einblütiges Perlgras,<br>Gewöhnliche Brennessel, Ge-<br>wöhnliche Esche, Gewöhnliche<br>Nelkenwurz, Gewöhnliches Flatter-<br>gras, Gewöhnliches Hexen-<br>kraut, Kleines Springkraut, Klet-<br>ten-Labkraut, Riesen-Schwengel,<br>Waldmeister, Wald-Ziest, Zaun-<br>Wicke |   |  |
|                    |        |         |         | Gewelltes Katha-<br>rinenmoos, Große<br>Sternmiere   |   |  |
|                    |        |         |         |  | Blut-Ampfer, Gewöhnli-<br>che Knoblauchsrauke,<br>Gewöhnliches Rispen-<br>gras, Kleinblütiges Wei-<br>denröschen, Vogel-Kir-<br>sche, Waldgerste, Wald-<br>Veilchen |  |
|                    |        |         |         |  |   | Berg-Ahorn,<br>Samt-Kurz-<br>büchsenmoos,<br>Spitz-Ahorn,<br>Wald-Bingel-<br>kraut |

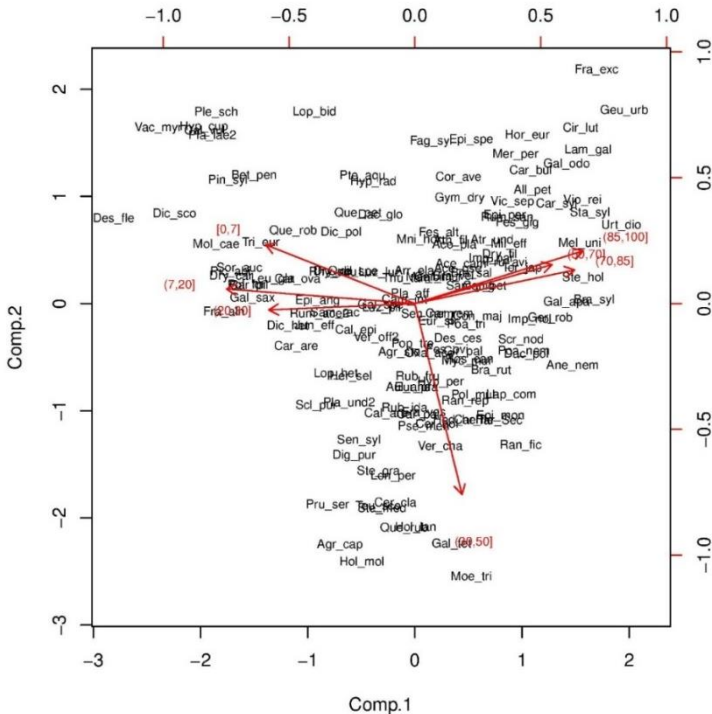


Abbildung 140: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und sieben Klassen der Basensättigung. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), auf der sich die Klassen unter 30 % (sehr gering und gering) und über 50 % Basensättigung (mittel hoch bis sehr hoch) gegenüberstehen.

Im Rahmen der Auswertung der Bodenzustandserhebung II erfolgte für Niedersachsen, Bremen, Hessen und Sachsen-Anhalt eine Zusammenfassung von Standorten mit ähnlicher Merkmalsausprägung im Mineralboden zu insgesamt 17 Substratgruppen. Es zeigte sich, dass ein Teil dieser Substratgruppen in Bezug auf die Basensättigung (hier berechnet bis 90 cm Bodentiefe) eine relativ enge Amplitude aufweist. So liegt die Basensättigung der Substratgruppen Quarzit, Granit, Buntsandstein (sandig), unverlehmte Sande und organisch geprägte Standorte überwiegend bei Werten unter 30 %, während in den Substratgruppen Lehm, Ton(stein), Basalt/Diabas, Kalk und Zechstein überwiegend Werte oberhalb von 50 % gemessen werden. Die Substratgruppe der verlehnten Sande weist überwiegend eine Basensättigung zwischen 30 und 50 % auf (EVERS et al. 2013b).



### 9.3.3 C/N-Verhältnis

Das Verhältnis von Kohlenstoff (C) zu Stickstoff (N) gibt wichtige Hinweise auf die Umsetzungsbedingungen in Böden und ihr Stickstoffangebot. Je enger das C/N-Verhältnis eines Bodens ist, desto besser ist die Stickstoffversorgung der in ihm wurzelnden Pflanzen. Neben den natürlichen Ausgangsbedingungen eines Waldbodens (Geologie, Klima, Exposition, Hangneigung usw.) beeinflussen menschliche Aktivitäten das Stickstoffangebot. Während in der Vergangenheit ein Stickstoffentzug durch Streunutzung besonders in siedlungsnahen Wäldern teilweise zu Stickstoffmangel führte, können heute Stickstoffeinträge aus der Luft (Verbrennungsprozesse und Landwirtschaft) eine Stickstoffübersättigung von Waldböden bewirken. Auch die Baumartenwahl hat Einfluss auf das Stickstoffangebot von Böden (ELLENBERG 1977). Die Hauptkomponentenanalyse zeigt hier, dass unter einem C/N-Verhältnis von 16 und über einem C/N-Verhältnis von 21 eine Trennung der Klassen nach dem Auftreten von Pflanzenarten kaum möglich ist (s. Abb. 141, Tab. 31).

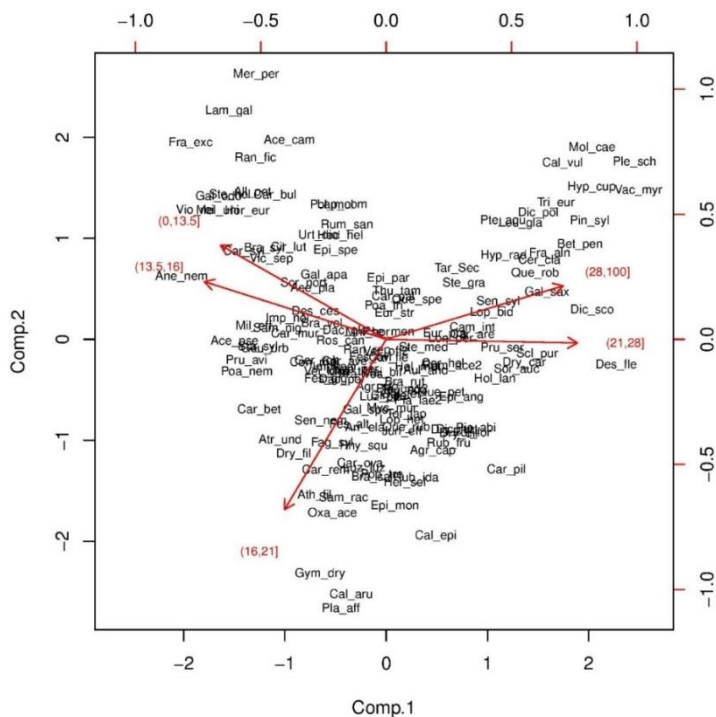


Abbildung 141: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und fünf Klassen des C/N-Verhältnisses. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), auf der sich die Klassen unter 16 und über 21 gegenüberstehen. Unter einem C/N-Verhältnis von 16 und über einem C/N-Verhältnis von 21 ist eine Trennung der Klassen nach dem Auftreten von Pflanzenarten kaum möglich.

*Tabelle 31: Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache des C/N-Verhältnisses von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0–5 cm Bodentiefe). Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit allen weiteren Trennartenschemata erfolgt die Darstellung hier in der Reihenfolge absteigender C/N-Werteklassen.*

| C/N-Verhältnis |   |   |           |        |
|----------------|---|---|-----------|--------|
| > 28–100       | > 21–28   | > 16–21   | > 13,5–16 | 0–13,5 |
|                | Adlerfarn, Besenförmiges Gabelzahnmoos, Besenheide, Draht-Schmiele, Echtes Schlafmoos, Europäischer Siebenstern, Faulbaum, Gewelltes Gabelzahnmoos, Gewöhnlicher Dornfarn, Gewöhnliches Pfeifengras, Grünstengelmoos, Hänge-Birke, Harzer Labkraut, Heidelbeere, Rankender Lerchensporn, Rotstengelmoos, Schmalblättriges Weidenröschen, Späte Trauben-Kirsche, Vogelbeere, Wald-Greiskraut, Wolliges Honiggras, Zweizähliges Kammkelchmoos |   |           |        |
|                | Einseitswendiges Kleingabelzahnmoos, Wald-Frauenhaar  |   |           |        |
|                | Artengruppe Echte Brombeere, Berg-Weidenröschen, Breitblättriger Dornfarn, Land-Reitgras, Pillen-Segge, Rotes Straußgras  |   |           |        |
|                |   | Eichenfarn, Flatterbinse, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Himbeere, Roter Holunder, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos, Wald-Reitgras                                |           |        |
|                |   | Behaarte Hainsimse, Dreinervige Nabelmiere, Gewelltes Katharinenmoos, Gewöhnliche Hasel, Stink-Storchschnabel, Wald-Frauenfarn, Wald-Sauerklee, Weißliche Hainsimse |           |        |

(Fortsetzung Tabelle 31)

| C/N-Verhältnis |         |  |  |                        |
|----------------|---------|--|--|------------------------|
| > 28–100       | > 21–28 | > 16–21  | > 13,5–16  | 0–13,5                 |
|                |         | Artengruppe Gewöhnlicher Wurmfarne, Artengruppe Knäuelgras, Berg-Ahorn, Busch-Windröschen, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnliches Flattergras, Hainbuche, Artengruppe Hain-Greiskraut, Hain-Rispengras, Kleines Springkraut, Schwarzer Holunder, Vogel-Kirsche, Wald-Ziest |  |                        |
|                |         |  | Bleiche Segge  |                        |
|                |         |  | Artengruppe Echte Goldnessel, Blut-Ampfer, Einblütiges Perlgras, Gewöhnliche Brennnessel, Gewöhnliche Esche, Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Gewöhnlicher Efeu, Gewöhnlicher Rainskohl, Gewöhnliches Hexenkraut, Gewöhnliches Scharbockskraut, Große Sternmiere, Großes Springkraut, Kletten-Labkraut, Knotige Braunwurz, Rasen-Schmiele, Samt-Kurzbüchsenmoos, Vielblütige Weißwurz, Wald-Bingelkraut, Waldgerste, Waldmeister, Wald-Segge, Wald-Veilchen, Wald-Zwenke, Zaun-Wicke, Zwiebel-Zahnwurz |                        |
|                |         |  |  | Schwanenhals-Sternmoos |

### 9.3.4 Basische Kationen (Ca, Mg, K)

Die basischen Kationen Calcium (Ca), Magnesium (Mg) und Kalium (K) sind wichtige Pflanzennährstoffe. Ihr Vorrat in Waldböden variiert – wie die Basensättigung – sehr stark in den einzelnen Substratgruppen. So wurden im Rahmen der BZE II allgemein in den Substratgruppen Basalt/Diabas, Lehm, Lösslehm, Kalk, Ton(stein) und Zechstein relativ hohe Vorräte basischer Kationen nachgewiesen. Dabei zeichnen sich Basalt/Diabas- und Kalk-Standorte eher durch mittlere Kaliumvorräte aus. Die Substratgruppen mit geringer Basensättigung (Quarzit, Granit, Buntsandstein (sandig), unverlehmte Sande und organisch geprägte Standorte) weisen auch geringe Vorräte basischer Kationen auf (EVERS et al. 2013b). Durch Säureeinträge können basische Kationen von den Austauschern verdrängt und anschließend ausgewaschen werden.

#### 9.3.4.1 Calcium

Während bei Calciumvorräten unterhalb von 400 kg/ha (Bezug: Mineralbodentiefe in 0–5 cm) eine Trennung der gebildeten Werteklassen über Trennarten gut möglich ist, ist eine Differenzierung oberhalb von 400 kg/ha schwierig (s. Abb. 142, Tab. 32).

Tabelle 32: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Calciumvorräte [kg/ha] von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0–5 cm Bodentiefe)*

| Calciumvorrat [kg/ha]   |  |           |           |             |         |
|---|--|-----------|-----------|-------------|---------|
| 0–100   | > 100–200  | > 200–400 | > 400–800 | > 800–1.500 | > 1.500 |
| Besenförmiges Gabelzahnmoos, Besenheide, Echtes Schlafmoos, Einseitswendiges Kleingabelzahnmoos, Europäischer Siebenstern, Faulbaum, Gewelltes Gabelzahnmoos, Gewelltes Schiefbüchsenmoos, Gewöhnlicher Dornfarn, Gewöhnliches Pfeifengras, Hänge-Birke, Harzer Labkraut, Kleiner Sauerampfer, Rotstengelmoos, Schmalblättriges Weidenröschen, Vogelbeere |  |           |           |             |         |
| Draht-Schmiele, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Grünstengelmoos, Heidelbeere, Pillen-Segge, Sparriger Runzelpeter, Späte Trauben-Kirsche, Wald-Frauenhaar, Weiches Honiggras, Zweizähntiges Kammkelchmoos   |  |           |           |             |         |
| Rotes Straußgras, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos   |  |           |           |             |         |
|   | Bleiche Segge, Roter Holunder  |           |           |             |         |
|   | Roter Fingerhut, Weißliche Hainsimse, Wolliges Honiggras                 |           |           |             |         |
|   | Gewöhnlicher Hohlzahn, Wald-Frauenfarn, Wald-Sauerklee, Wald-Schaumkraut |           |           |             |         |
|   | Gewelltes Katharinenmoos, Winkel-Segge                                   |           |           |             |         |

(Fortsetzung Tabelle 32)

| Calciumvorrat [kg/ha] |           |  |  |  |                   |
|-----------------------|-----------|--|--|--|-------------------|
| 0–100                 | > 100–200 | > 200–400  | > 400–800  | > 800–1.500  | > 1.500           |
|                       |           | Himbeere   |  |  |                   |
|                       |           | Artengruppe Hain-Greiskraut, Dreinervige Nabelmiere, Eichenfarn  |  |  |                   |
|                       |           | Artengruppe Gewöhnlicher Wurmfarne, Artengruppe Knäuelgras, Busch-Windröschen, Gewöhnliche Brennessel, Gewöhnliches Flattergras, Gewöhnliches Scharbockskraut, Großes Springkraut, Kletten-Labkraut, Riesenschwingel, Stink-Storchschnabel |  |  |                   |
|                       |           |  | Knotige Braunwurz  |  |                   |
|                       |           |  | Artengruppe Echte Goldnessel, Berg-Ahorn, Blut-Ampfer, Einblütiges Perlgras, Gewöhnliche Esche, Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnlicher Rainkohl, Große Sternmiere, Hainbuche, Hain-Rispengras, Kleinblütiges Weidenröschen, Schwarzer Holunder, Waldmeister, Wald-Segge, Wald-veilchen, Wald-Zwenke, Zaun-Wicke, Zwiebel-Zahnwurz |  |                   |
|                       |           |  |  | Spitz-Ahorn, Vogel-Kirsche, Wald-Bingelkraut, Waldgerste |                   |
|                       |           |  |  |  | Gewöhnliche Hasel |



### 9.3.4.2 Magnesium

Beim Magnesium ist eine ausgeprägte Dreigliederung bereits in der Hauptkomponentenanalyse (s. Abb. 143) erkennbar. Deutlich floristisch voneinander differenziert sind die Klassen 0–20, > 20–40 kg/ha sowie die vier untereinander nicht trennbaren Klassen > 40 kg/ha. Dies spiegelt sich auch in dem Trennartenschema (s. Tab. 33) wider.

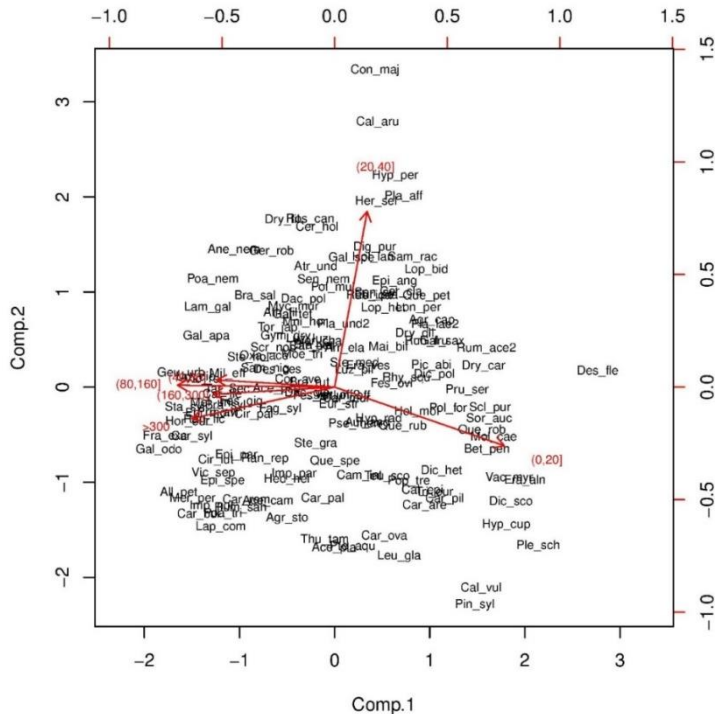


Abbildung 143: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und sechs Klassen des Magnesiumvorrats. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), auf der sich die Klassen unter 20 und über 40 kg/ha gegenüberstehen. Über einem Magnesiumvorrat von 40 kg/ha ist eine Trennung der Klassen nach dem Auftreten von Pflanzenarten kaum möglich.

Tabelle 33: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Magnesiumvorräte [kg/ha] von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0–5 cm Bodentiefe)*

| Magnesiumvorrat [kg/ha]   |  |         |          |           |       |
|---|--|---------|----------|-----------|-------|
| 0–20  | > 20–40  | > 40–80 | > 80–160 | > 160–300 | > 300 |
| Besenförmiges Gabelzahnmoos, Besenheide, Echtes Schlafmoos, Einseitswendiges Kleingabelzahnmoos, Europäischer Siebenstern, Faulbaum, Gewelltes Gabelzahnmoos, Gewöhnliches Pfeifengras, Grünstengelmoos, Hänge-Birke, Hasenfuß-Segge, Heidelbeere, Land-Reitgras, Pillen-Segge, Rotstengelmoos, Salbei-Gamander, Sparriger Runzelpeter, Späte Trauben-Kirsche, Vogelbeere, Wald-Frauenhaar, Weiches Honiggras |  |         |          |           |       |
| Artengruppe Echte Brombeere, Breitblättriger Dornfarn, Draht-Schmiele, Gewöhnlicher Dornfarn, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Harzer Labkraut, Kleiner Sauerampfer, Roter Holunder, Wald-Geißblatt, Zweizähniges Kammkelchmoos  |  |         |          |           |       |
| Rotes Straußgras  |  |         |          |           |       |
|   | Rankender Lerchensporn, Wald-Greiskraut, Wald-reitgras                             |         |          |           |       |
|   | Himbeere, Roter Fingerhut, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos, Wolliges Honiggras |         |          |           |       |
|   | Gewelltes Katharinenmoos   |         |          |           |       |
|   | Busch-Windröschen, Wald-Frauenfarn   |         |          |           |       |
|   | Artengruppe Knäuelgras, Hain-Rispengras  |         |          |           |       |



(Fortsetzung Tabelle 33)

| Magnesiumvorrat [kg/ha] |         |   |   |                   |       |
|-------------------------|---------|---|---|-------------------|-------|
| 0–20                    | > 20–40 | > 40–80   | > 80–160  | > 160–300         | > 300 |
|                         |         | Gewöhnlicher Efeu,<br>Weißliche Hainsimse   |   |                   |       |
|                         |         | Berg-Weidenröschen, Wald-Sauerklee,<br>Winkel-Segge   |   |                   |       |
|                         |         | Einblütiges Perlgras, Gewöhnliche Brennnessel, Gewöhnliche Esche, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnliches Flattergras, Gewöhnliches Hexenkraut, Klettenlabkraut, Schwarzer Holunder, Vogel-Kirsche, Wald-Bingelkraut, Waldmeister, Wald-Segge, Wald-Zwenke, Zwiebel-Zahnwurz |   |                   |       |
|                         |         |   | Berg-Ahorn  |                   |       |
|                         |         |   | Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Riesenschwingel, Gewöhnliches Scharbockskraut, Wald-Ziest, Waldgerste, Wald-Weilchen |                   |       |
|                         |         |   |   | Gewöhnliche Hasel |       |

### 9.3.4.3 Kalium

Auch beim Kalium ist eine Dreigliederung der Wertebereiche 0–20, > 20–40 und > 40 kg/ha erkennbar (s. Abb. 144). Anders als beim Magnesium ist jedoch die Differenzierung oberhalb von 40 kg/ha etwas deutlicher und es stehen einige Trennarten zur Verfügung (s. Tab. 34).

Tabelle 34: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Kaliumvorräte [kg/ha] von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0–5 cm Bodentiefe)*

| Kaliumvorrat [kg/ha]  |   |         |         |          |       |
|---|---|---------|---------|----------|-------|
| 0–20  | > 20–40   | > 40–60 | > 60–80 | > 80–120 | > 120 |
| Besenförmiges Gabelzahnmoos, Besenheide, Einseitwendiges Kleingabelzahnmoos, Europäischer Siebenstern, Gewelltes Gabelzahnmoos, Gewelltes Schiefbüchsenmoos, Hänge-Birke, Harzer Labkraut, Rankender Lerchensporn, Rotstengelmoos, Sparriger Ruzelpeter, Späte Trauben-Kirsche, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos, Wald-Greiskraut, Wolliges Honiggras, Zweizähni-<br>ges Kammkelchmoos |   |         |         |          |       |
| Berg-Weidenröschen, Breitblättriger Dornfarn, Draht-Schmiele, Echtes Schlafmoos, Faulbaum, Gewöhnliches Pfeifengras, Grünstengelmoos, Heidelbeere, Himbeere, Pillen-Segge, Roter Fingerhut, Schmalblättriges Weidenröschen, Vogelbeere, Wald-Frauenhaar   |   |         |         |          |       |
|   | Artengruppe Echte Brombeere, Bleiche Segge, Gewöhnlicher Dornfarn, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Krü-<br>ckenförmiges Kurz-<br>büchsenmoos,<br>Land-Reitgras, Ro-<br>tes Straußgras,<br>Wald-Ehrenpreis |         |         |          |       |
|   | Weiches Honiggras   |         |         |          |       |
|   | Kleines Springkraut, Wald-Sauerklee   |         |         |          |       |
|   | Artengruppe Gewöhnlicher Wurm-<br>farn, Gewöhnlicher Efeu   |         |         |          |       |
|   | Berg-Ahorn  |         |         |          |       |

(Fortsetzung Tabelle 34)

| Kaliumvorrat [kg/ha] |         |  |         |   |       |
|----------------------|---------|--|---------|---|-------|
| 0–20                 | > 20–40 | > 40–60  | > 60–80 | > 80–120  | > 120 |
|                      |         | Eichenfarn   |         |   |       |
|                      |         | Gewelltes Katharinenmoos, Gewöhnlicher Hohlzahn, Winkel-Segge  |         |   |       |
|                      |         | Große Sternmiere, Knotige Braunwurz  |         |   |       |
|                      |         | Artengruppe Knäuelgras, Blut-Ampfer, Busch-Windröschen, Einblütiges Perlgras, Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnliches Flattergras, Gewöhnliches Hexenkraut, Gewöhnliches Scharbockskraut, Hain-Rispengras, Schwarzer Holunder, Waldgerste, Waldmeister, Wald-Segge, Wald-Ziest |         |   |       |
|                      |         | Artengruppe Echte Goldnessel, Gewöhnliche Brennnessel, Kletten-Labkraut, Vogel-Kirsche, Wald-Veilchen, Wald-Zwenke, Zaun-Wicke, Zwiebel-Zahnwurz   |         |   |       |
|                      |         |  |         | Artengruppe Hain-Greiskraut, Roter Holunder, Vielblütige Weißwurz |       |
|                      |         |  |         | Gewöhnliche Hasel, Wald-Bingelkraut                               |       |

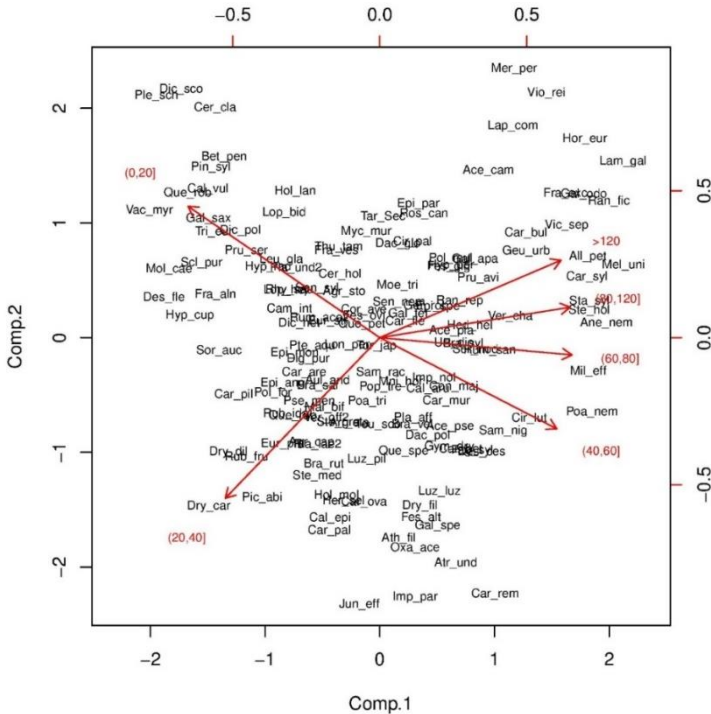


Abbildung 144: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und sechs Klassen des Kaliumvorrats. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), auf der sich die Klassen unter 20 und über 40 kg/ha gegenüberstehen. Eine Differenzierung oberhalb von 40 kg/ha erscheint nicht als sinnvoll.

### 9.3.5 Ansprache der Nährstoffversorgung mithilfe von Indikatorarten

Für eine Zuordnung der Nährstoffversorgung von Waldböden zu den drei Stufen „arm“, „mittel“ und „reich“ mithilfe von weit verbreiteten Gefäßpflanzen- oder Moosarten kann das nachfolgende zusammenfassende Schema (s. Tab. 35) dienen. In dieses Schema sind insgesamt 83 Pflanzenarten eingegangen, die im Hinblick auf mindestens zwei der Kenngrößen pH-Wert (Pufferbereich), Basensättigung und C/N-Wert übereinstimmend interpretierbare Vorkommensschwerpunkte zeigen. Die Reaktionsmuster der Pflanzenarten auf die Vorräte der basischen Kationen (Ca, Mg, Ka) wurden hier nicht berücksichtigt, da die Basensättigung in diesem Zusammenhang als belastbarere Größe erschien. Während sich die Stufen „arm“ und „reich“ jeweils durch größere Trennartengruppen auszeichnen, ist die Stufe „mittel“ nicht durch eigene Arten, sondern durch das Fehlen der benachbarten Artengruppen sowie die Überschneidung der für die Stufen „arm bis mittel“ und „mittel bis reich“ charakteristischen Arten gekennzeichnet.

Beim Gebrauch des Schemas ergeben sich einige grundsätzliche Unterschiede zu dem in der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) beschriebenen und bisher üblichen Verfahren der Anwendung ökologischer Artengruppen. Die Ergebnisse der BZE II ermöglichen es, dieses Verfahren weiterzuentwickeln und ökologische Artengruppen auf zahlenmäßiger Basis bodenchemischen Kenngrößen zuzuordnen. So sind die in Tabelle 35 aufgeführten Arten durchweg weit verbreitete Gefäßpflanzen- und Moossippen, deren Verhalten gegenüber verschiedenen bodenchemischen Zuständen durch Messwerte untermauert ist. Dagegen listet die Forstliche Standortaufnahme neben weit verbreiteten auch viele sehr seltene Arten auf und die Zuordnung der Sippen zu ökologischen Artengruppen beruht in der Regel auf Erfahrungswissen. Den Bezugsraum der Ergebnisse (s. Tab. 35) bilden in erster Linie die Bundesländer Niedersachsen, Bremen, Hessen und Sachsen-Anhalt und damit den geographischen Raum, aus dem die Vegetationsaufnahmen und bodenchemischen Messwerte stammen. Dies bietet gegenüber den in der Forstlichen Standortaufnahme enthaltenen, bundesweit gültigen Artengruppen den Vorteil einer höheren Passgenauigkeit für Nordwestdeutschland. Schließlich liegt noch ein erheblicher Unterschied darin, dass die in der Forstlichen Standortaufnahme in der Regel vorgenommene Festlegung der Arten auf je eine Wasserhaushaltsstufe und eine Humusform zu einer starken Einengung ihrer ökologischen Amplitude führen muss, die dem tatsächlichen Verhalten der Pflanzenarten häufig nicht gerecht werden kann. So ist in der Forstlichen Standortaufnahme beispielsweise die Besenheide der Wasserhaushaltsstufe I (Schwergewicht auf trockenen und/oder warmen Standorten) zugeordnet, während sie tatsächlich hinsichtlich des Wasserhaushalts indifferent ist (vgl. ELLENBERG et al. 2001). Ein weiteres Beispiel ist die Heidelbeere, die nach der Forstlichen Standortaufnahme der Wasserhaushaltsstufe II (Schwergewicht auf mäßig trockenen bis mäßig frischen Standorten) angehört. Auch die Heidelbeere ist in Bezug auf den Wasserhaushalt indifferent (vgl. ELLENBERG et al. 2001). Aufgrund dieser und vieler ähnlicher Fälle wird in dem nachfolgenden Schema (s. Tab. 35) auf eine Differenzierung nach dem Wasserhaushalt verzichtet.

Tabelle 35: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Nährstoffversorgung von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0–5 cm Bodentiefe)*

| arm  | mittel   | reich   |
|--|--|---|
| Besenförmiges Gabelzahnmoos, Besenheide, Draht-Schmiele, Echtes Schlafmoos, Europäischer Siebenstern, Faulbaum, Gewelltes Gabelzahnmoos, Gewöhnlicher Dornfarn, Gewöhnliches Pfeifengras, Grünstengelmoos, Hänge-Birke, Harzer Labkraut, Heidelbeere, Rotstengelmoos, Schmalblättriges Weidenröschen, Vogelbeere, Wald-Greiskraut, Zweizähniiges Kammkelchmoos |  |   |
|  | Breitblättriger Dornfarn, Einseitswendiges Kleingabelzahnmoos, Flatter-Binse, Gewöhnlicher Holzzahn, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Hasenfuß-Segge, Himbeere, Kleiner Sauerampfer, Land-Reitgras, Langgestrecktes Schönschnabelmoos, Pillen-Segge, Roter Holunder, Rotes Straußgras, Salbei-Gamander, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos, Wald-Frauenhaar, Wald-Reitgras   |   |
|  | <p>Artengruppe Echte Goldnessel, Artengruppe Gewöhnlicher Wurmfarn, Artengruppe Knäuelgras, Berg-Ahorn, Bleiche Segge, Busch-Windröschen, Dreinervige Nabelmiere, Eichenfarn, Einblütiges Perlgras, Gewelltes Katharinenmoos, Gewöhnliche Brennessel, Gewöhnliche Esche, Gewöhnliche Hasel, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnliches Flattergras, Gewöhnliches Scharbockskraut, Große Sternmiere, Großes Springkraut, Hain-Rispengras, Kleines Springkraut, Knotige Braunwurz, Rasen-Schmiele, Schwarzer Holunder, Spitz-Ahorn, Stink-Storchschnabel, Vogel-Kirsche, Wald-Frauenfarn, Waldmeister, Wald-Sauerklee, Wald-Schaumkraut, Wald-Segge, Wald-Veilchen, Wald-Ziest, Wald-Zwenke, Weißliche Hainsimse, Zwiebel-Zahnwurz</p> |   |
|  |  | Blut-Ampfer, Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Gewöhnlicher Efeu, Gewöhnlicher Rainkohl, Gewöhnliches Hexenkraut, Gewöhnliches Rispengras, Kleinblütiges Weidenröschen, Riesen-Schwengel, Samt-Kurzbüchsenmoos, Wald-Bingelkraut, Waldgerste, Zaun-Wicke |

Folgende Wertebereiche liegen den Stufen zugrunde:

|                  |  |   |
|------------------|--|---|
| arm              | = Eisen- bis Aluminium-Pufferbereich,      | Basensättigung = 0-30 %, C/N = > 21–100 |
| arm bis mittel   | = Eisen- bis Austauscher-Pufferbereich,    | Basensättigung = 0-50 %, C/N = > 16–100 |
| mittel bis reich | = Austauscher- bis Carbonat-Pufferbereich, | Basensättigung = > 30 %, C/N = 0–21     |
| reich            | = Silikat- bis Carbonat-Pufferbereich,     | Basensättigung = > 50 %, C/N = 0–16     |

## 10 Hauptergebnisse und Folgerungen für die forstliche Praxis

*Jan Evers, Inge Dammann, Bernd Abrends, Uwe Paar*

- 10.1 Wie repräsentativ sind die Bodenzustandserhebungen?  
Sind die Ergebnisse für die wichtigsten Bodensubstrate in den Wäldern aussagekräftig?

Vergleicht man die prozentuale Verteilung der Substratgruppen der BZE II-Punkte in Sachsen-Anhalt mit der Verteilung dieser Substratgruppen, zugewiesen auf die Legendeneinheiten der BÜK 1000 N von Sachsen-Anhalt (BGR 2007), so werden die wichtigsten Bodeneinheiten im Wald durch die BZE II gut repräsentiert. Auch die Verteilung der Trophiestufen aus der Forstlichen Standortskartierung für den Wald in Sachsen-Anhalt zeigt ein gut übereinstimmendes Muster mit der Verteilung aus der BZE II. Mit den zusätzlichen Informationen zur Nährstoffversorgung aus der Laboranalyse kann die Trophieeinschätzung an den BZE II-Punkten insgesamt jedoch deutlich feiner differenziert werden. Entsprechend weist die prozentuale Verteilung der Trophiestufen mit der Chemieeinstufung durch die BZE II einen deutlich höheren Anteil reicher (eutropher, +10 %-Punkte) und ziemlich armer Standorte (schwach mesotropher, +12 %) sowie geringere Anteile von kräftigen (gut mesotropher) Standorte (-12 %-Punkte) und mittlerer (mesotropher) Standorte (-19 %) aus. Die armen (oligotrophen) Standorte sind mit der Chemieeinstufung der BZE II nur noch zu 3 % vertreten, vorher hatten diese Standorte noch 7 % Anteile an dem kartierten Wald in Sachsen-Anhalt. Über den Nährstoff Calcium konnte diese Differenzierung beispielhaft gut belegt werden.

Aus dem Vergleich der Trophiestufen Standortskartierung versus BZE II zeigt sich, dass offensichtlich häufig mittlere Standorte in der Standortskartierung mit ihren Nährstoffvorräten überschätzt und bessere Standorte unterschätzt wurden. Die Einbeziehung der Bodenchemie in die Trophieeinschätzung ermöglicht grundsätzlich eine gesichere Differenzierung der Trophiestufen und damit eine sichere waldbauliche Beurteilung forstlicher Standorte. Insbesondere der höhere Anteil mesotropher Standorte nach der digitalen Standortskarte differenziert sich unter Einbeziehung bodenchemischer Kenngrößen deutlich feiner, was in der BZE II zu einer Umverteilung von mesotrophen zu schwach mesotrophen Standorten führt. Die Absicherung, Überprüfung und Korrektur der Geländeeinschätzung in der Standortskartierung durch bodenchemische Untersuchungen erweist sich damit als sehr sinnvoll, was auch durch die höheren Anteile eutropher Standorte bei der BZE II im Vergleich zur Standortskartierung gut erkennbar wird.

Im Gegensatz zur Standortskartierung stellt die BZE jedoch weder flächenbezogene Informationen bereit, noch deckt die BZE alle vorkommenden Standortstypen ab. Die BZE bietet aber für die typischen Waldstandorte in Sachsen-Anhalt, wie

z. B. für den unverlehmtten Sand, den Lösslehm oder Tonschiefer, eine breite Palette an bodenchemischen und –physikalischen Informationen für die Beurteilung des Bodenzustandes und seiner Veränderungen.

Diese Informationen sind u. a. bedeutsam für die:

- Status und Veränderung der Versauerung in Waldböden
- Abschätzung des Kohlenstoffvorrats in Waldböden, differenziert nach organischer Auflage und Mineralboden
- Herleitung potenziell kalkungsbedürftiger Standortstypen
- Darstellung der Nährstoffdynamik in Waldböden als Grundlage für eine Bewertung der Nachhaltigkeit
- Darstellung und Bewertung von Maßnahmen des Bodenschutzes in Sachsen-Anhalt
- Verbesserte Bewertung und Abschätzung des Geländewasserhaushaltes

## 10.2 Welche Waldböden können unterschieden werden?

### 10.2.1 *Geologie, Boden und Bodenentwicklung*

Der Wald in Sachsen-Anhalt wächst auf Böden, deren Vielfalt durch verschiedene geologische Ausgangsgesteine, Umlagerungen und Bodenentwicklungen, Spuren historischer Waldnutzungen und jüngerer Bodenbearbeitungen sowie Folgen v. a. der atmosphärischen Säure- und Stickstoffeinträge sowie Flugascheeinträge geprägt ist.

Großflächig wird zwischen dem mit eiszeitlichen Ablagerungen bedeckten Tiefland im Norden und Nordosten, dem Löss geprägten zentralen Hügelland und dem Bergland Harz und Kyffhäuser mit den Festgesteinen des Erdaltertums unterschieden. Die meisten Waldstandorte liegen im Tiefland mit 70 % der Waldfläche, gefolgt vom Mittelgebirge mit 19 % und dem Hügelland mit 11 %.

Das *Tiefland* wird von glazialen und fluvioglazialen Ablagerungen der letzten Eiszeiten geprägt, vor allem der Warthevereisung. Dies sind intensiv verwitterte, eher nährstoffarme Grund- und Endmoränen, Sander und Talsande mit hohen Sandanteilen. Als Bodentypen herrschen tief entkalkte Sand-Braunerden, Tieflehm-Fahlerden mittlerer Nährstoffversorgung und ärmere Sand-Podsole vor. Auf den Grundmoränenplatten kommen auch Lehm- und Tieflehm-Staugleye vor. Holozäne Auen der Talniederungen begleiten den Lauf der Elbe und ihrer Nebenflüsse. Vor allem im Raum Bitterfeld und Dübener Heide hat der ehemalige Braunkohleabbau und der damit einhergehende Flugascheeintrag durch Verbrennung der Kohle in Kraftwerken, Industrie und Haushalten die Böden stark beeinflusst.

Das *Hügelland* als Teil des mitteleuropäischen Lössgürtels wird überwiegend landwirtschaftlich genutzt. Je nach Lössmächtigkeit und Klimaeinfluss bildeten sich



Fahlerden, Parabraunerden und Schwarzerden aus. Es gibt aber auch Sandstein-Podssole, Rendzinen, gleyartige Schwemmböden und Auen. Die Waldstandorte sind überwiegend gut mit Nährstoffen versorgt.

Die Standortsregion *Mittelgebirge* mit den Wuchsgebieten Harz und Kyffhäuser hebt sich deutlich vom Hügelland ab. Der sachsen-anhaltische *Harz* ist von silurischen, devonischen und karbonischen Tonschiefern mit eingelagerten Grauwacken sowie Diabasen und Kieselschiefer geprägt. Zungenartig sind Lössdecken in den flachen Tälern des Osthazes eingelagert. Die Böden im Harz sind stark durch periglaziale Umlagerungsprozesse beeinflusst. Es überwiegen Gesteinsbraunerden mit mittlerer und kräftiger Nährstoffversorgung, es kommen aber ebenso podsolige Braunerden, Podsole und Ranker mit geringerer Nährkraft hinzu. In verdichteten Wannen sind kleinflächige Quell- und Hochmoore sowie Stauleye und Humusstauleye ausgebildet. Auf Löss am Harzrand sind Fahlerden verbreitet. Das *Kyffhäusergebirge* wird von Gesteinen aus dem Oberkarbon wie Sandsteinen, grobkörnigen Konglomeraten und Schiefertönen gebildet, es herrschen mittlere bis kräftige lössbeeinflusste Gesteins-Braunerden vor. Am Westrand tritt Zechstein mit Kalk, Dolomit und Gips auf, hier bildeten sich Rendzinen und tonige Braunerden aus.

### 10.2.2 Substratgruppen

Das Ausgangsgestein der Bodenbildung bestimmt wesentlich die Zuordnung zu den Substratgruppen. Der unverlehmte Sand ist mit 51 % im BZE II-Kollektiv Sachsen-Anhalts das häufigste Ausgangssubstrat, gefolgt vom Lösslehm mit 11 %. Der unverlehmte Sand ist typisch für das Tiefland, der Lösslehm für das Hügelland. An dritter Stelle folgt der Tonschiefer mit 9 %, der in Sachsen-Anhalt nur im Harz vorkommt. Schwach verlehmt oder auch verlehmt Sande mit zusammen 12 % sind häufig im Tiefland, aber auch im Hügelland vorkommend. Mit jeweils nur 1–2 BZE-Punkten gibt es in Sachsen-Anhalt noch Niedermoore, Grauwacke, Lehm, Granit, Kreidesandstein, Quarzit und Zechstein. Die in der BZE II vertretenen Festgesteine wie z. B. Tonschiefer, Diabas, Grauwacke, Quarzit und Granit liegen alle im Harz in der Standortsregion Mittelgebirge. In dem schmalen zu Sachsen-Anhalt gehörenden Teil des Kyffhäusers, der ebenfalls zum Mittelgebirge zählt, entfällt kein BZE-Punkt.

Die Standorte der unverlehmtten Sande liegen alle im sachsen-anhaltischen Tiefland. Dort befinden sich auch die beiden ehemaligen Moore sowie überwiegend die schwach verlehmtten und verlehmtten Sande sowie die Lehmstandorte. Diese Substratgruppen repräsentieren die für diese Region typischen glazialen und fluvioglazialen Ablagerungen der letzten Eiszeiten mit pleistozänen Decken von Grund- und Endmoränen, Sandern und Talsanden, überwiegend aus der Warthevereisung. Damit gehört das Tiefland zum Altmoränenengebiet und ist im Unterschied zur Jungmoräne durch intensiver verwitterte und stärker eingebnetete, eher nährstoffarme, sandige Böden geprägt (SCHWANECKE u. KOPP 1994).

Die zwischen dem Mittelgebirge und Tiefland liegenden BZE-Punkte in der Standortsregion des Hügellandes sind vom Lösslehm und Lehmen geprägt, vereinzelt finden sich auch Sande unterschiedlichen Verlehmungsgrades. Aufgrund der geringen Bewaldung dieses überwiegend landwirtschaftlich genutzten Gebietes hat diese Standortsregion die geringste Anzahl an BZE-Punkten.

### 10.2.3 Bodentypen

Rund 60 % der vorkommenden Böden der BZE II in Sachsen-Anhalt entfallen auf den Bodentyp Braunerde. Im Tiefland und Mittelgebirge sind jeweils rund zwei Drittel aller Bodentypen der BZE II-Punkte Braunerden, im Hügelland 20 %. Vereinzelt sind Podsol-, Gley-, Pseudogley- und Parabraunerde-Braunerden angesprochen worden, doch nur die Podsol-Braunerden kommen im Tiefland häufiger vor. Parabraunerden sind in Sachsen-Anhalts Wäldern mit 10 % vertreten. Sie stellen im Hügelland den am häufigsten vorkommenden Bodentyp dar und sind mit 2 BZE-Punkten auch im Mittelgebirge vertreten. Podsole (9 %) sind neben den Braunerden im Tiefland typisch, ein Podsol liegt im Harz. Mit 7 % Anteilen in der BZE II sind Pseudogleye ausgewiesen. Dieser Bodentyp kommt in allen drei Wuchsregionen vereinzelt vor. Weitere vorkommende Bodentypen sind Vega-Gleye, Moore, Ranker, Regosole, Fahlerden und ein Tschernosem, die aber mit jeweils 1–3 Punkten in der BZE II Sachsen-Anhalt eher selten sind.

### 10.2.4 Auflagehumus

Sachsen-Anhalts Wälder decken ein weites standörtliches Spektrum und damit eine weite Spanne an Humusformen ab. Mit der Humusform Mull sind 24 % der Waldböden im sachsen-anhaltischen Wald durch eine rasche Zersetzung durch Mikroorganismen und gute Bodendurchmischung durch Bodenwühler geprägt. Diese Humusform zeigt eine zügige Stoffumsetzung im Boden an. Dieser Anteil hat sich von der BZE I zur BZE II deutlich erhöht, in der BZE I lag dieser Anteil bei nur 8 %. Die Anteile des Moders, der schon eine gehemmte Zersetzung anzeigt, haben sich ebenfalls von 58 % in der BZE I auf 68% erhöht. Dagegen sind die Anteile vom Rohhumus, der sehr ungünstigste Zersetzungsbedingungen anzeigt, von 28 % in der BZE I auf nur 3 % in der BZE II gesunken. Andere Humusformen belegen in der BZE II 5 % und in der BZE I 6 %. Damit hat sich der qualitative Humuszustand in den Wäldern von Sachsen-Anhalt zwischen den beiden BZE-Erhebungen deutlich verbessert. Die Tendenz zum Abbau des Auflagehumus kann zum einen mit den langjährig hohen Stickstoffeinträgen, zum anderen auch mit insgesamt höheren Temperaturen bei ähnlichem Niederschlag, stärker durchforsteten Beständen mit mehr Laubholzanteilen und Nährstoffeinträgen aus Düngungen in Zusammenhang stehen.

Die durchschnittliche Trockenmasse im Auflagehumus für alle BZE II-Punkte in Sachsen-Anhalt hat sich bezogen auf den Vorrat der BZE I um knapp 40 % signifikant erhöht. Dies steht im Widerspruch zu der grundsätzlichen Verbesserung der Humusformen in Sachsen-Anhalt, es wäre bei dieser Verbesserung eher eine Abnahme der Trockenmasse erwartet worden.

### 10.2.5 *Trockenrohichten und Skelettanteile*

Relativ geringe Trockenrohichten wurden beim Tonschiefer und verlehmtten Sand mit Werten von unter 1,0 g/cm<sup>3</sup> in 0–5 cm festgestellt, sie sind Ausdruck der hohen Humusgehalte und des lockeren Mineralbodens direkt unterhalb des Auflagehumus. Noch geringere Trockenrohichten treten bei organisch geprägten Standorten auf. Mit zunehmender Bodentiefe steigen die Trockenrohichten des Feinbodens aller Substratgruppen bis auf Werte zwischen 1,4–1,9 g/cm<sup>3</sup> an. Die Böden in den Substratgruppen der Sande weisen insgesamt höhere Trockenrohichten auf als die der Lösslehme und Tonschiefer. Die Böden der Substratgruppen Granit, Grauwacke und Basalt/Diabas liegen mit ihren Trockenrohichten vergleichbar den Werten des Tonschiefers. Quarzit, Lehm, Zechstein und Kreidesandstein liegen mit höheren Trockenrohichten eher bei den Werten der Sande. Grundsätzlich sind die Trockenrohichten in Waldböden, vor allem im Oberboden, aufgrund der relativ höheren Humusgehalte und weniger intensiven Befahrung geringer als auf landwirtschaftlichen Ackerflächen (EVERS et al. 2019, TEEPE et al 2003).

Geringe Skelettgehalte in allen Bodentiefen ergaben sich erwartungsgemäß bei den Sanden, Lösslehmen und Lehmen sowie Tonen. Bei den Festgesteinen im Mittelgebirge lagen die Anteile zwischen 10 und 20 Vol.-% im Oberboden sowie 40 bis 65 Vol.-% im Unterboden. Die Grobbodenanteile in den Substratgruppen Zechstein, Grauwacke Basalt/Diabas und Quarzit haben schon im Oberboden Werte zwischen 10–60 Vol%, im Unterboden sind die Grobbodenanteile häufig noch höher.

Die sich daraus ergebenden Feinbodenvorräte bis 90 cm Bodentiefe reichen von 2.000 (Quarzit) bis über 14.000 t/ha (verlehmtte Sande), der Median in Sachsen-Anhalt liegt bei 13.000 t/ha. Bei gleicher Konzentration würden sich damit, schon durch die unterschiedlichen Feinbodenvorräte bedingt, deutliche Unterschiede bei den Elementvorräten ergeben, was die genaue und aufwändige Bestimmung der Trockenrohichten und Skelettgehalte rechtfertigt.

### 10.3 Wie sauer sind die Waldböden?

#### Versauern sie trotz geringerer luftbürtiger Säurebelastungen weiter?

Der Status einer Bodenversauerung kann u. a. anhand der  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ - und  $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte beurteilt werden. Bei durchschnittlichen Werten zwischen 4,4 und 4,9  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  im Auflagehumus und in den Tiefenstufen befinden sich zum Zeitpunkt der BZE II die meisten Waldböden in Sachsen-Anhalt im Austauscher-Pufferbereich. Die Spanne der  $\text{pH}$ -Werte in den Waldböden Sachsens-Anhalts gleicht der in Niedersachsen (inkl. Bremen) (EVERS et al. 2019) und der Spanne in Hessen (PAAR et al. 2016). In Sachsen-Anhalt liegen jedoch die mittleren  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Auflagehumus und oberen Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe über denen in Niedersachsen und unter denen in Hessen. Gegenüber Hessen kann dies mit den hohen Anteilen der (unverlehmten) Sande in Sachsen-Anhalt erklärt werden, gegenüber Niedersachsen spielt der Einfluss der Flugaschen in Sachsen-Anhalt bei den höheren  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten eine entscheidende Rolle. Ohne Flugascheeinfluss liegen die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte beim unverlehmten Sand auf dem Niveau der ungekalkten Sande in Niedersachsen, mit Flugascheeinfluss sogar noch über den Werten der gekalkten Sande in Niedersachsen. Der Austauscher-Pufferbereich wird unter Flugascheeinfluss zwar nicht im Median, aber in vielen Fällen hin zum Kohlensäure-Silikat und sogar Carbonat-Pufferbereich verlassen.

Dennoch liegt der Median von Auflagehumus und Oberboden in den Substratgruppen des Granits, Quarzits, der Grauwacke und Tonschiefers, des schwach- und unverlehmten Sandes und vereinzelt auch im verlehmten Sand und Lösslehm im Aluminium-Pufferbereich. In diesem Pufferbereich ist mit einer Auflösung sekundärer Tonminerale, Tonzerstörung, Freisetzung von Aluminium-Ionen und Protonen in der Bodenlösung zu rechnen (ULRICH 1981). Damit sind diese Waldböden als relativ sauer einzuschätzen. Im Vergleich zum Bundesmittel der BZE II (WELLBROCK et al. 2016) sind die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in Sachsen-Anhalt wesentlich niedriger, was wie bereits gegenüber Hessen mit den hohen Anteilen der relativ sauren Sandstandorte erklärt werden kann.

Die  $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte, die auch die am Austauscher gebundenen Protonen mit erfassen und damit abgelaufene Pufferreaktionen kennzeichnen, liegen mit einer Spanne zwischen 3,6 und 4,3 in den Tiefenstufen der BZE II in Sachsen-Anhalt deutlich unter den  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten. Die Spanne in Niedersachsen und Hessen ist ähnlich, die Spanne im Bundesmittel (3,9–4,6) deutlich höher (WELLBROCK et al. 2016). Die bereits bei den  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten beschriebene Differenzierung nach Substraten gilt gleichermaßen für die  $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte. Die teilweise bis weit in den Eisen-Pufferbereich hineinreichenden  $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte belegen eine historisch hohe Säurebelastung und erschöpfte Pufferreserven des Mineralbodens, vor allem in den Oberböden.

Der  $\text{pH}$ -Wert tritt in seiner Bedeutung als integrierender Parameter für den chemischen Bodenzustand von Waldböden gegenüber der Basensättigung zurück. Die

Basensättigung kennzeichnet den Nährstoffstatus der Waldböden. Bei identischem pH-Wert kann eine sehr unterschiedliche Basenversorgung gegeben sein. Dies trifft insbesondere auf den Austauscher-Pufferbereich zwischen  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  4,2 und 5,0 zu, in dem sich bezüglich der Nährstoffversorgung die flächenbezogen große Gruppe der mesotrophen Waldstandorte in Sachsen-Anhalt befindet. Infolge der Bodenversauerung werden die  $\text{M}_b$ -Kationen vom Austauscher verdrängt und mit dem Sickerwasser ausgewaschen, die Basensättigung sinkt. Sie kann daher neben den pH-Werten als weiterer bedeutender Indikator der Bodenversauerung und ihrer Folgen angesehen werden (REUSS u. JOHNSON 1985).

Die mittlere Spanne der durchschnittlichen Basensättigung der BZE II-Tiefenstufen beträgt in Sachsen-Anhalt 30–40 %. Sie liegt damit im mittleren Bewertungsbereich. In Niedersachsen ist diese Spanne weiter und geringer (23–41 %), in Hessen höher (27–50 %). Noch deutlicher als bei den pH-Werten differiert die mittlere Basensättigung auf Profilebene nach Substratgruppen. Geringe Werte um 10 % Basensättigung in der BZE II weisen Standorte beim Quarzit, Granit, der Grauwacke und teilweise beim unverlehmten Sand sowie Tonschiefer auf. Mit durchschnittlichen Werten im mittleren Bereich zwischen 30–50 % liegen die schwach verlehmtten Sande und Diabas/Basalt, in höheren Bereichen über 50 % dann überwiegend der schwach verlehmtte Sand, Lösslehm, Lehm und Zechstein sowie die Niedermoore. Es zeigt sich, dass bei den ärmeren und mittel mit Nährstoff versorgten Standorten bereits eine deutliche Verarmung durch eine langjährige Versauerung, vor allem im Oberboden, eingetreten ist. Beim unverlehmten Sand haben Flugasche und Bodenbearbeitung diese Defizite teilweise ausgeglichen. Ohne diese Einflüsse befindet sich der Oberboden und auch der Unterboden teilweise auch bis 90 cm Bodentiefe beim unverlehmten Sand unterhalb von 15 % Basensättigung und wäre damit dringend kalkungsbedürftig.

Die seit Mitte der 1980er-Jahre in Deutschland ergriffenen Maßnahmen zur Luftreinhaltung verringerten vor allem die Emissionen von Schwefeldioxid erheblich. Die Ergebnisse des Intensiven Monitorings zum Stoffeintrag belegen seitdem einen deutlichen Rückgang der Gesamtsäureeinträge auch in sachsen-anhaltische Wälder. Durch das Ende der Kohlewirtschaft der ehemaligen DDR und Maßnahmen zur Luftreinhaltung sind die Emissionen von z. B. Schwefeldioxid in erheblichem Umfang zurückgegangen. Unter der Annahme, dass die Ende der 1980er Jahre gemessenen Stoffeinträge repräsentativ für Kiefernbestände im Raum Colbitz waren, beträgt der Rückgang der Sulfateinträge im Vergleich zum Zeitraum 1986–1988 in diesem Gebiet unter Kiefer aktuell rund 95 %. Gleichzeitig sind aber auch die Flugasche-Einträge deutlich zurückgegangen, die den Säureeinträgen neutralisierend gegenüberstanden. Zusätzlich sind jedoch die Stickstoffeinträge von durchschnittlich 10–16 kg/ha und Jahr in den Gesamtsäureeintrag einzubeziehen, die auf den Versuchsflächen in Sachsen-Anhalt für rund 80 % des Gesamtsäureeintrages verantwortlich sind. Trotz der beobachteten Abnahme der Stoffeinträge werden die

Critical Loads für Säure- und für Stickstoffeinträge daher nach wie vor an einer Vielzahl von Standorten überschritten (HELBIG et al. 2020).

Seit der BZE I ist ein leichter Anstieg der  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte festzustellen, der aber nur für die Tiefenstufe 10–30 cm signifikant ist. Im Auflagehumus ist der  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  dagegen leicht gesunken. Dieser Anstieg kann im Mineralboden zum einen über stark basische Flugascheeinträge, aber auch mit Düngungen und verminderten Säureeinträgen erklärt werden. Das Absinken des  $\text{pH}$ -Wertes in der Auflage dagegen ist möglicherweise eine Folge der stark reduzierten Flugascheeinträge. Die Basensättigung hat sich auf Landesebene nicht signifikant geändert und nur leicht verringert, eine vermeintlich stärkere Verringerung beim unverlehmten Sand in den unteren Tiefenstufen 30–60 und 60–90 cm ist ebenfalls nicht signifikant. Dies ging einher mit dem Austrag von Calcium und Magnesium, besonders deutlich beim unverlehmten Sand ohne Flugascheinfluss im Unterboden.

Die teilweise sehr geringen Basensättigungen und  $\text{pH}$ -Werte vor allem im Oberboden im Harz auf armen Festgesteinen wie z. B. Granit, Quarz und Tonschiefer, aber auch im Tiefland beim unverlehmten Sand zeugen von der drastischen Säurebelastung bis Mitte der 80er Jahre. Da sich die Basensättigung zwischen den beiden BZE-Erhebungen nur in der Tendenz verringert hat und sich die  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  Werte leicht verbessert haben, scheinen die Verhältnisse in Sachsen-Anhalt zur Zeit relativ stabil zu sein. Trotzdem werden die Critical Loads für Säure- und Stickstoffeinträge an vielen Standorten noch überschritten. Da die basenarmen Silikatgesteine im Harz und das altpleistozäne Ausgangsmaterial nur geringe Verwitterungsraten aufweisen, kann bei anhaltender Säurebelastung mit kritischen Bodenverhältnissen gerechnet werden. In Niedersachsen zeigte sich auf Standorten mit saurem Ausgangsgestein ohne Kalkung eine deutliche, signifikante Verringerung der Basensättigung, vor allem unter 30 cm Bodentiefe. Dies zeigte sich deutlich am Beispiel des ungekalkten, unverlehmten Sandes, der nur sehr geringe Anteile an Calcium und Magnesium aufweist und weiter verarmt (EVERS et al. 2019). Es ist zu vermuten, dass auf ähnlich sauren, ungekalkten Standorten, wie z. B. auf Granit, Quarzit, Grauwacke oder Tonschiefer, die Entwicklung vergleichbar ist. In Hessen wiesen beispielsweise ungekalkte Buntsandstein-Standorte erhebliche Verluste an Calcium und Magnesium auf (PAAR et al. 2016). Die aufbasende Wirkung von Flugascheeinträgen ist zeitlich begrenzt, da mit einer stetigen Abnahme der Basen mit dem Sickerwasser zu rechnen ist. Dennoch entspricht die Wirkung der Flugasche auf unverlehmten Sand in Sachsen-Anhalt im Mittel hinsichtlich der Calciumvorräte ungefähr einer Waldkalkung in Niedersachsen, wobei der Einfluss der Flugasche deutlich tiefer in den Mineralböden reicht.

### 10.3.1 *Bewertung*

Trotz des Rückgangs des Gesamtsäureeintrages zeigt sich noch keine nachhaltige Erholung der Waldböden. Obwohl sich anhand des  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wertes eine gewisse Verbesserung des Säurezustandes vieler Standorte ablesen lässt, zeigt eine tendenziell abnehmende Basensättigung und damit eine einhergehende Abnahme von Calcium und Magnesium eine weitere Nährstoffverarmung saurer und armer Standorte. Durch die Remobilisierung von zwischengespeichertem Schwefel kann die Versauerung weiter voranschreiten, obwohl z.B. die atmosphärischen Schwefeleinträge drastisch gesenkt wurden. Dieses war zumindest bis zum Zeitpunkt der BZE II insbesondere für viele Mittelgebirgsstandorte ein starker Treiber der Versauerungsentwicklung (WEIS u. AHRENDTS 2018). Davon ausgenommen sind durch Flugasche aufgebaste Standorte des unverlehnten Sandes, die sich mit gekalkten Standorten des unverlehnten Sandes in Niedersachsen vergleichen lassen.

Die Ergebnisse belegen, dass die Themen Säureeintrag und Bodenversauerung bei der Betrachtung der Stabilität sachsen-anhaltischer Waldstandorte auch heute noch aktuell sind. Eine weitere politisch unterstützte Verminderung der Säure- und vor allem Stickstoffeinträge ist geboten.

## 10.4 Wie entwickeln sich die Stickstoffvorräte in Waldböden?

In Sachsen-Anhalt erhöhten sich die Stickstoffvorräte mit Ausnahme der Tiefenstufe 60–90 cm deutlich und signifikant sowohl im Auflagehumus als auch im Mineralboden. Unter Ausschluss von Extremwerten und methodisch-analytisch bedingten Unterschieden zwischen der BZE I und BZE II ergibt sich immer noch eine rechnerisch mittlere jährliche Zunahme von Stickstoff im Waldboden Sachsens-Anhalts von 70 kg/ha und Jahr. Dies ist eine sehr hohe und ungewöhnliche Zunahme um rund 1000 kg Stickstoff zwischen der BZE I und BZE II und entspricht +16 % bezogen auf den Vorrat der BZE I. Mit 7,52 t/ha liegt der durchschnittliche Stickstoffvorrat der BZE II immer noch im mittleren Bewertungsbereich.

Ähnliche Zunahmen wurden auch auf Flächen des Intensiven Forstlichen Monitorings in Sachsen-Anhalt zwischen 2009 und 2019 vor allem im Auflagehumus festgestellt. Der im Rahmen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings gemessene Stickstoffeintrag der Flächen Nedlitz, Klötze und Colbitz ist jedoch von 20–30 kg im Mittel der Jahre 1986–1988 auf 10–16 kg/ha und Jahr der Jahre 2013–2018 zurückgegangen (siehe Kap. 3.4). Damit liegen die Stickstoffeinträge dieser Flächen zwar immer noch über dem mittleren Bedarf von Waldökosystemen und verursachen eine weitere Aufspeicherung von Stickstoff im Waldboden, sie liefern aber keine Hinweise auf die Erklärung der hohen Stickstoffvorratsveränderungen in der BZE. Auch wenn die Kronenraumbilanzierung nach Ulrich (1994) für Stickstoffeinträge eher als ein konservativer Ansatz angesehen wird, ergeben sich zu anderen methodischen Ansätzen vergleichbare Größenordnungen (AHRENDTS et al. 2020). Dennoch sind in Gebieten mit hohen Flugascheinträgen (z. B. im Osten Sachsen-

Anhalts) die Stickstoff-Vorratsänderungen doppelt bis vierfach so hoch wie in Gebieten mit eher geringen Einträgen (Norden). Dies lässt auf einen Flugascheeinfluss schließen, zumal die Stickstoffvorratsveränderungen in Gebieten mit (ehemals) hohen Flugascheeinträgen in der BZE deutlich höher ausfielen. Da die höchsten Zunahmen sowohl in der BZE als auch im Intensiven Forstlichen Monitoring im Auflagehumus und oberen Mineralboden auftraten, wäre das plausibel. Das Bestandesalter des aufstockenden Bestandes spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, besonders hohe Speicherraten von Stickstoff (und Kohlenstoff) wurden in Beständen unter 60 Jahren festgestellt. In diesem Bestandesalter erfolgt auch in norddeutschen Kieferbeständen eine sehr hohe Akkumulation von Kohlenstoff im Auflagehumus (AHRENDT et al. 2008, BÖTTCHER u SPRINGOB 2001). Vergleichbare Stickstoff-Akkumulationsraten ermittelten auch BRINKMANN u. NIEDER 2002 für den Auflagehumus bei vergleichbarem Bestandesalter. Das erklärt zwar nicht die Quelle des Stickstoffs, aber die vorgefundene Dynamik im Oberboden. Auch die Versorgung mit Stickstoff in den Kiefer- und Fichtennadeln ist sehr hoch und zwischen den BZE-Erhebungen noch weiter angestiegen. Ob es sich hierbei um Umverteilungen aus anderen Stickstoffpools des Ökosystems handelt oder aus tieferen Bodenschichten stammt, ist mit der verfügbaren Methodik der BZE nicht aufzeigbar. Insbesondere die tieferliegenden Bodenschichten (30–90 cm) weisen methodisch bedingt große Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Stickstoffvorräte auf. Kiefernbestände auf Sandböden bei geringen Niederschlagsmengen können effektive Durchwurzelungstiefen von bis zu 200 cm ausbilden. Erhöhte Stickstoffeinträge über die Nadelstreu von Wurzeln aus diesen Tiefen wären damit denkbar. Entsprechende Tiefenbereiche sind bei der BZE in Sachsen-Anhalt nicht beprobt worden.

Bundesweit streuen die Stickstoffspeicherraten in Waldböden von teilweise hohen Abnahmen bis starken Zunahmen weit (Fleck et al. 2019). Besonders hohe Zunahmen treten vor allem in Sachsen-Anhalt und Thüringen auf, es gibt sie aber auch in der Lüneburger Heide in Niedersachsen und in Brandenburg häufiger. Sehr deutliche Abnahmen gab es vor allem in Baden-Württemberg (ANDREAE et al. 2016). Da die Stickstoffspeicherraten bei der BZE je nach standörtlicher Situation so unterschiedlich sind, sollten sie vor allem als Landesmittel mit der absoluten Höhe mit Vorsicht interpretiert werden. Unter der Voraussetzung, dass die räumliche Heterogenität und die verwendeten Methoden nicht zu gerichteten Abweichungen in Sachsen-Anhalt geführt haben, sind die ermittelten Trends statistisch abgesichert. Eine genaue Quantifizierung ist jedoch sehr unsicher. Eine zunehmende Anzahl von Probenahmeterminen kann eine genauere Beurteilung von Bodenveränderungen im Laufe der Zeit liefern (MOBLEY et al. 2018). Entsprechend wird von der BZE III ein deutlich stärkerer Informationsgewinn erwartet.

Die hohen Stickstoffspeicherraten im Waldboden in Sachsen-Anhalt können als Folge der flächigen Überschreitung der Critical Loads für Stickstoff angesehen werden. Dabei besteht die Gefahr, dass in Teilbereichen Stickstoff nicht mehr vollstän-



dig im System gespeichert, sondern mit dem Sickerwasser in Form von Nitrat ausgewaschen wird. Diese Waldbestände können als stickstoffgesättigt angesehen werden. Im Schwerpunkt sind hiervon Gebiete mit hoher Stickstoffdeposition betroffen, es können aber auch nach z. B. Sturmwurfereignissen Entkopplungen des Stickstoffkreislaufes auftreten, die Nitratausträge mit dem Sickerwasser zur Folge haben.

### 10.5 Tragen Waldböden als Kohlenstoffsенke zum Klimaschutz bei?

Sachsen-anhaltische Waldböden stellen eine wichtige Kohlenstoffsенke dar und dienen damit direkt dem Klimaschutz. Die durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte in Sachsen-Anhalts Waldböden von durchschnittlich 130 t/ha (mit organisch geprägten Standorten) zeugen von einer langfristigen Nettospeicherung. Der Auflagehumus hat dabei einen Anteil von 19 %. Die höchsten Kohlenstoffvorräte enthalten organisch geprägte Moorböden, auf denen aktuell Wald stockt. Hier betragen die Kohlenstoffvorräte je nach Mächtigkeit und Zusammensetzung der Moordecke zwischen 200 und über 600 t Kohlenstoff je Hektar. Dieses verdeutlicht wie wichtig es ist, Moorböden vor dem Hintergrund des Klimaschutzes zu erhalten.

Weiterhin haben die Kohlenstoffvorräte in sachsen-anhaltischen Waldböden im Zeitraum von 1992 (BZE I) bis 2006 (BZE II) um insgesamt 20,8 t/ha zugenommen (+25 %). Dies entspricht einer jährlichen Rate von 1,5 t/ha (ohne Moorstandorte, Extremwerte und untere Tiefenstufen 30–60 sowie 60–90 cm wegen methodischen Unsicherheiten). Die Kohlenstoffvorräte in der Auflage und oberen Mineralboden haben besonders stark zugenommen: Der Auflagehumus um 7 t/ha (+46 %), die Tiefenstufen 0–5 cm um 6,1 t/ha (+36 %) und 5–10 cm um 6 t/ha (+75 %). In der Tiefenstufe 10–30 cm dagegen waren die Zunahmen mit 2,5 t/ha (+10 %) deutlich geringer. Alle Unterschiede konnten statistisch abgesichert werden. Die Speicherraten für Kohlenstoff im Waldboden sind bundesweit sehr unterschiedlich. Auf Bundesebene ergaben sich mittlere signifikante Zunahmen auf Profilebene um 0,75 t/ha und Jahr, die ebenfalls vor allem auf deutlichen Zunahmen im Mineralboden bis 30 cm basieren (GRÜNEBERG et al. 2016).

### 10.6 Auf welchen Standorten ist Trockenstress bei Waldbäumen zu erwarten?

Die Verteilungen der nutzbaren Feldkapazität auf Profilebene bei den in Sachsen-Anhalt vorkommenden Substratgruppen reichen vom Quarzit mit 50 mm und Lösslehm mit 190 mm vom geringen bis hohen Bewertungsbereich. Im Mittel Sachsen-Anhalts liegen die Waldböden mit 115 mm im mittleren Bewertungsbereich für die nutzbare Feldkapazität. Bei den unverlehmten Sanden kommen Profile mit geringer bis mittel-hoher Bewertungsstufe vor, das Mittel liegt bei 93 mm gerade noch im mittleren Bereich. In Abhängigkeit vom regionalen Standort und der zukünftigen Klimaentwicklung ist von einer erhöhten Trockenstressgefährdung auszugehen.

Sämtliche Klimaprojektionen lassen einen deutlichen Temperaturanstieg bei veränderten jährlichen Niederschlagsverteilungen sowie das Auftreten von Witterungsextremen, Starkregeneignissen und Stürmen erwarten. Aus den forstlichen Standortdaten und Umweltnetzdaten der BZE, Bodendauerbeobachtung sowie der ökologischen Waldzustandskontrolle und den Klimaszenarien für Sachsen-Anhalt wurden über die Standortwasserbilanz in der Vegetationsperiode Entscheidungshilfen für die klimaangepasste Baumartenwahl in Sachsen-Anhalt erarbeitet (HAMKENS et al. 2020). Daraus geht hervor, dass für einen Großteil der Waldstandorte in Sachsen-Anhalt ein erhöhtes Trockenstressrisiko zu erwarten ist.

### 10.7 Welche Folgerungen ergeben sich für die Energieholznutzung in Wäldern?

Die Energieholznutzung von Schwachholz und Kronenmaterial in Wäldern kann das Risiko unzureichender Nährstoffversorgung erhöhen, da die Nährelementexporte gegenüber der Stammholznutzung überproportional ansteigen (PUHLMANN et al. 2018). Das zukünftige Risiko durch den Nährstoffentzug bei verschiedenen Nutzungsintensitäten lässt sich mit Hilfe von Nährstoffbilanzen (AK STANDORTSKARTIERUNG 2016) oder mit dem Nährstoffentzugsindex (BLOCK u. MEIWES 2013) abschätzen. Kurz- bis mittelfristig verfügbare Bodenvorräte im Hauptwurzelraum und Kennwerte der Waldernährung (Blatt- und Nadelanalysen) liefern Hinweise, auf welchen Standorten die Nährstoffsituation schon bei der gegenwärtigen Nutzungsintensität als kritisch anzusehen ist und entsprechend von einer Energieholznutzung von Schwachholz und Kronenmaterial abzusehen ist. Außerdem sollten Standorte mit geringen Nährstoffvorräten (z. B. Nährstoffzahl ziemlich arm und arm) aufgrund historischer Übernutzung auch bei positiven Nährstoffbilanzen nicht für eine Nutzungsintensivierung vorgesehen werden, um das Standortspotenzial wiederherzustellen.

Die Substratgruppe der unverlehnten Sande weist nur gering-mittlere Magnesium- und Kaliumvorräte im Hauptwurzelraum auf, bei Quarzit, Grauwacke und Granit betrifft dies auch Calcium. Diese Substratgruppen können daher als kritisch hinsichtlich intensiver Energieholznutzung eingestuft werden. Bei den anderen Substratgruppen bewegen sich die mittleren Calcium- und Magnesiumvorräte überwiegend im mittleren Bewertungsbereich. Eine geringe bis sehr geringe Versorgung findet sich vereinzelt noch beim Tonschiefer.

Bei den Kaliumvorräten wurde bei vielen Standorten und Substratgruppen eine geringe bis sehr geringe Bewertungsstufe festgestellt. Eine eindeutige Bewertung der geringen Kaliumvorräte im Boden ist schwierig, da Kalium im System sehr mobil ist, eher im Nährstoffkreislauf zirkuliert und die Versorgung nicht nur von den austauschbaren Bodenvorräten abhängt. Bei Nutzungsintensivierungen sollte berücksichtigt werden, dass geringe Vorräte und Bilanzdefizite für Kalium gravierender zu

bewerten sind als für Calcium und Magnesium. Nach v. WILPERT et al. (2018) werden negative Kaliumbilanzen in erster Linie durch den Entzug mit der Holzernte generiert. Hinzu kommt, dass eine effiziente Kaliumdüngung schwierig ist.

Diese Einschätzung wird auch durch die Blattspiegelwerte für die Baumart Buche bestätigt, 4 von 11 Punkten weisen Kaliumdefizite auf. Diese Baumart weist die höchsten Kaliumentzüge aller Hauptbaumarten auf, weil sie im Vergleich zu den anderen Hauptbaumarten am meisten Kalium im Derbholz speichert (BLOCK u. MEIWES 2013, AK STANDORTSKARTIERUNG 2016). Bei der BZE II zeigen sich vor allem Ernährungsdefizite bei Phosphor und Kalium schon bei der gegenwärtigen Nutzungsintensität, sodass eine Intensivierung der Nutzung durch eine zusätzliche Entnahme von Nichtderbholz im Zuge der Energieholznutzung eher nicht zu empfehlen ist. Die aus der Ernährungssituation abgeleiteten Empfehlungen zur Vollbaumnutzung ergeben für die Kiefer nach den hier verwendeten Kriterien keine Einschränkungen für die Vollbaumnutzung. Auch wenn die Kiefer grundsätzlich durch eine deutlich bessere Ernährungssituation gekennzeichnet ist, sollte beachtet werden, dass sie sich häufig auf Standorten befindet, die infolge von Säureeinträgen und/oder historischer Übernutzung verarmt sind, sodass hier eher eine Wiederherstellung des Standortpotenzials anzustreben ist.

Generell wird vor einer Nutzungsintensivierung in Sachsen-Anhalt empfohlen, eine intensive Prüfung und Abwägung der regionalen und standörtlichen Ernährungssituation in Kombination mit Nährstoffbilanzen und Bodenvorräten vorzunehmen. Viele Standorte in Sachsen-Anhalt sind infolge von Flugascheeinträgen deutlich aufgebast und weichen mit ihrer Nährstoffversorgung deutlich von weniger beeinflussten Standorten ab.

## 10.8 Welche Folgerungen ergeben sich aus den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung II für die Standortkartierung?

Bodenchemische Analysen sind von besonderer Bedeutung für eine differenzierte Standortdiagnostik. Die Analysen der Bodenzustandserhebungen ermöglichen eine Überprüfung der Trophiebewertungsstufen, die im Rahmen der Standortkartierung vergeben werden (EVERS et al. 2013a). Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Datenbasis zur bodenchemischen Einordnung von Substratgruppen, die große Variabilitäten aufweisen (z. B. Lösslehm) bzw. bei der BZE II-Stichprobe nur in relativ geringer Anzahl vertreten sind (z. B. Granit, Quarzit, Grauwacke), durch weitere bodenchemische Untersuchungen verbessert werden sollte. Dies könnte die Nährstoffeinschätzung der Standortkartierung präzisieren und helfen, das standörtliche Potenzial und dessen Dynamik v. a. infolge von Stoffeinträgen und Klimaveränderungen besser abschätzen zu können. Dadurch werden forstliche Maßnahmen (u. a. klimaangepasste Baumartenwahl, Waldkalkungen und Vollbaumnutzungen) verlässlicher am Standortpotenzial orientiert, ihre Wirkung quantifiziert und nachhaltiger ausgerichtet.

Die direkte Gegenüberstellung der BZE II-Vegetationsdaten und der auf den Stichprobenpunkten erhobenen bodenchemischen Kenngrößen ermöglichte Analysen der Zusammenhänge zwischen der Pflanzenartenzusammensetzung in Wäldern und dem chemischen Bodenzustand. Auf Grundlage dieser Ergebnisse konnten Zeigerarten identifiziert werden, die operationale Hilfestellungen für die Trophieeinschätzung von Waldstandorten bieten. Dabei handelt es sich um indikative Kennarten, die – im Unterschied zu einigen Arten in der Liste der ökologischen Artengruppen der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) relativ häufig in Waldökosystemen vorkommen.

## 10.9 Wer nutzt die Informationen der Bodenzustandserhebung (BZE als Informationsplattform)? Braucht die forstliche Umweltbeobachtung (Monitoring) eine Bodenzustandserhebung?

### 10.9.1 *Informationen aus der Bodenzustandserhebung als Teil des Forstlichen Umweltmonitorings*

Informationen aus den Bodenzustandserhebungen sind eine zentrale Säule des Forstlichen Umweltmonitorings. Waldböden stellen die Grundlage für das Wachstum und die Vitalität der Waldbäume dar. Waldböden zeigen Veränderungen durch anthropogene Einflüsse und Waldmanagement an. Der Schutz der Waldböden ist eine Grundvoraussetzung für nachhaltiges Waldmanagement. Mit den Daten und Auswertungen der Bodenzustandserhebungen I und II ist eine flächenrepräsentative und qualitätsgeprüfte fachliche Grundlage geschaffen worden, die den Zustand und die Veränderungen von Waldböden in Sachsen-Anhalt belegt. Die Informationen der Bodenzustandserhebung werden ergänzt durch Daten der Waldzustandserhebung, des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings und durch Ergebnisse aus experimentellen Versuchen. Die Vernetzung dieser Daten ist z.B. ein wichtiger Schritt, um Modelle und Methoden auf die BZE-Standorte zu übertragen und von diesen ausgehend Regionalisierungen durchzuführen (FLECK et al. 2017, 2019, HEITKAMP et al. 2020, AHRENDTS et al. 2018a, 2018b, VON WILPERT et al. 2018). Die Informationen zu den Waldböden bieten für die Daseinsvorsorge und Forschung eine äußerst wertvolle Planungsgrundlage.

### 10.9.2 *Nationale/Internationale Partner*

Die Methodik der BZE erlaubt vergleichende Auswertungen zwischen den Bundesländern. Die BZE trägt somit zur Erfüllung nationaler und internationaler Berichtspflichten bei. Die BZE Wald steht in enger Kooperation mit anderen bundes- und europaweiten Programmen. Dazu zählen insbesondere das BioSoil-Programm der UN/ECE (International Cooperative Programme), die BZE Landwirtschaft sowie

das bundesweite Bodendauerbeobachtungsflächen-Programm. Partner sind insbesondere das Umweltbundesamt mit der Umweltprobenbank des Bundes sowie das Bundesamt für Naturschutz.

### *10.9.3 Gesellschaft, Politik und Verwaltung*

Für die Menschen in Deutschland sollen Wälder eine Vielzahl von Aufgaben erfüllen (Waldfunktionen). Insbesondere sind an dieser Stelle die Produktion des nachwachsenden Rohstoffs Holz, die Trinkwasserspende und die Luftreinhaltung zu nennen. Daneben schützen Wälder vor Bodenerosion und bieten Schutz und Lebensraum für Tiere und Pflanzen. Nicht zuletzt sind Funktionen des Waldes zu nennen, die eine Grundlage für Erholung, Tourismus und Kultur darstellen. Die BZE trägt wesentlich zu einer Bewertung der Stabilität, Resilienz und Nutzungsfähigkeit von Waldökosystemen als Voraussetzung für die Erfüllung der Waldfunktionen bei. Mit der zwischen BZE I und BZE II deutlich gewordenen Dynamik der Bodeneigenschaften stellt die BZE ein Warnsystem für Belastungen der Wälder dar. Damit liefern die Ergebnisse der BZE auch Informationen zur Kontrolle von Maßnahmen der Umweltpolitik und des Waldbodenschutzes. Die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt berät Verwaltungen, Waldbesitzer und die Politik in Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein. Sie erstellt vielfältige Beiträge, die der nachhaltigen Forstwirtschaft und der Daseinsvorsorge dienen. Eine wichtige Forschungs- und Planungsgrundlage stellen dabei die Ergebnisse der BZE I und II dar.

### *10.9.4 Forstliche Betriebe verschiedener Waldbesitzarten*

Die Ergebnisse der BZE I und II sind nach Bodensubstraten und weiteren Standortmerkmalen aufgegliedert. Anhand von Regionalisierungsmodellen lassen sich die Ergebnisse in die Fläche übertragen, sodass Karten erstellt werden, die die Forstbetriebe sowie die Einrichtungen der forstlichen Planung in ihrer praktischen Arbeit unterstützen können.

Dies betrifft insbesondere eine verbesserte Ansprache und Bewertung der forstlichen Standorte, eine Darstellung von Chancen und Risiken – etwa in Bezug auf Fragen der Nährstoffnachhaltigkeit und Energieholznutzung sowie zu Optionen des Schutzes von Waldböden im Zuge der waldbaulichen Steuerung. Die BZE liefert Informationen zur besseren Differenzierung dieser Maßnahmen, zur Bedeutung und Bewertung von Nebenwirkungen und zur Erfolgskontrolle. Wie die Ergebnisse von BZE I und BZE II weiterhin deutlich zeigen, verändern sich die Eigenschaften der sachsen-anhaltischen Waldböden in vergleichsweise kurzen Zeitabschnitten. Eine forstliche Standortserkundung als Grundlage für die Baumartenwahl und das Waldmanagement sollte in der Lage sein, dynamische Veränderungen des Waldbodenzustandes abzubilden. Dazu können die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung beitragen. Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung liefern zudem für Forstbetriebe

aller Besitzarten Entscheidungshilfen für die betriebliche Planung und Umsetzung von Bewirtschaftungsmaßnahmen.

#### *10.9.5 Wissenschaft*

Schließlich werden die Daten und Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen für wissenschaftliche Auswertungen sowie fachliche und methodische Weiterentwicklungen genutzt. Wissenschaftliche Auswertungen erfolgen sowohl innerhalb der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt als auch in Kooperation mit anderen länder- oder bundesbezogenen Einrichtungen und Universitäten. Die Daten der BZE stellen eine wertvolle Grundlage für Forschungsvorhaben und für Kooperationen mit wissenschaftlichen Einrichtungen dar.

# 11 Qualitätssicherung

Nils König

## 11.1 Probenvorbereitung und -analyse

Die im Rahmen der BZE I und BZE II genommenen Humus-, Boden- und Pflanzenproben wurden in unterschiedlichen Laboren der im Zuständigkeitsbereich der NW-FVA liegenden Bundesländer analysiert. In der folgenden Tabelle 36 sind die jeweiligen Labore aufgelistet:

*Tabelle 36: Übersicht der an der BZE I und BZE II beteiligten Labore der im Zuständigkeitsbereich der NW-FVA liegenden Bundesländer*

| Land                            | BZE I  | BZE II  |
|---------------------------------|--|---|
| Niedersachsen<br>(inkl. Bremen) | Umweltlabor der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Göttingen<br><br>Ab 2006: Umweltlabor der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), Göttingen   | Umweltlabor der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), Göttingen<br><br>und:<br>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover (teilweise)  |
| Hessen                          | bis 2000: Hessische Landwirtschaftliche Versuchsanstalt (HLVA)*, Kassel<br><br>ab 2000: Hessisches Dienstleistungszentrum für Landwirtschaft, Gartenbau und Naturschutz (HDLGN)*, Kassel<br><br>Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA)*, Kassel | Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL)*, Kassel<br><br>und:<br>Umweltlabor der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), Göttingen (teilweise)<br><br>sowie:<br>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover (teilweise) |
| Sachsen-Anhalt                  | Landesanstalt für Forstplanung Brandenburg, Labor Eberswalde   | Umweltlabor der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) Göttingen<br><br>und:<br>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover (teilweise)   |

\* HLVA, HDLGN, LUFA und LHL sind unterschiedliche Organisationsformen der gleichen Einrichtung

Die in den jeweiligen Laboren angewandten Methoden zur Vorbereitung, Untersuchung und Messung der Proben im Rahmen der BZE I und II in Sachsen-Anhalt sind in den folgenden Tabellen 37a bis 37f zusammenfassend dargestellt. Wo möglich, wird auf die entsprechende Methode im Handbuch Forstliche Analytik (HFA) (GAFA 2005 u. 2014) verwiesen. Methoden, die nicht den Vorgaben der BZE-Arbeitsanleitungen (WELLBROCK et al. 2006) entsprechen, sind entsprechend nach HFA codiert, soweit Informationen dazu vorlagen. Die HFA-Codes (GAFA 2014) sind in den Tabellen 38a bis 38f aufgelistet. Eine Zusammenstellung der angewandten Labormethoden für die BZE I und II in Niedersachsen und Hessen ist in PAAR et al. 2016 zu finden.

Erläuterungen zu den Tabellen:

In den Spalten „Methode“ ist jeweils das Kürzel der verwendeten Methode der NW-FVA eingetragen. Die Methoden sind veröffentlicht in den Berichten des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Bände 46–49, 58–60 und 75–81 (KÖNIG u. FORTMANN 1996, 1999, 2012, KÖNIG et al. 2009). Bei Analysen anderer Labore (Eberswalde, Kassel, Hannover) sind folgende Kürzel verwendet worden:

|        |   |  |
|--------|---|--|
| AAS    | = | Atomabsorptionsspektroskopie mit Flammentechnik                                |
| AAS-G  | = | Atomabsorptionsspektroskopie mit Graphitrohrtechnik                            |
| AKE    | = | effektive Austauschkapazitätsbestimmung  |
| CFC    | = | Continuous-Flow-Colorimetrie   |
| DA     | = | Druckaufschluss mit Salpetersäure  |
| DA-PCI | = | Druckaufschluss mit Salpetersäure und Perchlorsäure                            |
| EA     | = | Elementaranalyse   |
| IC     | = | Ionenchromatographie   |
| ICP    | = | Induktiv gekoppelte Plasmaspektroskopie  |
| ICP-MS | = | Induktiv gekoppelte Plasmaspektroskopie gekoppelt mit einem Massenspektrometer |
| pH     | = | pH-Messung   |
| GA     | = | Gesamtaufschluss mit Flusssäure  |

Legende der Farbmarkierungen:

|                         |   |  |
|-------------------------|---|--|
| Felder weiß unterlegt   | = | Daten im Labor der NW-FVA erhoben        |
| Felder grün unterlegt   | = | Daten im Labor Eberswalde erhoben        |
| Felder orange unterlegt | = | Daten im Labor Kassel erhoben            |
| Felder gelb unterlegt   | = | Daten im Labor der BGR erhoben           |
| Felder pink unterlegt   | = | Daten der BZE II für die BZE I verwendet |
| x                       | = | entfällt                                 |



Tabelle 37a: Angewandte Methoden bei der BZE I in Sachsen-Anhalt, Probenart Boden

| Parameter                                | Probenvorbereitungsmethoden |                   |                   | Untersuchungsmethoden |         |          | Elementbestimmungsmethoden |     |           |
|--|-----------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|---------|----------|----------------------------|-----|-----------|
|  | Trocknen<br>Methode         | Sieben<br>Methode | Mahlen<br>Methode |                       |         |          |                            |     |           |
|  | HFA                         | HFA               | HFA               | HFA                   | Methode | HFA      | Methode                    | HFA | Methode   |
| <b>Effektiv austauschbare Kationen</b>   |                             |                   |                   |                       |         |          |                            |     |           |
| Al                                       | A1.2.1                      | A1.3.1            | x                 | x                     | AKE     | A3.2.1.1 | AAS                        |     |           |
| Ca                                       | A1.2.1                      | A1.3.1            | x                 | x                     | AKE     | A3.2.1.1 | AAS                        |     |           |
| Fe                                       | A1.2.1                      | A1.3.1            | x                 | x                     | AKE     | A3.2.1.1 | AAS                        |     |           |
| K  | A1.2.1                      | A1.3.1            | x                 | x                     | AKE     | A3.2.1.1 | AAS                        |     |           |
| Mg                                       | A1.2.1                      | A1.3.1            | x                 | x                     | AKE     | A3.2.1.1 | AAS                        |     |           |
| Mn                                       | A1.2.1                      | A1.3.1            | x                 | x                     | AKE     | A3.2.1.1 | AAS                        |     |           |
| Na                                       | A1.2.1                      | A1.3.1            | x                 | x                     | AKE     | A3.2.1.1 | AAS                        |     |           |
| pH                                       | A1.2.1                      | A1.3.1            | x                 | x                     | AKE     | A3.2.1.1 | pH                         |     |           |
| <b>Potentiell austauschbare Kationen</b> |                             |                   |                   |                       |         |          |                            |     |           |
| Ca                                       | A1.2.1                      | A1.3.1            | x                 | x                     | AKT2.1  | A3.2.1.2 | CaCagesICP13.1             |     | D11.1.5.2 |
| K  | A1.2.1                      | A1.3.1            | x                 | x                     | AKT2.1  | A3.2.1.2 | KKgesICP13.1               |     | D30.1.5.4 |
| Mg                                       | A1.2.1                      | A1.3.1            | x                 | x                     | AKT2.1  | A3.2.1.2 | MgMggesICP13.1             |     | D36.1.5.2 |
| Na                                       | A1.2.1                      | A1.3.1            | x                 | x                     | AKT2.1  | A3.2.1.2 | NaNagesICP13.1             |     | D39.1.5.4 |
| Ba-Rücktausch                            | A1.2.1                      | A1.3.1            | x                 | x                     | AKT2.1  | A3.2.1.2 | BaBagesICP10.1             |     | D4.1.5.3  |
| <b>Wässriger Extrakt</b>                 |                             |                   |                   |                       |         |          |                            |     |           |
| Al                                       | x                           | x                 | x                 | x                     | x       | x        | x                          | x   | x         |
| Ca                                       | x                           | x                 | x                 | x                     | x       | x        | x                          | x   | x         |
| Cl                                       | x                           | x                 | x                 | x                     | x       | x        | x                          | x   | x         |
| C <sub>ges</sub>                         | x                           | x                 | x                 | x                     | x       | x        | x                          | x   | x         |
| Canorg                                   | x                           | x                 | x                 | x                     | x       | x        | x                          | x   | x         |
| Fe                                       | x                           | x                 | x                 | x                     | x       | x        | x                          | x   | x         |
| K  | x                           | x                 | x                 | x                     | x       | x        | x                          | x   | x         |

(Fortsetzung Tabelle 37a)



(Fortsetzung Tabelle 37a)

| Parameter | Probenvorbereitungsmethoden |                   |                   | Untersuchungsmethoden |         |        | Elementbestimmungsmethoden |         |           |
|-----------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|---------|--------|----------------------------|---------|-----------|
|           | Trocknen<br>Methode         | Sieben<br>Methode | Mahlen<br>Methode | HFA                   | HFA     | HFA    | Methode                    | Methode | Methode   |
| Cu        | A1.2.1                      | A1.3.1            | MBP1.1            | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3 | CuGesICP16.1               | HFA     | D32.1.6.6 |
| Fe        | A1.2.1                      | A1.3.1            | MBP1.1            | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3 | FeFegesICP16.1             | A3.3.3  | D17.1.6.2 |
| K         | A1.2.1                      | A1.3.1            | MBP1.1            | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3 | KKgesICP16.1               | A3.3.3  | D30.1.6.4 |
| Mg        | A1.2.1                      | A1.3.1            | MBP1.1            | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3 | MgNggesICP16.1             | A3.3.3  | D36.1.6.2 |
| Mn        | A1.2.1                      | A1.3.1            | MBP1.1            | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3 | MnMngesICP16.1             | A3.3.3  | D37.1.6.3 |
| Na        | A1.2.1                      | A1.3.1            | MBP1.1            | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3 | NaNagesICP16.1             | A3.3.3  | D39.1.6.4 |
| Ni        | A1.2.1                      | A1.3.1            | MBP1.1            | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3 | NiNigesICP16.1             | A3.3.3  | D42.1.6.6 |
| P         | A1.2.1                      | A1.3.1            | MBP1.1            | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3 | PPgesICP16.1               | A3.3.3  | D44.1.6.1 |
| Pb        | A1.2.1                      | A1.3.1            | MBP1.1            | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3 | PbPbgesICP16.1             | A3.3.3  | D6.1.6.6  |
| S         | A1.2.1                      | A1.3.1            | MBP1.1            | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3 | SSgesICP16.1               | A3.3.3  | D54.1.6.1 |
| Zn        | A1.2.1                      | A1.3.1            | MBP1.1            | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3 | ZnZngesICP16.1             | A3.3.3  | D73.1.6.4 |

(Fortsetzung Tabelle 37a)

| <b>Gesamtgehalte</b>    |   |        |        |        |                 |   |                      |   |   |
|-------------------------|---|--------|--------|--------|-----------------|---|----------------------|---|---|
| Al                      |   | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.4.1 | GA              |   | AAS                  |   |   |
| Ca                      |   | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.4.1 | GA              |   | AAS                  |   |   |
| Cd                      | x | x      | x      | x      | x               | x | x                    | x | x |
| Co                      | x | x      | x      | x      | x               | x | x                    | x | x |
| Cr                      | x | x      | x      | x      | x               | x | x                    | x | x |
| Cu                      | x | x      | x      | x      | x               | x | x                    | x | x |
| Fe                      |   | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.4.1 | GA              |   | AAS                  |   |   |
| K                       |   | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.4.1 | GA              |   | AAS                  |   |   |
| Mg                      |   | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.4.1 | GA              |   | AAS                  |   |   |
| Mn                      |   | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.4.1 | GA              |   | AAS                  |   |   |
| Na                      |   | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.4.1 | GA              |   | AAS                  |   |   |
| Ni                      | x | x      | x      | x      | x               | x | x                    | x | x |
| P                       |   | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.4.1 | GA              |   | spektrophotometrisch |   |   |
| Pb                      | x | x      | x      | x      | x               | x | x                    | x | x |
| S                       | x | x      | x      | x      | x               | x | x                    | x | x |
| Zn                      | x | x      | x      | x      | x               | x | x                    | x | x |
| <b>Elementaranalyse</b> |   |        |        |        |                 |   |                      |   |   |
| C                       |   | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.4.1 | nasse Oxidation |   |                      |   |   |
| N                       |   | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.4.1 | Kjeldahl        |   |                      |   |   |
| <b>Carbonat-Gehalt</b>  |   |        |        |        |                 |   |                      |   |   |
| C-CO <sub>3</sub>       | x | x      | x      | x      | x               | x | x                    | x | x |

(Fortsetzung Tabelle 37a)

| Parameter                             | Probenvorbereitungsmethoden |        |                   |        | Untersuchungsmethoden |     |         |          | Elementbestimmungsmethoden |     |         |           |
|---------------------------------------|-----------------------------|--------|-------------------|--------|-----------------------|-----|---------|----------|----------------------------|-----|---------|-----------|
|                                       | Trocknen<br>Methode         | HFA    | Sieben<br>Methode | HFA    | Mahlen<br>Methode     | HFA | Methode | HFA      | Methode                    | HFA | Methode | HFA       |
| <b>pH-Wert (H2O)</b>                  |                             |        |                   |        |                       |     |         |          |                            |     |         |           |
| pH                                    |                             | A1.2.1 |                   | A1.3.1 | x                     |     | pH H2O  | A3.1.1.1 |                            | pH  |         | D76.1.4.1 |
| <b>pH-Wert (CaCl2)</b>                |                             |        |                   |        |                       |     |         |          |                            |     |         |           |
| pH                                    | x                           |        | x                 |        | x                     |     |         |          |                            | x   |         | x         |
| <b>pH-Wert (KCl)</b>                  |                             |        |                   |        |                       |     |         |          |                            |     |         |           |
| pH                                    |                             | A1.2.1 |                   | A1.3.1 | x                     |     | pH KCl  | A3.1.1.3 |                            | pH  |         | D76.1.5.1 |
| <b>Trockenrohichte des Feinbodens</b> |                             |        |                   |        |                       |     |         |          |                            |     |         |           |
| TRDF                                  | T5.1                        | x      | x                 | x      | x                     |     | TRDF2.1 | A2.8     |                            | x   |         | x         |
| <b>Skelettranteil</b>                 |                             |        |                   |        |                       |     |         |          |                            |     |         |           |
| SKA                                   | T5.1                        | x      | x                 | x      | x                     |     | TRDF2.1 | A2.8     |                            | x   |         | x         |

Tabelle 37b: Angewandte Methoden bei der BZE II in Sachsen-Anhalt, Probenart Boden

| Parameter                                | Probenvorbereitungsmethoden |                   |                   | Untersuchungsmethoden |     |           | Elementbestimmungsmethoden |                |           |
|--|-----------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----|-----------|----------------------------|----------------|-----------|
|  | Trocknen<br>Methode         | Sieben<br>Methode | Mahlen<br>Methode | HFA                   | HFA | HFA       | Methode                    | Methode        | Methode   |
| <b>Effektiv austauschbare Kationen</b>   |                             |                   |                   |                       |     |           |                            |                |           |
| Al                                       | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | AKE1.1    | A3.2.1.1                   | AlAlgesICP10.1 | D1.1.5.2  |
| Ca                                       | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | AKE1.1    | A3.2.1.1                   | CaCagesICP10.1 | D1.1.5.2  |
| Fe                                       | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | AKE1.1    | A3.2.1.1                   | FeFegesICP10.1 | D17.1.5.3 |
| K  | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | AKE1.1    | A3.2.1.1                   | KKgesICP10.1   | D30.1.5.4 |
| Mg                                       | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | AKE1.1    | A3.2.1.1                   | MgMggesICP10.1 | D36.1.5.2 |
| Mn                                       | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | AKE1.1    | A3.2.1.1                   | MnMngesICP10.1 | D37.1.5.3 |
| Na                                       | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | AKE1.1    | A3.2.1.1                   | NaNagesICP10.1 | D39.1.5.4 |
| pH                                       | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | AKE1.1    | A3.2.1.1                   | HH+2PHM4.1     | D76.1.5.1 |
| <b>Potentiell austauschbare Kationen</b> |                             |                   |                   |                       |     |           |                            |                |           |
| Ca                                       | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | AKT2.1    | A3.2.1.2                   | CaCagesICP13.1 | D11.1.5.2 |
| K  | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | AKT2.1    | A3.2.1.2                   | KKgesICP13.1   | D30.1.5.4 |
| Mg                                       | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | AKT2.1    | A3.2.1.2                   | MgMggesICP13.1 | D36.1.5.2 |
| Na                                       | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | AKT2.1    | A3.2.1.2                   | NaNagesICP13.1 | D39.1.5.4 |
| Ba-Rücktausch                            | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | AKT2.1    | A3.2.1.2                   | BaBagesICP10.1 | D4.1.5.3  |
| <b>Wässriger Extrakt</b>                 |                             |                   |                   |                       |     |           |                            |                |           |
| Al                                       | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1                   | AlAlgesICP7.2  | D1.1.4.2  |
| Ca                                       | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1                   | CaCagesICP7.2  | D11.1.4.2 |
| Cl                                       | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1                   | ClClFE3.2      | D13.2.4.2 |
| Cges                                     | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1                   | CCgesTOC3.2    | D31.1.4.1 |
|  |                             |                   |                   |                       |     |           |                            | CCgesTOC3.3    | D31.1.4.1 |
| Canorg                                   | T3.1                        | A1.2.1            | SBP2.1            | A1.3.2                | x   | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1                   | CCanorgTOC3.1  | D31.3.4.3 |
|  |                             |                   |                   |                       |     |           |                            | CCanorgTOC3.2  | D31.3.4.3 |

(Fortsetzung Tabelle 37b)

|                                  |      |        |        |        |        |        |           |          |                 |           |
|----------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|----------|-----------------|-----------|
| Fe                               | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | x      | x      | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1 | FeFeges CP7.2   | D17.1.4.2 |
| K                                | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | x      | x      | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1 | KGes CP7.2      | D30.1.4.4 |
| Leitfähigkeit                    | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | x      | x      | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1 | LFLFLFM2.1      | D77.1.4.2 |
| Mg                               | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | x      | x      | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1 | MgMges CP7.2    | D36.1.4.2 |
| Mn                               | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | x      | x      | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1 | MnMges CP7.2    | D37.1.4.3 |
| Na                               | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | x      | x      | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1 | NaNages CP7.2   | D39.1.4.4 |
| Nges                             | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | x      | x      | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1 | NNges TOC2.1    | D58.1.4.4 |
|                                  |      |        |        |        |        |        |           |          | NNges TOC2.2    | D58.1.4.4 |
| NH4-N                            | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | x      | x      | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1 | NNH4CF6.1       | D58.3.4.3 |
| NO3-N                            | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | x      | x      | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1 | NNO2+3CFC.5.4   | D58.4.4.2 |
| Pges                             | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | x      | x      | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1 | PPges CP7.2     | D44.1.4.1 |
| pH                               | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | x      | x      | EXTH2O1.1 | A3.2.2.1 | HH+PHM6.1       | D76.1.4.3 |
| <b>Säureextrakt Königswasser</b> |      |        |        |        |        |        |           |          |                 |           |
| Al                               | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | OAKW1.1   | A3.3.3   | AlAlges CP16.1  | D11.1.6.2 |
| Al                               |      |        |        |        |        | A1.4.1 | KW        | A3.3.3   |                 | D11.1.6.2 |
| Ca                               | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | OAKW1.1   | A3.3.3   | CaCages CP16.1  | D11.1.6.3 |
| Ca                               |      |        |        |        |        | A1.4.1 | KW        | A3.3.3   |                 | D11.1.6.3 |
| Cd                               | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | OAKW1.1   | A3.3.3   | CdCdges CP16.1  | D9.1.6.4  |
| Cd                               |      |        |        |        |        | A1.4.1 | KW        | A3.3.3   |                 | D9.1.6.5  |
| Co                               | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | OAKW1.1   | A3.3.3   | CoCoges CP16.1  | D15.1.6.6 |
| Cr                               | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | OAKW1.1   | A3.3.3   | CrCrages CP16.1 | D14.1.6.5 |
| Cr                               |      |        |        |        |        | A1.4.1 | KW        | A3.3.3   |                 | D14.1.6.6 |
| Cu                               | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | OAKW1.1   | A3.3.3   | CuCuages CP16.1 | D32.1.6.6 |
| Cu                               |      |        |        |        |        | A1.4.1 | KW        | A3.3.3   |                 | D32.1.6.8 |
| Fe                               | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | OAKW1.1   | A3.3.3   | FeFeges CP16.1  | D17.1.6.2 |
| Fe                               |      |        |        |        |        | A1.4.1 | KW        | A3.3.3   |                 | D17.1.6.4 |

(Fortsetzung Tabelle 37b)

| Parameter            | Probenvorbereitungsmethoden |        |                   |        | Mahlen | Untersuchungsmethoden |         | Elementbestimmungsmethoden |                |           |
|----------------------|-----------------------------|--------|-------------------|--------|--------|-----------------------|---------|----------------------------|----------------|-----------|
|                      | Trocknen<br>Methode         | HFA    | Sielen<br>Methode | HFA    |        | Methode               | HFA     | Methode                    | HFA            |           |
| K                    | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3                     | KKgesICP16.1   | D30.1.6.4 |
| K                    |                             |        |                   |        |        | A1.4.1                | KW      | A3.3.3                     |                | D30.1.6.4 |
| Mg                   | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3                     | MgNagesICP16.1 | D36.1.6.2 |
| Mg                   |                             |        |                   |        |        | A1.4.1                | KW      | A3.3.3                     |                | D36.1.6.2 |
| Mn                   | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3                     | MnMngesICP16.1 | D37.1.6.3 |
| Mn                   |                             |        |                   |        |        | A1.4.1                | KW      | A3.3.3                     |                | D37.1.6.3 |
| Na                   | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3                     | NaNagesICP16.1 | D39.1.6.4 |
| Na                   |                             |        |                   |        |        | A1.4.1                | KW      | A3.3.3                     |                | D39.1.6.4 |
| Ni                   | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3                     | NiNigesICP16.1 | D42.1.6.6 |
| Ni                   |                             |        |                   |        |        | A1.4.1                | KW      | A3.3.3                     |                | D42.1.6.8 |
| P                    | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3                     | PPgesICP16.1   | D44.1.6.1 |
| P                    |                             |        |                   |        |        | A1.4.1                | KW      | A3.3.3                     |                | D44.1.6.1 |
| Pb                   | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3                     | PbPbgesICP16.1 | D6.1.6.6  |
| Pb                   |                             |        |                   |        |        | A1.4.1                | KW      | A3.3.3                     |                | D6.1.6.7  |
| S                    | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3                     | SSgesICP16.1   | D54.1.6.1 |
| S                    |                             |        |                   |        |        | A1.4.1                | KW      | A3.3.3                     |                | D54.1.6.1 |
| Zn                   | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1                | OAKW1.1 | A3.3.3                     | ZnZngesICP16.1 | D73.1.6.4 |
| Zn                   |                             |        |                   |        |        | A1.4.1                | KW      | A3.3.3                     |                | D73.1.6.6 |
| <b>Gesamtgehalte</b> |                             |        |                   |        |        |                       |         |                            |                |           |
| Al                   | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1                | DANF1.1 | A3.3.1                     | AlAlgesICP16.1 | D1.1.6.2  |
| Ca                   | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1                | DANF1.1 | A3.3.1                     | CaCaGesICP16.1 | D11.1.6.3 |
| Cd                   | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1                | DANF1.1 | A3.3.1                     | CdCdGesAA88.1  | D9.1.6.3  |
| Co                   | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1                | DANF1.1 | A3.3.1                     | CoCoGesICP16.1 | D15.1.6.6 |



(Fortsetzung Tabelle 37b)

|                         |      |        |        |        |        |        |           |        |                |           |
|-------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|--------|----------------|-----------|
| Cr                      | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | DANF1.1   | A3.3.1 | CrCgesICP16.1  | D14.1.6.5 |
| Cu                      | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | DANF1.1   | A3.3.1 | CuCuGesICP16.1 | D32.1.6.6 |
| Fe                      | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | DANF1.1   | A3.3.1 | FeFegesICP16.1 | D17.1.6.2 |
| K                       | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | DANF1.1   | A3.3.1 | KKgesICP16.1   | D30.1.6.4 |
| Mg                      | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | DANF1.1   | A3.3.1 | MgMggesICP16.1 | D36.1.6.2 |
| Mn                      | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | DANF1.1   | A3.3.1 | MnMngesICP16.1 | D37.1.6.3 |
| Na                      | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | DANF1.1   | A3.3.1 | NaNagesICP16.1 | D39.1.6.4 |
| Ni                      | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | DANF1.1   | A3.3.1 | NiNigesICP16.1 | D42.1.6.6 |
| P                       | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | DANF1.1   | A3.3.1 | PPgesICP16.1   | D44.1.6.1 |
| Pb                      | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | DANF1.1   | A3.3.1 | PbPbgesICP16.1 | D6.1.6.6  |
| S                       | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | DANF1.1   | A3.3.1 | SSgesICP16.1   | D54.1.6.1 |
| Zn                      | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | DANF1.1   | A3.3.1 | ZnZngesICP16.1 | D73.1.6.4 |
| <b>Elementaranalyse</b> |      |        |        |        |        |        |           |        |                |           |
| C                       | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | ATNULL    | x      | CCgesCNS5.1    | D31.1.1.1 |
| N                       | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | ATNULL    | x      | NNgesCNS5.1    | D58.1.1.1 |
| <b>Carbonat-Gehalt</b>  |      |        |        |        |        |        |           |        |                |           |
| C-CO3                   | T3.1 | A1.2.1 | SBP2.1 | A1.3.2 | MBP1.1 | A1.4.1 | ATNULLCO3 | x      | CCO3C1.1       | D31.3.1.3 |

(Fortsetzung Tabelle 37)

| Parameter                               | Probenvorbereitungsmethoden |        |                   | Mahlen | Untersuchungsmethoden |         |            | Elementbestimmungsmethoden |           |           |
|---|-----------------------------|--------|-------------------|--------|-----------------------|---------|------------|----------------------------|-----------|-----------|
|   | Trocknen<br>Methode         | HFA    | Sieben<br>Methode |        | HFA                   | Methode | HFA        | Methode                    | Methode   | HFA       |
| <b>pH-Wert (H<sub>2</sub>O)</b>         |                             |        |                   |        |                       |         |            |                            |           |           |
| pH                                      | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | x                     |         | pHH2O6.1   | A3.1.1.2                   | HH+PHM5.1 | D76.1.5.1 |
|   |                             |        |                   |        |                       |         |            |                            | HH+PHM7.1 | D76.1.5.1 |
| <b>pH-Wert (CaCl<sub>2</sub>)</b>       |                             |        |                   |        |                       |         |            |                            |           |           |
| pH                                      | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | x                     |         | pHCaCl26.1 | A3.1.1.7                   | HH+PHM5.1 | D76.1.5.1 |
|   |                             |        |                   |        |                       |         |            |                            | HH+PHM7.1 | D76.1.5.1 |
| <b>pH-Wert (KCl)</b>                    |                             |        |                   |        |                       |         |            |                            |           |           |
| pH                                      | T3.1                        | A1.2.1 | SBP2.1            | A1.3.2 | x                     |         | pHKCl6.1   | A3.1.1.4                   | HH+PHM5.1 | D76.1.5.1 |
| <b>Trockenrohhdichte des Feinbodens</b> |                             |        |                   |        |                       |         |            |                            |           |           |
| TRDF                                    | T5.1                        | x      | x                 | x      | x                     |         | TRDF2.1    | A2.8                       | x         | x         |
| <b>Skelettanteil</b>                    |                             |        |                   |        |                       |         |            |                            |           |           |
| SKA                                     | T5.1                        | x      | x                 | x      | x                     |         | TRDF2.1    | A2.8                       | x         | x         |

Tabelle 37c: Angewandte Methoden bei der BZE I in Sachsen-Anhalt, Probenart Humus

| Parameter                         | Probenvorbereitungsmethoden |        |                   |        | Untersuchungsmethoden |        |                |           | Elementbestimmungsmethoden |     |         |     |
|-----------------------------------|-----------------------------|--------|-------------------|--------|-----------------------|--------|----------------|-----------|----------------------------|-----|---------|-----|
|                                   | Trocknen<br>Methode         | HFA    | Sieben<br>Methode | HFA    | Mahlen<br>Methode     | HFA    | Methode        | HFA       | Methode                    | HFA | Methode | HFA |
| <b>Austauschbare Kationen</b>     |                             |        |                   |        |                       |        |                |           |                            |     |         |     |
| Al                                | x                           | x      | x                 | x      | x                     | x      | x              | x         | x                          | x   | x       | x   |
| Ca                                | x                           | x      | x                 | x      | x                     | x      | x              | x         | x                          | x   | x       | x   |
| Fe                                | x                           | x      | x                 | x      | x                     | x      | x              | x         | x                          | x   | x       | x   |
| K                                 | x                           | x      | x                 | x      | x                     | x      | x              | x         | x                          | x   | x       | x   |
| Mg                                | x                           | x      | x                 | x      | x                     | x      | x              | x         | x                          | x   | x       | x   |
| Mn                                | x                           | x      | x                 | x      | x                     | x      | x              | x         | x                          | x   | x       | x   |
| Na                                | x                           | x      | x                 | x      | x                     | x      | x              | x         | x                          | x   | x       | x   |
| pH                                | x                           | x      | x                 | x      | x                     | x      | x              | x         | x                          | x   | x       | x   |
| <b>Säureextrakt Salpetersäure</b> |                             |        |                   |        |                       |        |                |           |                            |     |         |     |
| Cd                                | A1.2.1                      | A1.3.1 | A1.4.1            | DA     | A3.3.4                | AAS-G  |                |           |                            |     |         |     |
| Cu                                | A1.2.1                      | A1.3.1 | A1.4.1            | DA     | A3.3.4                | AAS-G  |                |           |                            |     |         |     |
| Pb                                | A1.2.1                      | A1.3.1 | A1.4.1            | DA     | A3.3.4                | AAS-G  |                |           |                            |     |         |     |
| Zn                                | A1.2.1                      | A1.3.1 | A1.4.1            | DA     | A3.3.4                | AAS    |                |           |                            |     |         |     |
| <b>Säureextrakt Königswasser</b>  |                             |        |                   |        |                       |        |                |           |                            |     |         |     |
| Al                                | A1.2.1                      | A1.3.1 | MBP1.1            | A1.4.1 | OAKW1.1               | A3.3.3 | AlAlgesICP19.1 | D1.1.6.2  |                            |     |         |     |
| Ca                                | A1.2.1                      | A1.3.1 | MBP1.1            | A1.4.1 | OAKW1.1               | A3.3.3 | CaCagesICP19.1 | D11.1.6.3 |                            |     |         |     |
| Cd                                | A1.2.1                      | A1.3.1 | MBP1.1            | A1.4.1 | OAKW1.1               | A3.3.3 | CdCdgesAAS8.1  | D9.1.6.3  |                            |     |         |     |
| Co                                | A1.2.1                      | A1.3.1 | MBP1.1            | A1.4.1 | OAKW1.1               | A3.3.3 | CoCogesICP19.1 | D15.1.6.6 |                            |     |         |     |
| Cr                                | A1.2.1                      | A1.3.1 | MBP1.1            | A1.4.1 | OAKW1.1               | A3.3.3 | CrCrgesICP19.1 | D14.1.6.5 |                            |     |         |     |
| Cu                                | A1.2.1                      | A1.3.1 | MBP1.1            | A1.4.1 | OAKW1.1               | A3.3.3 | CuCuGesICP19.1 | D32.1.6.6 |                            |     |         |     |
| Fe                                | A1.2.1                      | A1.3.1 | MBP1.1            | A1.4.1 | OAKW1.1               | A3.3.3 | FeFeGesICP19.1 | D17.1.6.2 |                            |     |         |     |
| K                                 | A1.2.1                      | A1.3.1 | MBP1.1            | A1.4.1 | OAKW1.1               | A3.3.3 | KKgesICP19.1   | D30.1.6.4 |                            |     |         |     |

(Fortsetzung Tabelle 37c)

| Parameter | Probenvorbereitungsmethoden |        |                   |        | Untersuchungsmethoden |        |         | Elementbestimmungsmethoden |                 |
|-----------|-----------------------------|--------|-------------------|--------|-----------------------|--------|---------|----------------------------|-----------------|
|           | Trocknen<br>Methode         | HFA    | Sieben<br>Methode | HFA    | Mahlen<br>Methode     | HFA    | Methode | HFA                        | Methode         |
| Mg        | A1.2.1                      | A1.2.1 | A1.3.1            | A1.3.1 | MBP1.1                | A1.4.1 | OAKW1.1 | A3.3.3                     | MgVggesICP19.1  |
| Mn        | A1.2.1                      | A1.2.1 | A1.3.1            | A1.3.1 | MBP1.1                | A1.4.1 | OAKW1.1 | A3.3.3                     | MnMngesICP19.1  |
| Na        | A1.2.1                      | A1.2.1 | A1.3.1            | A1.3.1 | MBP1.1                | A1.4.1 | OAKW1.1 | A3.3.3                     | NaNagesICP19.1  |
| Ni        | A1.2.1                      | A1.2.1 | A1.3.1            | A1.3.1 | MBP1.1                | A1.4.1 | OAKW1.1 | A3.3.3                     | NiNiggesICP16.2 |
| P         | A1.2.1                      | A1.2.1 | A1.3.1            | A1.3.1 | MBP1.1                | A1.4.1 | OAKW1.1 | A3.3.3                     | PPgesICP16.2    |
| Pb        | A1.2.1                      | A1.2.1 | A1.3.1            | A1.3.1 | MBP1.1                | A1.4.1 | OAKW1.1 | A3.3.3                     | PbPbggesICP19.1 |
| S         | A1.2.1                      | A1.2.1 | A1.3.1            | A1.3.1 | MBP1.1                | A1.4.1 | OAKW1.1 | A3.3.3                     | SSgesICP19.1    |
| Zn        | A1.2.1                      | A1.2.1 | A1.3.1            | A1.3.1 | MBP1.1                | A1.4.1 | OAKW1.1 | A3.3.3                     | ZnZngesICP19.1  |

**Gesamtgehalte**

|    |        |        |        |        |  |        |     |  |     |
|----|--------|--------|--------|--------|--|--------|-----|--|-----|
| Al | A1.2.1 | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.3.1 |  | A1.4.1 | G/A |  | AAS |
| Ca | A1.2.1 | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.3.1 |  | A1.4.1 | G/A |  | AAS |
| Fe | A1.2.1 | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.3.1 |  | A1.4.1 | G/A |  | AAS |
| K  | A1.2.1 | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.3.1 |  | A1.4.1 | G/A |  | AAS |
| Mg | A1.2.1 | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.3.1 |  | A1.4.1 | G/A |  | AAS |
| Mn | A1.2.1 | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.3.1 |  | A1.4.1 | G/A |  | AAS |
| Na | A1.2.1 | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.3.1 |  | A1.4.1 | G/A |  | AAS |
| P  | A1.2.1 | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.3.1 |  | A1.4.1 | G/A |  | AAS |

**Elementaranalyse**

|   |        |        |        |        |  |        |                 |   |  |
|---|--------|--------|--------|--------|--|--------|-----------------|---|--|
| C | A1.2.1 | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.3.1 |  | A1.4.1 | nasse Oxidation | x |  |
| N | A1.2.1 | A1.2.1 | A1.3.1 | A1.3.1 |  | A1.4.1 | Kjeldahl        | x |  |

**Carbonat-Gehalt**

|       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C-CO3 | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

(Fortsetzung Tabelle 37c)

|                        |   |        |        |   |   |       |          |   |           |
|------------------------|---|--------|--------|---|---|-------|----------|---|-----------|
| <b>pH-Wert (H2O)</b>   |   |        |        |   |   |       |          |   |           |
| pH                     |   | A1.2.1 | A1.3.1 | x | x | pH    | A3.1.1.1 |   | D76.1.4.1 |
| <b>pH-Wert (CaCl2)</b> |   |        |        |   |   |       |          |   |           |
| pH                     | x | x      | x      | x | x | x     | x        | x | x         |
| <b>pH-Wert (KCl)</b>   |   |        |        |   |   |       |          |   |           |
| pH                     |   | A1.2.1 | A1.3.1 | x | x | pH    | A3.1.1.3 |   | D76.1.5.1 |
| <b>Humusvorrat</b>     |   |        |        |   |   |       |          |   |           |
| X                      |   | A1.2.1 | x      | x | x | HV1.1 | A2.4     | x | x         |

Tabelle 37d: Angewandte Methoden bei der BZE II in Sachsen-Anhalt, Probenart Humus

| Parameter                        | Probenvorbereitungsmethoden |                   | Untersuchungsmethoden |         | Elementbestimmungsmethoden |                 |           |
|----------------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------|---------|----------------------------|-----------------|-----------|
|                                  | Trocknen<br>Methode         | Sieben<br>Methode | Mahlen<br>Methode     | Methode | Methode                    | Methode         |           |
| <b>Austauschbare Kationen</b>    |                             |                   |                       |         |                            |                 |           |
| Al                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | x       | AKH3.1                     | AlAlgesICP10.1  | D1.1.5.2  |
| Ca                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | x       | AKH3.1                     | CaCagesICP10.1  | D1.1.5.2  |
| Fe                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | x       | AKH3.1                     | FeFegesICP10.1  | D17.1.5.3 |
| K                                | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | x       | AKH3.1                     | KKgesICP10.1    | D30.1.5.4 |
| Mg                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | x       | AKH3.1                     | MgMggesICP10.1  | D36.1.5.2 |
| Mn                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | x       | AKH3.1                     | MnMngesICP10.1  | D37.1.5.3 |
| Na                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | x       | AKH3.1                     | NaNagesICP10.1  | D39.1.5.4 |
| pH                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | x       | AKH3.1                     | HH+2PHM4.1      | D76.1.5.1 |
| <b>Säureextrakt Königswasser</b> |                             |                   |                       |         |                            |                 |           |
| Al                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | MBP1.1  | OAKW1.1                    | AlAlgesICP16.1  | D1.1.6.2  |
| Ca                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | MBP1.1  | OAKW1.1                    | CaCagesICP16.1  | D11.1.6.3 |
| Cd                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | MBP1.1  | OAKW1.1                    | CdCdgesAAS8.1   | D9.1.6.3  |
| Co                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | MBP1.1  | OAKW1.1                    | CoCogesICP16.1  | D15.1.6.6 |
| Cr                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | MBP1.1  | OAKW1.1                    | CrCragesICP16.1 | D14.1.6.5 |
| Cu                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | MBP1.1  | OAKW1.1                    | CuCuagesICP16.1 | D32.1.6.6 |
| Fe                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | MBP1.1  | OAKW1.1                    | FeFegesICP16.1  | D17.1.6.2 |
| K                                | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | MBP1.1  | OAKW1.1                    | KKgesICP16.1    | D30.1.6.4 |
| Mg                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | MBP1.1  | OAKW1.1                    | MgMggesICP16.1  | D36.1.6.2 |
| Mn                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | MBP1.1  | OAKW1.1                    | MnMngesICP16.1  | D37.1.6.3 |
| Na                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | MBP1.1  | OAKW1.1                    | NaNagesICP16.1  | D39.1.6.4 |
| Ni                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | MBP1.1  | OAKW1.1                    | NiNiagesICP16.1 | D42.1.6.6 |
| P                                | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | MBP1.1  | OAKW1.1                    | PPagesICP16.1   | D44.1.6.1 |
| Pb                               | A1.2.1                      | SHBZE1.1          | A1.3.2                | MBP1.1  | OAKW1.1                    | PbPbgesICP16.1  | D6.1.6.6  |

(Fortsetzung Tabelle 37d)

| Parameter                         | Probenvorbereitungsmethoden |                    |                   |               | Untersuchungsmethoden |               |                |           | Elementbestimmungsmethoden |
|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------|---------------|-----------------------|---------------|----------------|-----------|----------------------------|
|                                   | Trocknen<br>Methode         | Sieben<br>Methode  | Mahlen<br>Methode | HFA           | HFA                   | Methode       | HFA            | Methode   |                            |
| S                                 | T4.1<br>A1.2.1              | SHBZE1.1<br>A1.3.2 | MBP1.1<br>A1.4.1  | HFA<br>A1.4.1 | OAKW1.1<br>A3.3.3     | HFA<br>A3.3.3 | SSgesICP16.1   | D54.1.6.1 |                            |
| Zn                                | T4.1<br>A1.2.1              | SHBZE1.1<br>A1.3.2 | MBP1.1<br>A1.4.1  | HFA<br>A1.4.1 | OAKW1.1<br>A3.3.3     | HFA<br>A3.3.3 | ZnZngesICP16.1 | D73.1.6.4 |                            |
| <b>Elementaranalyse</b>           |                             |                    |                   |               |                       |               |                |           |                            |
| C                                 | T4.1<br>A1.2.1              | SHBZE1.1<br>A1.3.2 | MBP1.1<br>A1.4.1  | HFA<br>A1.4.1 | ATNULL                | x             | CCgesCNS5.1    | D31.1.2.1 |                            |
| N                                 | T4.1<br>A1.2.1              | SHBZE1.1<br>A1.3.2 | MBP1.1<br>A1.4.1  | HFA<br>A1.4.1 | ATNULL                | x             | NNgesCNS5.1    | D58.1.2.1 |                            |
| <b>Carbonat-Gehalt</b>            |                             |                    |                   |               |                       |               |                |           |                            |
| CO <sub>3</sub> -C                | T4.1<br>A1.2.1              | SHBZE1.1<br>A1.3.2 | MBP1.1<br>A1.4.1  | HFA<br>A1.4.1 | ATNULL                | x             | CCO3C1.1       | D31.3.2.3 |                            |
| <b>pH-Wert (H<sub>2</sub>O)</b>   |                             |                    |                   |               |                       |               |                |           |                            |
| pH                                | T4.1<br>A1.2.1              | SHBZE1.1<br>A1.3.2 | x                 | x             | pHH2O6.1              | A3.1.1.2      | HH+PHM5.1      | D76.1.5.1 |                            |
| <b>pH-Wert (CaCl<sub>2</sub>)</b> |                             |                    |                   |               |                       |               |                |           |                            |
| pH                                | T4.1<br>A1.2.1              | SHBZE1.1<br>A1.3.2 | x                 | x             | pHCaCl26.1            | A3.1.1.7      | HH+PHM5.1      | D76.1.5.1 |                            |
| <b>pH-Wert (KCl)</b>              |                             |                    |                   |               |                       |               |                |           |                            |
| pH                                | T4.1<br>A1.2.1              | SHBZE1.1<br>A1.3.2 | x                 | x             | pHKCl6.1              | A3.1.1.4      | HH+PHM5.1      | D76.1.5.1 |                            |
| <b>Humusvorrat</b>                |                             |                    |                   |               |                       |               |                |           |                            |
| X                                 | T4.1<br>A1.2.1              | x                  | x                 | x             | HV4.1                 | A2.6          | x              | x         |                            |

Tabelle 37e: Angewandte Methoden bei der BZE I in Sachsen-Anhalt, Probenart Pflanze

| Parameter   | Probenvorbereitungsmethoden |                   |                   | Untersuchungsmethoden |                 |     | Elementbestimmungsmethoden |                      |         |     |
|---|-----------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|-----|----------------------------|----------------------|---------|-----|
|   | Trocknen<br>Methode         | Sieben<br>Methode | Mahlen<br>Methode | HFA                   | HFA             | HFA | Methode                    | HFA                  | Methode | HFA |
| <b>Säureextrakt Salpetersäure</b>                 |                             |                   |                   |                       |                 |     |                            |                      |         |     |
| Al  | B1.2.1                      | x                 |                   | B1.3.1                | DA              |     | x                          |                      | x       |     |
| Ca  | B1.2.1                      | x                 |                   | B1.3.1                | DA              |     | B3.2.1                     | AAS                  |         |     |
| Cd  | B1.2.1                      | x                 |                   | B1.3.1                | DA              |     | B3.2.1                     | AAS-G                |         |     |
| Co  | x                           | x                 |                   | x                     | x               |     | x                          | x                    |         | x   |
| Cr  | x                           | x                 |                   | x                     | x               |     | x                          | x                    |         | x   |
| Cu  | B1.2.1                      | x                 |                   | B1.3.1                | DA              |     | B3.2.1                     | AAS-G                |         |     |
| Fe  | B1.2.1                      | x                 |                   | B1.3.1                | DA              |     | B3.2.1                     | AAS                  |         |     |
| K   | B1.2.1                      | x                 |                   | B1.3.1                | DA              |     | B3.2.1                     | AAS                  |         |     |
| Mg  | B1.2.1                      | x                 |                   | B1.3.1                | DA              |     | B3.2.1                     | AAS                  |         |     |
| Mn  | B1.2.1                      | x                 |                   | B1.3.1                | DA              |     | B3.2.1                     | AAS                  |         |     |
| Na  | x                           | x                 |                   | x                     | x               |     | x                          | x                    |         | x   |
| Ni  | x                           | x                 |                   | x                     | x               |     | x                          | x                    |         | x   |
| P   | B1.2.1                      | x                 |                   | B1.3.1                | DA              |     | x                          | x                    |         | x   |
| Pb  | B1.2.1                      | x                 |                   | B1.3.1                | DA              |     | B3.2.1                     | AAS-G                |         |     |
| S   | x                           | x                 |                   | x                     | x               |     | x                          | x                    |         | x   |
| Zn  | B1.2.1                      | x                 |                   | B1.3.1                | DA              |     | B3.2.1                     | AAS                  |         |     |
| <b>Säureextrakt Salpetersäure + Perchlorsäure</b> |                             |                   |                   |                       |                 |     |                            |                      |         |     |
| P   |                             |                   |                   |                       | DA-PCI          |     |                            | Spektrophotometrisch |         |     |
| S   |                             |                   |                   |                       | DA-PCI          |     |                            | Gravimetrisch        |         |     |
| <b>Elementaranalyse</b>                           |                             |                   |                   |                       |                 |     |                            |                      |         |     |
| C   | B1.2.1                      | x                 |                   | B1.3.1                | nasse Oxidation |     | x                          |                      |         |     |
| N   | B1.2.1                      | x                 |                   | B1.3.1                | Kjeldahl        |     | x                          |                      |         |     |



(Fortsetzung Tabelle 37e)

|                      |   |  |   |  |   |  |   |  |   |  |   |   |
|----------------------|---|--|---|--|---|--|---|--|---|--|---|---|
| <b>Blattgewichte</b> |   |  |   |  |   |  |   |  |   |  |   |   |
| BGW                  | x |  | x |  | x |  | x |  | x |  | x | x |
| <b>Nadelgewichte</b> |   |  |   |  |   |  |   |  |   |  |   |   |
| NGW                  | x |  | x |  | x |  | x |  | x |  | x | x |

Tabelle 37f: Angewandte Methoden bei der BZE II in Sachsen-Anhalt, Probenart Pflanze

| Parameter                         | Probenvorbereitungsmethoden |        |                   | Untersuchungsmethoden |                   |        | Elementbestimmungsmethoden |        |                 |           |
|-----------------------------------|-----------------------------|--------|-------------------|-----------------------|-------------------|--------|----------------------------|--------|-----------------|-----------|
|                                   | Trocknen<br>Methode         | HFA    | Sieben<br>Methode | HFA                   | Mahlen<br>Methode | HFA    | Methode                    | HFA    | Methode         | HFA       |
| <b>Säureextrakt Salpetersäure</b> |                             |        |                   |                       |                   |        |                            |        |                 |           |
| Al                                | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | AlAgessICP15.1  | D1.1.6.2  |
| Ca                                | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | CaCagesICP15.1  | D11.1.6.3 |
| Cd                                | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | CdCagesICP15.1  | D9.1.6.4  |
| Co                                | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | CoCogessICP15.1 | D15.1.6.6 |
| Cr                                | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | CrCragesICP15.1 | D14.1.6.5 |
| Cu                                | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | CuCuagesICP15.1 | D32.1.6.6 |
| Fe                                | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | FeFeagesICP15.1 | D17.1.6.2 |
| K                                 | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | KKagesICP15.1   | D30.1.6.4 |
| Mg                                | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | MgMggesICP15.1  | D36.1.6.2 |
| Mn                                | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | MnMngesICP15.1  | D37.1.6.4 |
| Na                                | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | NaNagesICP15.1  | D39.1.6.4 |
| Ni                                | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | NiNiagesICP15.1 | D42.1.6.6 |
| P                                 | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | PPgesICP15.1    | D44.1.6.1 |
| Pb                                | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | PbPbgesICP15.1  | D6.1.6.6  |
| S                                 | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | SSgesICP15.1    | D54.1.6.1 |
| Zn                                | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | DAN2.2                     | B3.2.1 | ZnZngesICP15.1  | D73.1.6.4 |
| <b>Elementaranalyse</b>           |                             |        |                   |                       |                   |        |                            |        |                 |           |
| cC                                | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | ATNULL                     | x      | CCgesCNS5.1     | D31.1.3.1 |
| N                                 | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | B1.3.1                | MP3.2             | B1.3.1 | ATNULL                     | x      | NNgesCNS5.1     | D58.1.3.1 |
| <b>Blattgewichte</b>              |                             |        |                   |                       |                   |        |                            |        |                 |           |
| BGW                               | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | x                     | x                 | x      | BGW1.1                     | B2.3   | x               | x         |
| <b>Nadelgewichte</b>              |                             |        |                   |                       |                   |        |                            |        |                 |           |
| NGW                               | T4.1                        | B1.2.1 | x                 | x                     | x                 | x      | NWG1.2                     | B2.2   | x               | x         |

Tabelle 38a: Angewandte Methoden bei der BZE I in Sachsen-Anhalt: HFA-Methodencode, Probenart Boden

| Parameter                                | Probenvorbereitung                | Untersuchung    | Messung              |
|--|-----------------------------------|-----------------|----------------------|
| <b>Effektiv austauschbare Kationen</b>   |                                   |                 |                      |
| Al                                       | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Ca                                       | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Fe                                       | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| K  | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Mg                                       | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Mn                                       | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Na                                       | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| pH                                       | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;11;-9;-9;-9;-9;-9; |
| <b>Potentiell austauschbare Kationen</b> |                                   |                 |                      |
| Ca                                       | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;12;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;1;     |
| K  | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;12;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0;     |
| Mg                                       | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;12;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;2;     |
| Na                                       | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;12;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;1;     |
| Ba-Rücktausch                            | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;12;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;6;     |
| <b>Wässriger Extrakt</b>                 |                                   |                 |                      |
| Al                                       | x                                 | x               | x                    |
| Ca                                       | x                                 | x               | x                    |
| Cl                                       | x                                 | x               | x                    |
| Cges                                     | x                                 | x               | x                    |
| Canorg                                   | x                                 | x               | x                    |
| Fe                                       | x                                 | x               | x                    |
| K  | x                                 | x               | x                    |
| Leitfähigkeit                            | x                                 | x               | x                    |
| Mg                                       | x                                 | x               | x                    |
| Mn                                       | x                                 | x               | x                    |
| Na                                       | x                                 | x               | x                    |
| Nges                                     | x                                 | x               | x                    |
| NH4-N                                    | x                                 | x               | x                    |
| NO3-N                                    | x                                 | x               | x                    |
| Pges                                     | x                                 | x               | x                    |
| pH                                       | x                                 | x               | x                    |
| <b>Säureextrakt Salpetersäure</b>        |                                   |                 |                      |
| Cd                                       | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;14;2;2;  | D;2;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Cu                                       | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;14;2;2;  | D;2;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Pb                                       | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;14;2;2;  | D;2;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Zn                                       | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;14;2;2;  | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |

(Fortsetzung Tabelle 38a)

**Säureextrakt Königswasser**

|    |                                |                 |                  |
|----|--------------------------------|-----------------|------------------|
| Al | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Ca | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;5; |
| Cd | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;2;2;  |
| Co | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;1;0;  |
| Cr | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Cu | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Fe | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;1; |
| K  | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0; |
| Mg | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;2; |
| Mn | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;3; |
| Na | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0; |
| Ni | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| P  | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;1; |
| Pb | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;1;0;  |
| S  | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Zn | B1;-9;2;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;2; |

**Gesamtgehalte**

|    |                                |                  |                     |
|----|--------------------------------|------------------|---------------------|
| Al | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9; |
| Ca | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9; |
| Cd | x                              | x                | x                   |
| Co | x                              | x                | x                   |
| Cr | x                              | x                | x                   |
| Cu | x                              | x                | x                   |
| Fe | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9; |
| K  | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9; |

(Fortsetzung Tabelle 38a)

| <b>Gesamtgehalte</b>                  |                                |                   |                      |
|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------|
| Mg                                    | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9;  | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Mn                                    | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9;  | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Na                                    | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9;  | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Ni                                    | x                              | x                 | x                    |
| P                                     | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9;  | D;9;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Pb                                    | x                              | x                 | x                    |
| S                                     | x                              | x                 | x                    |
| Zn                                    | x                              | x                 | x                    |
| <b>Elementaranalyse</b>               |                                |                   |                      |
| C                                     | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;-9;-9;-9;-9;   | D;-9;-9;-9;-9;-9;-9; |
| N                                     | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;10;4;-9;   | D;-9;-9;-9;-9;-9;-9; |
| <b>Carbonat-Gehalt</b>                |                                |                   |                      |
| C-CO3                                 | x                              | x                 | x                    |
| <b>pH-Wert (H2O)</b>                  |                                |                   |                      |
| pH                                    | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;1;-3;-3;-3;    | D;11;-9;-9;-9;-9;-9; |
| <b>pH-Wert (CaCl2)</b>                |                                |                   |                      |
| pH                                    | x                              | x                 | x                    |
| <b>pH-Wert (KCl)</b>                  |                                |                   |                      |
| pH                                    | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;3;-3;-3;-3;    | D;11;-9;-9;-9;-9;-9; |
| <b>Trockenrohichte des Feinbodens</b> |                                |                   |                      |
| TRDF                                  | B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;   | C3;118;0-1;1-5;-3 | x                    |
| <b>Skelettanteil</b>                  |                                |                   |                      |
| SKA                                   | B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;   | C3;118;0-1;1-5;-3 | x                    |

Tabelle 38b: *Angewandte Methoden bei der BZE II in Sachsen-Anhalt: HFA-Methodencode, Probenart Boden*

| Parameter                                | Probenvorbereitung            | Untersuchung    | Messung           |
|--|-------------------------------|-----------------|-------------------|
| <b>Effektiv austauschbare Kationen</b>   |                               |                 |                   |
| Al                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0;  |
| Ca                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;4;1;2;2;-1;1;   |
| Fe                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;4;1;2;2;-1;1;   |
| K  | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0;  |
| Mg                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;2;  |
| Mn                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;4;1;2;2;-1;1;   |
| Na                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0;  |
| pH                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;11;-3;-3;-3; | D;11;0;0;2;2;-3;  |
| <b>Potentiell austauschbare Kationen</b> |                               |                 |                   |
| Ca                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;12;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;1;  |
| K  | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;12;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0;  |
| Mg                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;12;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;2;  |
| Na                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;12;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;1;  |
| Ba-Rücktausch                            | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;12;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;6;  |
| <b>Wässriger Extrakt</b>                 |                               |                 |                   |
| Al                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;1;  |
| Ca                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;1;  |
| Cl                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;22;4;1;4;-1;1;  |
| Cges                                     | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;8;2;1;4;7;-1;   |
|  |                               |                 | D;8;2;1;4;7;-1;   |
| Canorg                                   | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;8;2;1;3;-1;-1;  |
|  |                               |                 | D;8;2;1;3;-1;-1;  |
| Fe                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;1;  |
| K  | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0;  |
| Leitfähigkeit                            | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;12;1;3;2;-3;-3; |
| Mg                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;2;  |
| Mn                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;3;  |
| Na                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0;  |
| Nges                                     | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;8;2;3;4;7;-1;   |
|  |                               |                 | D;8;2;3;4;7;-1;   |
| NH4-N                                    | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;9;2;1;1;-1;1;   |
| NO3-N                                    | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;9;2;1;1;-1;0;   |
| Pges                                     | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;1;  |
| pH                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;30;-3;-3;-3; | D;11;0;0;2;2;-3;  |
| <b>Säureextrakt Königswasser</b>         |                               |                 |                   |
| Al                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0;  |
| Al                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;1;-1;-1;0;  |
| Ca                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;5;  |
| Ca                                       | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;1;-1;-1;5;  |

(Fortsetzung Tabelle 38b)

| <b>Säureextrakt Königswasser</b> |                             |                 |                  |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|
| Cd                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;2;1;4;2;7;0;   |
| Cd                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;5;1;1;-1;-1;0  |
| Co                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;1;0;  |
| Cr                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Cr                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;5;1;1;-1;-1;0  |
| Cu                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Cu                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;5;1;1;-1;-1;8  |
| Fe                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;1; |
| Fe                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;1;-1;-1;9  |
| K                                | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0; |
| K                                | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;1;-1;-1;0  |
| Mg                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;2; |
| Mg                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;1;-1;-1;2  |
| Mn                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;3; |
| Mn                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;1;-1;-1;0  |
| Na                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0; |
| Na                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;1;-1;-1;0  |
| Ni                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Ni                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;5;1;1;-1;-1;0  |
| P                                | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;1; |
| P                                | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;1;-1;-1;1  |
| Pb                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;1;0;  |
| Pb                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;5;1;1;-1;-1;2  |
| S                                | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| S                                | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;1;-1;-1;0  |
| Zn                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;4;1;  |
| Zn                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;4;2;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3; | D;5;1;1;-1;-1;0  |
| <b>Gesamtgehalte</b>             |                             |                 |                  |
| Al                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;50;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Ca                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;50;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;5; |
| Cd                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;50;-3;-3;-3; | D;2;1;4;2;7;0;   |
| Co                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;50;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;1;0;  |
| Cr                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;50;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Cu                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;50;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Fe                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;50;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;1; |
| K                                | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;50;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0; |
| Mg                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;50;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;2; |
| Mn                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;50;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;3; |
| Na                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;50;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0; |
| Ni                               | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3; | C1;50;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |

(Fortsetzung Tabelle 38b)

| <b>Gesamtgehalte</b>                  |                               |                   |                  |
|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|
| P                                     | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;50;-3;-3;-3;   | D;4;2;2;-1;-1;1; |
| Pb                                    | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;50;-3;-3;-3;   | D;4;2;2;-1;1;0;  |
| S                                     | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;50;-3;-3;-3;   | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Zn                                    | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;50;-3;-3;-3;   | D;4;2;2;-1;4;1;  |
| <b>Elementaranalyse</b>               |                               |                   |                  |
| C                                     | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1    | D;8;1;2;4;-2;-1; |
| N                                     | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1    | D;8;1;2;5;-2;-1; |
| <b>Carbonat-Gehalt</b>                |                               |                   |                  |
| C-CO <sub>3</sub>                     | B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1    | D;8;1;1;1;-1;-1; |
| <b>pH-Wert (H<sub>2</sub>O)</b>       |                               |                   |                  |
| pH                                    | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;2;-3;-3;-3;    | D;11;0;0;2;2;-3; |
|                                       |                               |                   | D;11;0;0;2;2;-3; |
| <b>pH-Wert (CaCl<sub>2</sub>)</b>     |                               |                   |                  |
| pH                                    | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;70;-3;-3;-3;   | D;11;0;0;2;2;-3; |
|                                       |                               |                   | D;11;0;0;2;2;-3; |
| <b>pH-Wert (KCl)</b>                  |                               |                   |                  |
| pH                                    | B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;4;-3;-3;-3;    | D;11;0;0;2;2;-3; |
| <b>Trockenrohichte des Feinbodens</b> |                               |                   |                  |
| TRDF                                  | B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;  | C3;118;0-1;1-5;-3 | x                |
| <b>Skelettanteil</b>                  |                               |                   |                  |
| SKA                                   | B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;  | C3;118;0-1;1-5;-3 | x                |



Tabelle 38c: Angewandte Methoden bei der BZE I in Sachsen-Anhalt: HFA-Methodencode, Probenart Humus

| Parameter                         | Probenvorbereitung             | Untersuchung     | Messung             |
|-----------------------------------|--------------------------------|------------------|---------------------|
| <b>Austauschbare Kationen</b>     |                                |                  |                     |
| Al                                | x                              | x                | x                   |
| Ca                                | x                              | x                | x                   |
| Fe                                | x                              | x                | x                   |
| K                                 | x                              | x                | x                   |
| Mg                                | x                              | x                | x                   |
| Mn                                | x                              | x                | x                   |
| Na                                | x                              | x                | x                   |
| pH                                | x                              | x                | x                   |
| <b>Säureextrakt Salpetersäure</b> |                                |                  |                     |
| Cd                                | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;53;-3;-3;-3;  | D;2;-9;-9;-9;-9;-9; |
| Cu                                | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;53;-3;-3;-3;  | D;2;-9;-9;-9;-9;-9; |
| Pb                                | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;53;-3;-3;-3;  | D;2;-9;-9;-9;-9;-9; |
| Zn                                | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;53;-3;-3;-3;  | D;1;-9;-9;-9;-9;-9; |
| <b>Säureextrakt Königswasser</b>  |                                |                  |                     |
| Al                                | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;2;2;-1;-1;0;    |
| Ca                                | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;1;2;-1;-1;0;    |
| Cd                                | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;2;1;4;2;7;0;      |
| Co                                | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;2;2;-1;1;0;     |
| Cr                                | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;2;2;-1;-1;0;    |
| Cu                                | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;2;2;-1;-1;0;    |
| Fe                                | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;1;2;-1;-1;1;    |
| K                                 | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;1;2;-1;-1;0;    |
| Mg                                | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;1;2;-1;-1;0;    |
| Mn                                | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;1;2;-1;-1;9;    |
| Na                                | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;1;2;-1;-1;0;    |
| Ni                                | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;2;2;-1;-1;0;    |
| P                                 | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;2;2;-1;-1;1;    |
| Pb                                | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;2;2;-1;-1;0;    |
| S                                 | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;2;2;-1;-1;0;    |
| Zn                                | B1;-9;3;-3;-3;-9;-9;3;3;-3;-3; | C1;52;-3;-3;-3;  | D;4;2;2;-1;4;1;     |
| <b>Gesamtgehalte</b>              |                                |                  |                     |
| Al                                | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9; |
| Ca                                | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9; |
| Fe                                | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9; |
| K                                 | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9; |
| Mg                                | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9; |

(Fortsetzung Tabelle 38c)

| <b>Gesamtgehalte</b>              |                                |                  |                      |
|-----------------------------------|--------------------------------|------------------|----------------------|
| Mn                                | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Na                                | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| P                                 | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;26;-9;-9; | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| <b>Elementaranalyse</b>           |                                |                  |                      |
| C                                 | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;-9;-9;-9;-9;  | D;-9;-9;-9;-9;-9;-9; |
| N                                 | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;10;4;-9;  | D;-9;-9;-9;-9;-9;-9; |
| <b>Carbonat-Gehalt</b>            |                                |                  |                      |
| C-CO <sub>3</sub>                 | x                              | x                | x                    |
| <b>pH-Wert (H<sub>2</sub>O)</b>   |                                |                  |                      |
| pH                                | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;1;-3;-3;-3;   | D;11;-9;-9;-9;-9;-9; |
| <b>pH-Wert (CaCl<sub>2</sub>)</b> |                                |                  |                      |
| pH                                | x                              | x                | x                    |
| <b>pH-Wert (KCl)</b>              |                                |                  |                      |
| pH                                | B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;3;-3;-3;-3;   | D;11;-9;-9;-9;-9;-9; |
| <b>Humusvorrat</b>                |                                |                  |                      |
| x                                 | B1;1;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;   | C3;114;-3;-3;-3  | x                    |

Tabelle 38d: Angewandte Methoden bei der BZE II in Sachsen-Anhalt: HFA-Methodencode, Probenart Humus

| Parameter                        | Probenvorbereitung            | Untersuchung    | Messung          |
|----------------------------------|-------------------------------|-----------------|------------------|
| <b>Austauschbare Kationen</b>    |                               |                 |                  |
| Al                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;19;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0; |
| Ca                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;19;-3;-3;-3; | D;4;1;2;2;-1;1;  |
| Fe                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;19;-3;-3;-3; | D;4;1;2;2;-1;1;  |
| K                                | B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;19;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0; |
| Mg                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;19;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;2; |
| Mn                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;19;-3;-3;-3; | D;4;1;2;2;-1;1;  |
| Na                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;19;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0; |
| pH                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;19;-3;-3;-3; | D;11;0;0;2;2;-3; |
| <b>Säureextrakt Königswasser</b> |                               |                 |                  |
| Al                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Ca                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;5; |
| Cd                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;2;1;4;2;7;0;   |
| Co                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;1;0;  |
| Cr                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Cu                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Fe                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;1; |
| K                                | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0; |
| Mg                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;2; |
| Mn                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;3; |
| Na                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;1;2;-1;-1;0; |
| Ni                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| P                                | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;1; |
| Pb                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| S                                | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Zn                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;52;-3;-3;-3; | D;4;2;2;-1;4;1;  |
| <b>Elementaranalyse</b>          |                               |                 |                  |
| C                                | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1  | D;8;1;2;4;-2;-1; |
| N                                | B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1  | D;8;1;2;5;-2;-1; |
| <b>Carbonat-Gehalt</b>           |                               |                 |                  |
| CO3-C                            | B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1  | D;8;1;1;1;-1;-1; |
| <b>pH-Wert (H2O)</b>             |                               |                 |                  |
| pH                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;2;-3;-3;-3;  | D;11;0;0;2;2;-3; |
| <b>pH-Wert (CaCl2)</b>           |                               |                 |                  |
| pH                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;7;-3;-3;-3;  | D;11;0;0;2;2;-3; |
| <b>pH-Wert (KCl)</b>             |                               |                 |                  |
| pH                               | B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3; | C1;4;-3;-3;-3;  | D;11;0;0;2;2;-3; |
| <b>Humusvorrat</b>               |                               |                 |                  |
| X                                | B1;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;  | C3;116;-3;-3;-3 | x                |

Tabelle 38e: *Angewandte Methoden bei der BZE I in Sachsen-Anhalt: HFA-Methodencode, Probenart Pflanze*

| Parameter   | Probenvorbereitung                | Untersuchung    | Messung              |
|---|-----------------------------------|-----------------|----------------------|
| <b>Säureextrakt Salpetersäure</b>                 |                                   |                 |                      |
| Al  | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | x               | x                    |
| Ca  | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;14;2;2;  | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Cd  | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;14;2;2;  | D;2;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Co  | x                                 | x               | x                    |
| Cr  | x                                 | x               | x                    |
| Cu  | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;14;2;2;  | D;2;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Fe  | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;14;2;2;  | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| K   | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;14;2;2;  | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Mg  | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;14;2;2;  | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Mn  | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;14;2;2;  | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| Na  | x                                 | x               | x                    |
| Ni  | x                                 | x               | x                    |
| P   | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | x               | x                    |
| Pb  | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;14;2;2;  | D;2;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| S   | x                                 | x               | x                    |
| Zn  | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;14;2;2;  | D;1;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| <b>Säureextrakt Salpetersäure + Perchlorsäure</b> |                                   |                 |                      |
| P   | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;12;2;2;  | D;9;-9;-9;-9;-9;-9;  |
| S   | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;12;2;2;  | D;19;-9;-9;-9;-9;-9; |
| <b>Elementaranalyse</b>                           |                                   |                 |                      |
| C   | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;-9;-9;-9;-9; | D;-9;-9;-9;-9;-9;-9; |
| N   | B2;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3; | C1;304;10;4;-9; | D;-9;-9;-9;-9;-9;-9; |
| <b>Blattgewichte</b>                              |                                   |                 |                      |
| BGW   | x                                 | x               | x                    |
| <b>Nadelgewichte</b>                              |                                   |                 |                      |
| NGW   | x                                 | x               | x                    |

Tabelle 38f: Angewandte Methoden bei der BZE II in Sachsen-Anhalt: HFA-Methodencode, Probenart Pflanze

| Parameter                         | Probenvorbereitung              | Untersuchung    | Messung          |
|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------|------------------|
| <b>Säureextrakt Salpetersäure</b> |                                 |                 |                  |
| Al                                | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;2;2;-1;2;2;  |
| Ca                                | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;1;2;-1;-1;5; |
| Cd                                | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;2;2;-1;1;0;  |
| Co                                | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;2;2;-1;1;0;  |
| Cr                                | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Cu                                | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Fe                                | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;2;2;-1;-1;1; |
| K                                 | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;1;2;-1;-1;0; |
| Mg                                | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;1;2;-1;-1;2; |
| Mn                                | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;1;2;-1;-1;9; |
| Na                                | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;1;2;-1;-1;0; |
| Ni                                | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| P                                 | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;2;2;-1;-1;1; |
| Pb                                | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;2;2;-1;1;0;  |
| S                                 | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;2;2;-1;-1;0; |
| Zn                                | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | C1;-1;-1;-1;-1; | D;4;2;2;-1;4;1;  |
| <b>Elementaranalyse</b>           |                                 |                 |                  |
| C                                 | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | x               | D;8;1;2;4;-2;-1; |
| N                                 | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;   | x               | D;8;1;2;5;-2;-1; |
| <b>Blattgewichte</b>              |                                 |                 |                  |
| BGW                               | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3; | C4;213;1;1;-3;  | x                |
| <b>Nadelgewichte</b>              |                                 |                 |                  |
| NGW                               | B2;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3; | C4;212;1;2;-3;  | x                |

Über die Vergleichbarkeit der bei der BZE I und BZE II angewandten Methoden gibt Tabelle 39 Auskunft.

Tabelle 39: Vergleichbarkeit der in den drei Bundesländern angewandten Probenvorbereitungs- und Untersuchungsmethoden (Boden, Humus, Pflanze) (x = nicht durchgeführt)

| Boden: Vergleichbarkeit der Probenvorbereitungs- und Untersuchungsmethoden |   |   |   |  |
|--|---|---|---|--|
|  | Vergleichbarkeit<br>BZE I/BZE II<br>Niedersachsen                       | Vergleichbarkeit<br>BZE I/BZE II<br>Hessen  | Vergleichbarkeit<br>BZE I/BZE II<br>Sachsen-Anhalt                                  | Vergleichbarkeit<br>zwischen allen drei<br>Ländern |
| <i>Probenvorbereitung</i>  |   |   |   |  |
| Trocknung  | vergleichbar  | vergleichbar  | vergleichbar  | vergleichbar                                       |
| Siebung  | vergleichbar  | vergleichbar  | vergleichbar  | vergleichbar                                       |
| Mahlung  | vergleichbar  | vergleichbar  | vergleichbar  | vergleichbar                                       |
| <i>Untersuchungsmethode</i>  |   |   |   |  |
| Eff. Austauschkapazität  | vergleichbar  | vergleichbar  | vergleichbar  | vergleichbar                                       |
| Pot. Austauschkapazität  | vergleichbar  | vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich die pot. Austauschkapazität durchgeführt | vergleichbar  | vergleichbar                                       |
| Wässriger 1:2 Extrakt  | vergleichbar  | vergleichbar  | liegt nur von der BZE II vor  | vergleichbar                                       |
| Gesamtaufschluss (Ca, Mg, Mn, Na, K, Al, Fe, P)                            | x   | x   | liegt nur von BZE I vor; vergleichbar mit Königswasser-aufschluss für Ca, Fe, Mn, P | x  |
| Druckaufschluss Salpetersäure (P)  | liegt nur von BZE I vor; vergleichbar mit Königswasser-aufschluss für P | x   | x   | x  |
| Druckaufschluss Salpetersäure (Cd, Cu, Pb, Zn)                             | x   | x   | liegt nur für BZE I vor; vergleichbar mit Königswasser-aufschluss für Zn, Cu, Pb    | x  |

(Fortsetzung Tabelle 39)

|                                  |  |   |   |   |
|----------------------------------|--|---|---|---|
| Königswasseraufschluss           | vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt   | vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt  | vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt  | vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt  |
| Königswasseraufschluss (P)       | x  | vergleichbar  | x   | x   |
| Elementaranalyse                 | vergleichbar   | vergleichbar  | vergleichbar  | vergleichbar  |
| pH-Werte                         | nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A3.1.1.1, Anhang 1; Methode A3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar                        | nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A3.1.1.1, Anhang 1; Methode A3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar | nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A3.1.1.1, Anhang 1; Methode A3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar | nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A3.1.1.1, Anhang 1; Methode A3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar |
| Trockenroh-dichte des Feinbodens | im Wesentlichen vergleichbar; allerdings wurde bei der BZE I mit einer Standard-Steindichte von 2,65 gerechnet, während bei der BZE II die jeweilige Steindichte bestimmt wurde  | liegt nur von der BZE II vor; für BZE I verwendet   | liegt nur von der BZE II vor; für BZE I verwendet   | im Wesentlichen vergleichbar  |
| Skelettanteil                    | nur Schätzungen bei der BZE I; liegt von der BZE II vor; für Punkte, die nur bei der BZE I beprobt wurden, wurden die Schätzungen der BZE I verwendet; für alle übrigen Punkte wurden die Messdaten der BZE II verwendet | nur Schätzungen bei der BZE I; liegt von der BZE II vor; für BZE I verwendet  | nur Schätzungen bei der BZE I; liegt von der BZE II vor; für BZE I verwendet  | Messdaten der BZE II wurden für BZE I und II verwendet; Ausnahme: Punkte der BZE I in Niedersachsen, die nur bei der BZE I beprobt wurden   |

(Fortsetzung Tabelle 39)

| <i>Elementbestimmungen</i>   |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
| Einzelelementbestimmungen  | vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden | vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden | vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden | vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden |
| Humus: Vergleichbarkeit der Probenvorbereitungs- und Untersuchungsmethoden |  |  |  |  |
|  | Vergleichbarkeit BZE I/BZE II Niedersachsen  | Vergleichbarkeit BZE I/BZE II Hessen   | Vergleichbarkeit BZE I/BZE II Sachsen-Anhalt   | Vergleichbarkeit zwischen allen drei Ländern   |
| <i>Probenvorbereitung</i>  |  |  |  |  |
| Trocknung  | vergleichbar   | vergleichbar   | vergleichbar   | vergleichbar   |
| Siebung  | nicht vergleichbar; bei der BZE I wurden die getrockneten Humusproben direkt durch ein 2 mm-Sieb gesiebt und der Rückstand verworfen; bei der BZE II wurde die Fraktion 2–20 mm geschreddert und   | nicht vergleichbar; bei der BZE I wurden die getrockneten Humusproben direkt durch ein 2 mm-Sieb gesiebt und der Rückstand verworfen; bei der BZE II wurde die Fraktion 2–20 mm geschreddert und   | nicht vergleichbar; bei der BZE I wurden die getrockneten Humusproben direkt durch ein 2 mm-Sieb gesiebt und der Rückstand verworfen; bei der BZE II wurde die Fraktion 2–20 mm geschreddert und   | vergleichbar jeweils für BZE I und BZE II zwischen den Ländern; Vergleich zwischen BZE I und BZE II siehe Anmerkungen bei den Ländern  |



(Fortsetzung Tabelle 39)

|   |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|
|   | vor dem Mahlen mit der Fraktion > 2 mm vereint. Dies führt zu einer „Verdünnung“ der Gehalte an Nährstoffen und Schwermetallen wegen des größeren Holzanteils der Fraktion 2–20 mm. Eine Untersuchung von Fortmann u. König (HFA, Methode A1.2.3, Anhang 1) dazu hat ergeben, dass dadurch die Vorräte der jeweiligen Elemente um bis zu 10 % bezogen auf den Gesamtvorrat der Humusaufgabe bei der BZE I überschätzt werden | vor dem Mahlen mit der Fraktion > 2 mm vereint. Dies führt zu einer „Verdünnung“ der Gehalte an Nährstoffen und Schwermetallen wegen des größeren Holzanteils der Fraktion 2–20 mm. Eine Untersuchung von Fortmann u. König (HFA, Methode A1.2.3, Anhang 1) dazu hat ergeben, dass dadurch die Vorräte der jeweiligen Elemente um bis zu 10 % bezogen auf den Gesamtvorrat der Humusaufgabe bei der BZE I überschätzt werden | vor dem Mahlen mit der Fraktion > 2 mm vereint. Dies führt zu einer „Verdünnung“ der Gehalte an Nährstoffen und Schwermetallen wegen des größeren Holzanteils der Fraktion 2–20 mm. Eine Untersuchung von Fortmann u. König (HFA, Methode A1.2.3, Anhang 1) dazu hat ergeben, dass dadurch die Vorräte der jeweiligen Elemente um bis zu 10 % bezogen auf den Gesamtvorrat der Humusaufgabe bei der BZE I überschätzt werden |  |
| Mahlung   | vergleichbar   | vergleichbar   | vergleichbar   | vergleichbar                                 |
| <i>Untersuchungsmethode</i>                     |  |  |  |  |
| Austauschkapazität Humus                        | liegt nur von der BZE II vor   | liegt nur von der BZE II vor   | liegt nur von der BZE II vor   | vergleichbar für BZE II zwischen den Ländern |
| Gesamtaufschluss (Ca, Mg, Mn, Na, K, Al, Fe, P) | x  | x  | liegt nur von der BZE I vor; vergleichbar mit Königswasseraufschluss für Ca, Mg, Fe, Mn, P   | x  |
| Druckaufschluss Salpetersäure                   | liegt nur von der BZE I vor; prinzipiell vergleichbar mit Königswasseraufschluss für die Elemente Ca, Mn, Fe, P, S, Cu, Co,  | x  | x  | x  |

(Fortsetzung Tabelle 39)

|  |   |   |   |  |
|--|---|---|---|--|
|  | Cd, Pb, Zn; allerdings sind die Humusproben der BZE I und II wegen der unterschiedlichen Siebung nicht vergleichbar (siehe Siebung)   |   |   |  |
| Druckaufschluss Salpetersäure (Cd, Cu, Pb, Zn) | x   | x   | liegt nur von der BZE I vor; vergleichbar mit Königswasseraufschluss  | x  |
| Königswasseraufschluss                         | prinzipiell vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt; allerdings sind die Humusproben der BZE I und II wegen der unterschiedlichen Siebung nicht vergleichbar (siehe Siebung) | prinzipiell vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt; allerdings sind die Humusproben der BZE I und II wegen der unterschiedlichen Siebung nicht vergleichbar (siehe Siebung) | prinzipiell vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt; allerdings sind die Humusproben der BZE I und II wegen der unterschiedlichen Siebung nicht vergleichbar (siehe Siebung) | prinzipiell zwischen den 3 Ländern vergleichbar; an den Proben der BZE I wurde nachträglich der Königswasseraufschluss durchgeführt; allerdings sind die Humusproben der BZE I und II wegen der unterschiedlichen Siebung nicht vergleichbar (siehe Siebung) |
| Elementaranalyse                               | vergleichbar  | vergleichbar  | vergleichbar  | vergleichbar   |
| pH-Werte                                       | nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A3.1.1.1, Anhang 1; Methode A3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar                                     | nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A3.1.1.1, Anhang 1; Methode A3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar                                     | nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A3.1.1.1, Anhang 1; Methode A3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar                                     | nicht vergleichbar; es erfolgte eine Umrechnung auf Basis von Methodenvergleichen (HFA, Methode A3.1.1.1, Anhang 1; Methode A3.1.1.3, Anhang 1; Methode A.3.1.1.5, Anhang 1); danach vergleichbar  |

(Fortsetzung Tabelle 39)

|                            |  |  |  |  |
|----------------------------|--|--|--|--|
| Humusvorrat                | vergleichbar, wenn die Summe aus Feinhumusvorrat und organischer Restfraktion aus der BZE II mit dem Humusvorrat der BZE I verglichen wird   | vergleichbar, wenn die Summe aus Feinhumusvorrat und organischer Restfraktion aus der BZE II mit dem Humusvorrat der BZE I verglichen wird   | vergleichbar, wenn die Summe aus Feinhumusvorrat und organischer Restfraktion aus der BZE II mit dem Humusvorrat der BZE I verglichen wird   | vergleichbar, wenn die Summe aus Feinhumusvorrat und organischer Restfraktion aus der BZE II mit dem Humusvorrat der BZE I verglichen wird   |
| <i>Elementbestimmungen</i> |  |  |  |  |
| Einzelelementbestimmungen  | vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden | vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden | vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden | vergleichbar; im Rahmen der Streuung von ca. 10 % sind die Elementbestimmungen an den verschiedenen Geräten auch bei Geräte- und Methodenwechsel vergleichbar; für einzelne Elemente kann es bei Einzelproben auf Grund unterschiedlicher Matrixeinflüsse und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden |

(Fortsetzung Tabelle 39)

| Pflanze: Vergleichbarkeit der Probenvorbereitungs- und Untersuchungsmethoden |   |  |  |  |
|--|---|--|--|--|
|  | Vergleichbarkeit<br>BZE I/BZE II<br>Niedersachsen | Vergleichbarkeit<br>BZE I/BZE II<br>Hessen | Vergleichbarkeit<br>BZE I/BZE II<br>Sachsen-Anhalt | Vergleichbarkeit<br>zwischen allen drei<br>Ländern |
| <i>Probenvor-<br/>bereitung</i>  |   |  |  |  |
| Trocknung  | vergleichbar                                      | liegt nur von der<br>BZE II vor            | vermutlich ver-<br>gleichbar                       | soweit vorhanden<br>vergleichbar                   |
| Siebung  | vergleichbar                                      | liegt nur von der<br>BZE II vor            | vermutlich ver-<br>gleichbar                       | soweit vorhanden<br>vergleichbar                   |
| Mahlung  | vergleichbar                                      | liegt nur von der<br>BZE II vor            | vermutlich ver-<br>gleichbar                       | soweit vorhanden<br>vergleichbar                   |

(Fortsetzung Tabelle 39)

|   |   |                                 |   |   |
|---|---|---------------------------------|---|---|
| <i>Untersu-<br/>chungsmethode</i>       |   |                                 |   |   |
| Druckauf-<br>schluss Salpe-<br>tersäure | vergleichbar  | liegt nur von der<br>BZE II vor | vergleichbar  | soweit vorhanden<br>vergleichbar  |
| Elementar-<br>analyse                   | vergleichbar  | liegt nur von der<br>BZE II vor | vergleichbar  | soweit vorhanden<br>vergleichbar  |
| Nadel-/Blatt-<br>gewichte               | vergleichbar  | liegt nur von der<br>BZE II vor | liegt nur von der<br>BZE II vor   | soweit vorhanden<br>vergleichbar  |
| <i>Elementbe-<br/>stimmungen</i>        |   |                                 |   |   |
| Einzelele-<br>mentbestim-<br>mungen     | vergleichbar; im<br>Rahmen der Streu-<br>ung von ca. 10 %<br>sind die Element-<br>bestimmungen an<br>den verschiedenen<br>Geräten auch bei<br>Geräte- und Me-<br>thodenwechsel ver-<br>gleichbar; für einzel-<br>ne Elemente<br>kann es bei Einzel-<br>proben auf Grund<br>unterschiedlicher<br>Matrixeinflüsse<br>und deren unter- | liegt nur von der<br>BZE II vor | vergleichbar; im<br>Rahmen der Streu-<br>ung von ca. 10 %<br>sind die Element-<br>bestimmungen an<br>den verschiedenen<br>Geräten auch bei<br>Geräte- und Me-<br>thodenwechsel ver-<br>gleichbar; für einzel-<br>ne Elemente<br>kann es bei Einzel-<br>proben auf Grund<br>unterschiedlicher<br>Matrixeinflüsse<br>und deren unter- | soweit vorhanden<br>vergleichbar; im<br>Rahmen der Streu-<br>ung von ca. 10 %<br>sind die Element-<br>bestimmungen an<br>den verschiedenen<br>Geräten auch bei<br>Geräte- und Me-<br>thodenwechsel ver-<br>gleichbar; für einzel-<br>ne Elemente<br>kann es bei Einzel-<br>proben auf Grund<br>unterschiedlicher<br>Matrixeinflüsse |

(Fortsetzung Tabelle 39)

|  |   |  |   |  |
|--|---|--|---|--|
|  | schiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden |  | schiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden | und deren unterschiedlicher oder nicht erfolgter Korrektur zu Abweichungen kommen. Zur Klärung in Einzelfällen kann der Methodencode herangezogen werden |
|--|---|--|---|--|

## 11.2 Methodendokumentation und Qualitätssicherung in den beteiligten Laboren

Die Dokumentation der verwendeten Methoden und die Qualitätssicherung erfolgen in den Laboren auf unterschiedliche Weise.

### 11.2.1 *Umweltlabor der Nordwestdeutschen (früher: Niedersächsischen) Forstlichen Versuchsanstalt Göttingen*

Das Labor verfügt über ein Labor-Informations- und Management-System (LIMS) der Firma Analytik Jena (LabBase), dem ein im Hause entwickeltes Datenprüf- und Übertragungsprogramm RELAQS vorgeschaltet ist, das die Messdaten von den Analysegeräten nach verschiedenen Kriterien überprüft und dann an das LIMS überträgt. Beide Programme arbeiten auf einer Oracle-Datenbank.

Mit RELAQS werden Nachweis- und Bestimmungsgrenzen, negative Ergebnisse, Blindwerte, Kontrollstandards zur Eichungskontrolle, Standardmaterialien und doppelte Probennummern geprüft, um sofort durch Nachmessungen auf mögliche Fehler reagieren zu können. Das LIMS dient nicht nur der gesamten Datenspeicherung, sondern organisiert und dokumentiert auch den Durchlauf der Proben durch das Labor. Dabei muss jeder Arbeitsschritt und die jeweils angewandte Methode von der Probenvorbereitung bis zur Messung von den Labormitarbeitern dokumentiert werden. Alle Methoden sind in den Berichten des Forschungszentrums Waldökosysteme veröffentlicht (KÖNIG u. FORTMANN 1996, 1999, 2012, KÖNIG et al. 2009). Das LIMS erzeugt für jeden Messwert automatisch den sogenannten HFA-Code entsprechend der Vorschriften des Handbuchs Forstliche Analytik, eine 20-teilige Zeichenfolge, aus der die gesamte Analysenfolge ablesbar ist. Im LIMS werden weitere methodenübergreifende Qualitätsprüfungen durchgeführt. Neben den Standardmaterial-Prüfungen und der dazugehörigen Führung von Blindwert- und Mittelwert-Kontrollkarten erfolgen diverse Bilanzprüfungen (N-Bilanz, C-Bilanz, Na/Cl-Verhältnis, Ionen- und Leitfähigkeitsbilanz bei Wasserproben), pH-Plausibilitätsprüfungen und eine Kontrolle der Wiederholungsproben. Im Falle der

Nichteinhaltung vorgegebener Kriterien werden automatisch Nachmessungen vom System angestoßen.

Die externe Qualitätssicherung des Labors ist durch die regelmäßige Teilnahme an zahlreichen Ringanalysen sichergestellt, an denen das Labor jedes Jahr teilnimmt. Neben den Boden-, Pflanzen- und Wasser-Ringanalysen im Rahmen des europäischen ICP Forests-Programms beteiligt sich das Labor an den europäischen ISE- und EMEP-Ringanalysenprogrammen für Boden- bzw. Wasser-Ringanalysen.

Da zum Zeitpunkt der BZE I noch mit dem hausintern entwickelten LIMS-Vorläufer LAPIS gearbeitet wurde, in dem die Methodendokumentation noch nicht auf Einzelproben-Basis organisiert war, wurden sämtliche Labordaten der BZE I nachträglich in das LIMS überführt, die Methodendokumentation dabei vervollständigt und damit auf das gleiche Qualitätsniveau wie bei der BZE II gehoben.

Zur weiteren Auswertung wurden alle Labordaten der BZE I und BZE II in das forstökologische Datenbanksystem ECO (s. Kap. 12) übertragen, wo sie mit allen Metainformationen zur Probennahme, zum Probennahme-Punkt und den übrigen Erhebungen verknüpft wurden. Aus ECO erfolgte auch die Datenlieferung an das Institut für Waldökologie und Waldinventuren des Thünen-Instituts in Eberswalde für die bundesweite Auswertung der BZE-Daten.

### *11.2.2 Landesanstalt für Forstplanung Brandenburg, Labor Eberswalde*

Frank Gutwasser

Die Durchführung der BZE I fiel in die Nachwendezeit, die auch in Eberswalde durch gravierende Einschnitte und Veränderungen in der Wissenschaftslandschaft geprägt war. Eine Infrastruktur zur Datenspeicherung stand i. d. R. nicht zur Verfügung; Aufzeichnungen zur Analysemethodik und den Analysegeräten erfolgten nicht. Kontrollstandards, Kontrollproben und Wiederholungsproben wurden in jeder Labor-Serie mitgeführt; es wurden jedoch keine Blind- oder Mittelwertkontrollkarten geführt. Das Labor nahm auch an Ringversuchen teil, die sich jedoch auf andere Methoden bezogen.

### *11.2.3 Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL), Standort Kassel (und Vorläufer-Einrichtungen)*

Rolf Ellinghaus

Die HLVA Kassel, spätere LUFA Kassel im HDLGN und heutige LHL ist seit 1998 nach DIN 45001 und in der Folge ab 2000 nach der die DIN 45001 ablösenden DIN EN ISO 17025 akkreditiert. Sie organisiert und organisierte ihre Laborabläufe (über Prüfpläne, Standardarbeitsanweisungen, Prüfmethode etc.), ihre Dokumentenlenkung (über Qualitätsmanagement (QM), Intranet, Zuständigkeitspläne, Fort-

bildungsmanagement, QM-Reviews etc.), ihre Aufzeichnungs- und Messdatendokumentation (über Messgerätesoftware, Laborinformationsmanagementsysteme (LIMS), Rückverfolgbarkeitsaufzeichnungen, Gerätehandbücher etc.) und ihre Validierungen und Kalibrierungen (über Standardreferenzmaterialien, Standards und Blindproben, Ringuntersuchungen, Interne und Externe Audits, Kontrollkarten, Parameterbilanzen etc.) streng nach den Vorgaben der Internationalen Norm und wurde mehrfach erfolgreich reakkreditiert.

Datenhaltung, Plausibilitätskontrollen und Erstellung von Prüfberichten erfolgten bei der BZE I mit einem selbst entwickelten System „Labormanager“, bei der BZE II mit dem kommerziellen „WinLIMS“ der Fa. QSI. Beide LIMS-Systeme waren bzw. sind mit den wesentlichen Messsystemen der anorganischen Element- und Spurenanalytik über automatisierte Schnittstellen gekoppelt.

Alle Messungen erfolgten mindestens als Doppelbestimmungen, im Falle von nach Plausibilitätskontrollen (Wiederholbarkeiten, Wiederfindungen, Linearitäten, Messunsicherheiten, Analysenspielräume, Parameterbilanzen etc.) oder Fehlerfeststellungen (Referenzmaterialien, Standards, Blindwerte, Geräteunregelmäßigkeiten etc.) notwendigen Wiederholungsmessungen als weitere Doppelbestimmungen ggf. mit Ausreißertestung (Kalibrierungs-, Validierungs- und statistische Auswertesoftware SQS, Fa. PerkinElmer).

An Ringanalysen mit Forstböden-Matrix sind für die Untersuchungszeiträume der BZE I und BZE II insbesondere die internationalen ISE-, IPE-, ICP-Forests-, EMEP- und nationalen VDLUFA-Ringanalysen zu nennen, bei der BZE II zusätzlich das die BZE begleitende Ringanalysenprogramm des Gutachterausschusses Forstliche Analytik (GAFA). Eine gegenüber der BZE I bei der BZE II zusätzliche Validierung erfolgte durch Einsatz von durch den GAFA nach dem Ringversuchskriterium „Vergleichbarkeit“ ausgewählten Standards aus den Ringanalyseproben der GAFA-Ringanalysen begleitend zu den Probenaufarbeitungen und -messungen.

Weitere Ergebnisplausibilitätskontrollen erfolgten nach der Berichterstattung bei der BZE I bis 2000 bei der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt (HFV), später Hessische Landesanstalt für Forsteinrichtung, Waldforschung und Waldökologie (HLFWW), Hann. Münden, ab 2000 bei der Folgeeinrichtung Hessen-Forst, Forsteinrichtung, Information, Versuchswesen (FIV), Hann. Münden und für die BZE II bei der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), Göttingen.

### 11.2.4 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

Levke Godbersen

Die Datenspeicherung erfolgt in der BGR in einem hausweiten LIMS sowie in der bodenkundlichen Labor- und Profildatenbank der BGR. Diese Datenbank ist neben der Flächen- und der Methodendatenbank eine der drei tragenden Säulen des Fachinformationssystems FISBo BGR. Hier werden Ergebnisse der Bodenanalytik zusammen mit den dazugehörigen Profilbeschreibungen gespeichert. Dazu zählen neben bodenchemischen und bodenphysikalischen Informationen auch Daten zu organischen und anorganischen Stoffgehalten von Böden.

Die Qualitätssicherung (QS) der Messungen der mit Königswasser-extrahierbaren Stoffgehalte erfolgt laborintern zusätzlich zu den gerätespezifischen QS-Maßnahmen (z. B. Blank-Checks) über das Mitführen von Kontroll- und Blindwertproben, deren Monitoring eine zeitnahe Korrektur von Unregelmäßigkeiten ermöglicht. Zur externen Qualitätssicherung nimmt das Labor in regelmäßigen Abständen an internationalen Ringversuchen teil.

Vor der Auslieferung werden die Ergebnisse des Weiteren einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Dazu werden die Ergebnisse der zwei obersten Mineralbodenproben (0–5 und 5–10 cm) gegenübergestellt. Es wird die Differenz der Ergebnisse desselben Elements in Proben des gleichen Profils gebildet. Weichen die Ergebnisse > 100 % voneinander ab, werden die Daten einer manuellen Plausibilitätsprüfung (Sichtung) unterzogen. Bei niedrigen Konzentrationen ist eine Differenz von > 100 % nicht immer außergewöhnlich. Daher werden mittels Regressionsanalyse die kleinsten quadratischen Abweichungen der Datenpaare ( $y = \text{„0–5 cm“}$ ,  $x = \text{„5–10 cm“}$ ) bestimmt. Überschreiten die Residuen der Regressionsfunktion die Ausreißergrenze, werden die Daten einer weiteren Sichtung unterzogen.

Neben der statistischen Plausibilität wird anhand einer Zuordnung der Daten zu ihren jeweiligen Bodenausgangsgesteinsgruppen (BAG) und Klimaregionen die geochemische Plausibilität geprüft. Werte, die das 90. Perzentil der Hintergrundgehalte überschreiten, werden einer manuellen Sichtung unterzogen. Die Zuordnung zu BAG und Klimaregionen erfolgte mangels Vollständigkeit der Begleitinformation anhand der geographischen Koordinaten und auf Grundlage der Übersichtskarte der Bodenausgangsgesteinsgruppen im Maßstab 1:1.000.000 (BAG 1000). Kleinräumige Fehlzuordnungen und daraus folgende Fehlinterpretationen können aufgrund des kleinmaßstäbigen Kartenwerkes nicht ausgeschlossen werden.

Die Bewertung innerhalb der Sichtkontrolle erfolgte unter Berücksichtigung folgender Kriterien:

Vergleich von Analyseergebnissen aus ICP-MS und ICP-OES. Passen die Ergebnisse nicht zusammen, liegt eventuell eine Verwechslung, ein Verdünnungsfehler oder Eingabe- bzw. Übertragungsfehler vor.

Bewertung im Zusammenhang mit „Schwesterelementen“, also Elementen, die typischerweise eine hohe Korrelation aufweisen (z. B. Al, Mn und Fe). Unähnliche



Konzentrationsverläufe werden als unplausibel bewertet, und die Proben werden einer Wiederholungsmessung unterzogen.

Vergleich der Kohlenstoff-Gehalte (C-Gehalt). Die C-Gehalte sollten im Allgemeinen in der 0–5 cm-Probe höher als in der 5–10 cm-Probe sein. Ist dies nicht der Fall, liegt eventuell eine Verwechslung vor.

Konzentrationsverlauf von Elementen, die üblicherweise einen atmosphärischen Eintragspfad haben (z. B. Pb). Die Konzentration sollte mit zunehmender Tiefe abnehmen.

Bei starken Gradienten von Elementen, die üblicherweise keine graduelle Konzentrationsabnahme mit der Tiefe zeigen, wurde zusätzlich der C-Gehalt in Betracht gezogen. Hohe C-Gehalte bedingen meist eine geringe spezifische Dichte des Materials und somit ein höheres Volumen bei gleicher Einwaage. Dies kann Konzentrationsunterschiede bewirken.

Durchschnittlich war bei 16 % aller Werte eine Sichtkontrolle notwendig. Bei der Sichtkontrolle der Ergebnisse wurden ca. 25 % der statistischen und/oder geochemisch fragwürdigen Ergebnisse als de facto nicht plausibel eingestuft. D. h. 4 % aller Ergebnisse wurden einer Wiederholungsmessung unterzogen.

### 11.3 Bundesweites BZE II-Qualitätssicherungsprogramm

1988 wurde vom Bundeslandwirtschaftsministerium die Arbeitsgruppe Bodenanalyse gegründet, um durch Methodenvergleiche und -weiterentwicklungen und durch die Durchführung von Ringanalysen eine Methodenvereinheitlichung und -auswahl für die BZE I zu erreichen. Zur Qualitätssicherung wurden drei die BZE I begleitende Ringanalysen durchgeführt, deren Ergebnisse zur Ermittlung der Vergleichbarkeit der Daten aus den beteiligten Laboren herangezogen wurden (KÖNIG u. WOLFF 1993). Eine Zusammenfassung findet sich im Deutschen Waldbodenbericht 1996 (WOLFF u. RIEK 1997). Ein Ergebnis der Vergleichbarkeitsprüfung war, dass die Nährelementgehalte in den Humusproben wegen der unterschiedlichen zugelassenen Aufschlussmethoden nicht vergleichbar sind. Deshalb wurden – soweit wie möglich – die Humusproben aus der BZE I, die nicht mit dem Königswasseraufschluss aufgeschlossen worden waren, erneut aufgeschlossen und gemessen. Somit sind nun diese Daten vergleichbar mit denen der BZE II.

Zur Vorbereitung der BZE II wurde 2002 vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz der Gutachterausschuss Forstliche Analytik (GAFA) eingesetzt, um zum einen die Analysemethoden zu vereinheitlichen, festzulegen und zu dokumentieren und zum anderen ein Qualitätskontrollprogramm für die BZE II zu entwickeln und festzulegen. Sämtliche Analysemethoden der BZE I und II sowie des deutschen und des europäischen Forstlichen Umweltmonitoring-Programms und die Methoden der Bundesländer wurden daraufhin dokumentiert und im Handbuch Forstliche Analytik (HFA) erstmalig 2005 vom GAFA

veröffentlicht (GAFA 2005). Das HFA wurde mehrfach ergänzt und liegt in der neusten Version von 2014 vor (GAFA 2014).

Das beschlossene Qualitätssicherungsprogramm umfasste 5 die BZE II begleitende Ringanalysen (3 Boden- und 2 Humusringanalysen mit je 6 Proben) und die Mitführung von regelmäßig in die Probeserien integriertem Standardmaterial für jeden Erhebungsparameter. Dafür wurden große Mengen von 6 Standardmaterialien hergestellt und festgelegt, welches Material für welchen Parameter mitgemessen werden musste. Die Auswertung der Ringanalysen (zusammenfassende Darstellung in BLUM u. HEINBACH 2010) und der Untersuchungen der Standardmaterialien ergab, dass mit wenigen Ausnahmen die Analysedaten der Länder/Labore vergleichbar ausgewertet werden können (KÖNIG et al. 2014).

Ausgewertet und verglichen wurden zum einen die Streuungen innerhalb eines Labors und zum anderen die Mittelwerte aller Standardmessergebnisse pro Labor und Parameter (von 2005 bis 2012), und ob ein signifikanter zeitlicher linearer Trend bei den Messergebnissen festzustellen ist.

Darüber hinaus wurden aus den Daten der die BZE II begleitenden Ringversuche die Mittelwerte der Z-Scores aller Mittelwerte aus allen Ringversuchen für jede Einzelprobe für jedes Labor ermittelt und verglichen. Der Z-Score wird berechnet aus dem Quotienten der Differenz des jeweiligen Labormittelwertes ( $MW_{\text{Lab}}$ ) zum Mittelwert aller Labore ( $MW_{\text{ges}}$ ) und der Standardabweichung aller Labore:

$$Z\text{-Score} = (MW_{\text{Lab}} - MW_{\text{ges}}) / SD_{\text{ges}}$$

Er ist ein Maß für die Abweichung des Labormittelwertes vom Mittelwert aller Labore in Abhängigkeit von der Streuung unter den Laboren. Ist der Mittelwert der Z-Scores für ein Labor von Null verschieden, deutet das auf eine bedeutsame Abweichung zu Mehr- (Mittelwert positiv) oder Minderbefunden (Mittelwert negativ) im Vergleich zu den anderen Laboren hin.

Ziel dieser Auswertung war es, zu prüfen, ob Labore, bei denen stark abweichende Ergebnisse für bestimmte Parameter der Standardmessungen festgestellt wurden, auch bei den Ringversuchen auffällig abweichende Ergebnisse hatten. Findet nämlich ein Labor für einen Parameter bei dem über einen längeren Zeitraum mitgemessenen Standard deutlich niedrigere Werte als die anderen Labore, so kann dies im günstigen Fall an der speziellen Zusammensetzung des Standards liegen und somit standardprobenspezifisch sein. Allerdings ist es auch möglich, dass die verwendete Messmethode abweichende Ergebnisse im Vergleich zu den anderen Laboren liefert. Dies würde bedeuten, dass auch die Messergebnisse für die im Rahmen der BZE II gemessenen Proben nicht mit denen der anderen Labore/Länder vergleichbar sind. Dies müsste sich dann auch in den Ringversuchsergebnissen der betroffenen Labore niederschlagen, das heißt, es müsste ein Trend zu Mehr- oder Minderbefunden wie beim Standard erkennbar sein. Die Überprüfung eines solchen Trends erfolgte anhand der Z-Scores wie oben beschrieben.

Bezüglich der laborübergreifenden Auswertung der Standardmessungen kommt die Studie zu dem Schluss, dass mit wenigen Ausnahmen die BZE II-Datensätze der Labore/Länder unter Berücksichtigung vertretbarer Streuungen übergreifend auswertbar sind. Nur in 12 Einzelfällen (Kombination Labor – Parameter) muss damit gerechnet werden, dass für den jeweiligen Parameter die Daten eines Labors/Landes gerichtet von den Daten der übrigen Labore/Länder abweichen. Es handelt sich dabei um Daten jeweils eines Labors/Landes der Parameter N (B = Boden), Al, Ca, Fe, Mn und Zn im Königswasseraufschluss (H = Humus), K im Königswasseraufschluss (Boden), K, Na aus der Austauschkapazitätsbestimmung (Humus) sowie pH(H<sub>2</sub>O) und pH(KCl) (Humus). Details dazu finden sich im Bericht von KÖNIG et al. (2014). Bei der Auswertung dieser Parameter sollte deshalb jeweils entschieden werden, ob die Daten der genannten Länder/Labore entweder unberücksichtigt bleiben oder mit einem Faktor korrigiert werden oder zumindest bei der Ergebnisdarstellung auf die Problematik der möglichen gerichteten Abweichung der Daten dieser Länder/Labore hingewiesen werden.

Für die Länder Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt gibt es nur einen Fall, wo die Daten eines Labors/Landes gerichtet von den Daten der übrigen Labore/Länder abweichen. Es handelt sich um den Parameter K im Königswasseraufschluss (B), bei dem die Daten aus Niedersachsen um bis zu 30 % höher liegen als die der übrigen Länder/Labore.

Für einige Parameter, deren Daten bei den Standardmessungen und bei den Ringversuchen sehr stark streuen, sollte auf eine vergleichende Auswertung der BZE-Daten verzichtet werden. Dies betrifft fast ausschließlich Parameter, die für die BZE unbedeutend sind: Na in der Ake (B), Ake (H) und Akt (B) sowie Na im Königswasseraufschluss (B) und (H). Problematisch sind die K-Werte im Königswasseraufschluss (B und H). Hier zeigt sich, dass einzelne Labore große gerichtete Abweichungen haben, die zumindest für ein Labor so groß sind, dass die Daten nicht mit denen der anderen Labore verglichen werden können. Die Ursache ist vermutlich die unterschiedliche Mahlung der Proben.

Bei allen übrigen Parametern und Untersuchungsmethoden kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass die BZE II-Daten aller Labore/Länder übergreifend ausgewertet werden können.

Grundsätzlich muss davon ausgegangen werden, dass die Variation sowohl innerhalb als auch zwischen den Laboren mindestens +/- 10 % beträgt. Nur bei wenigen Parametern ist die Variation etwas geringer (z. B. Elementaranalyse (B) C, Königswasseraufschluss (B) Ca, Gesamtaufschluss (B) Ca), bei vielen jedoch größer. Tabelle 40 gibt eine grobe Übersicht, welche mittleren Variationen sich bei den Standardmessungen und bei den Ringversuchen zusammengefasst für die jeweiligen Untersuchungsmethoden zeigen und welche einzelnen Parameter innerhalb einer Untersuchungsmethode deutlich stärker variieren.

In der Tabelle 41 sind die Ergebnisse der Kontrollstandard-Messungen der beteiligten Labors aus Hessen und Niedersachsen sowie der BGR Hannover aufgelistet.

Aus der Standardabweichung in Prozent kann auf die Streuung der Analysedaten für die verschiedenen Parameter geschlossen werden. Für Standards, die sich im Analysezeitraum und ggf. auch noch danach verändert haben, ist dies in der Tabelle angegeben. Standardveränderungen erklären die meisten der hohen Abweichungen vom Mittelwert. Dies gilt insbesondere für die austauschbaren Kationen Fe und Mn (AKE) und die Elemente im wässrigen Extrakt (EXTH<sub>2</sub>O). Wie bei der Bundesauswertung sind es vor allem die K-Gehalte im Königswasseraufschluss, bei denen die Daten zwischen den beteiligten Laboren nicht vergleichbar sind. Ansonsten liegen die Abweichungen zwischen den Laboren selten über 10 % und sind damit gut vergleichbar.

Tabelle 40: Zusammenfassung der Ergebnisse der Auswertung der die BZE begleitenden Ringanalysen und Standardmessungen (KÖNIG et al. 2014) für die einzelnen Untersuchungsmethoden (Parameter-Gruppen)

| Untersuchungsmethode/Parametergruppe        | Mittlere Variation der Mittelwerte der Standardmessungen | Mittlere Variation der mittleren Abweichung vom Mittelwert bei den Ringversuchen | Parameter mit größeren Variationen | Bemerkungen                             |
|---|--|--|------------------------------------|---|
| Elementaranalytik (C,N)                     | +/- 10 %   | +/- 5 %  | N bei geringen Gehalten            |   |
| AKe Boden                                   | +/- 10 %   | +/- 10–15 %  | Na                                 | Na nicht vergleichbar                   |
| AK Humus                                    | +/- 20 %   | +/- 10–15 %  | H+, Na                             | Na nicht vergleichbar                   |
| AKT Boden                                   | +/- 20 %   | +/- 10–15 %  | Mg, Na                             | Na nicht vergleichbar                   |
| pH Boden und Humus                          | +/- 20 %   | +/- 40–50 %  |                                    | Achtung: nicht pH, sondern Parameter H+ |
| Königswasser-aufschluss Boden Hauptelemente | +/- 10 %   | +/- 10 %   | K, Na                              | K, Na nicht vergleichbar                |
| Königswasser-aufschluss Boden Schwermetalle | +/- 10 %   | +/- 10 %   |                                    |   |
| Königswasser-aufschluss Humus Hauptelemente | +/- 10–15 %  | +/- 15 %   | Na, Al, K                          | Na nicht vergleichbar                   |
| Königswasser-aufschluss Humus Schwermetalle | +/- 20 %   | +/- 15 %   | Cr                                 |   |
| NO <sub>3</sub> im wässr. 1:2-Extrakt       | +/- 15 %   | +/- 20 %   |                                    |   |
| Korngrößenbestimmung                        | +/- 20 %   | +/- 20 %   | Grobschluff, Mittelsand, Grobsand  |   |
| Gesamt-aufschluss Boden Hauptelemente       | +/- 10–20 %  | +/- 5–15 %   |                                    |   |
| Oxalat-Extrakt                              | +/- 10 %   | +/- 15 %   |                                    |   |
| AK EU-Methode                               | +/- 15–20 %  | +/- 15 %   | H+, Na                             |   |

Tabelle 41: Ergebnisse der in den Laboren in Göttingen, Kassel und Hannover bei der BZE II mitgeführten BZE-Standardmaterialien (gelb = Abweichung 20–50 %, rot = Abweichung mehr als 50 %)

| Standard | U-Methode | Parameter | BZE-Mittelwert 2005/6 | BZE-Mittelwert 2009 | NWFWA        |             |                    |                  | HLII |              |             |                    | BGR              |      |              |             | Abw. BGR - NW-FVA |                    |                  |     |       |
|----------|-----------|-----------|-----------------------|---------------------|--------------|-------------|--------------------|------------------|------|--------------|-------------|--------------------|------------------|------|--------------|-------------|-------------------|--------------------|------------------|-----|-------|
|          |           |           |                       |                     | MW 2006-2009 | Std Abw (%) | Abw. vom MW 2005/6 | Abw. vom MW 2009 | n    | MW 2007-2009 | Std Abw (%) | Abw. vom MW 2005/6 | Abw. vom MW 2009 | n    | MW 2006-2011 | Std Abw (%) |                   | Abw. vom MW 2005/6 | Abw. vom MW 2009 | n   |       |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Alges     | 13,145                | 12,435              | 13,74        | 2,7         | 4,5                | 10,5             | 47   | 12,90        | 8,1         | -1,8               | 3,8              | 19   | 6,1          | 13,26       | 8,3               | 0,9                | 6,6              | 237 | 3,5   |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Cages     | 1,05                  | 1,388               | 1,67         | 2,3         | 1,2                | 5,2              | 47   | 1,69         | 4,4         | 2,4                | 6,4              | 19   | 1,2          | 1,05        | 5,6               | -0,3               | 3,6              | 237 | 1,5   |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Cages     | 116                   | 13,7                | 120          | 13,7        | -11,8              | 3,4              | 21   | 135,29       | 7,3         | -0,5               | 16,6             | 19   | -12,7        | 136,12      | 11,0              | 0,1                | 17,3             | 237 | -13,4 |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Cages     | 9,54                  | 10,03               | 9,17         | 10,03       | 4,3                | 9,4              | 5,1  | 10,73        | 7,5         | 17,0               | 12,5             | 19   | -7,0         | 9,62        | 6,3               | 4,9                | 0,8              | 237 | 4,1   |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Cages     | 67,37                 | 66,87               | 69,77        | 4,1         | 3,6                | 4,3              | 47   | 75,61        | 10,7        | 12,2               | 13,1             | 19   | -8,4         | 69,55       | 7,5               | 3,2                | 4,0              | 237 | 0,3   |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Cages     | 8                     | 7,77                | 8,08         | 6,4         | 1,0                | 4,0              | 47   | 9,23         | 10,7        | 15,4               | 18,8             | 19   | -14,2        | 8,38        | 8,4               | 4,7                | 7,8              | 237 | -3,7  |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Fages     | 37,91                 | 36                  | 37,34        | 2,7         | -1,5               | 3,7              | 47   | 38,17        | 5,1         | 0,7                | 6,0              | 19   | 2,2          | 37,49       | 10,7              | -1,1               | 4,1              | 237 | -0,4  |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Mgges     | 6,88                  | 6,47                | 6,79         | 2,2         | -1,3               | 4,9              | 47   | 6,98         | 4,0         | 1,4                | 7,8              | 19   | -2,8         | 6,55        | 5,7               | -4,8               | 1,3              | 237 | 3,5   |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Mnges     | 0,624                 | 0,61                | 0,624        | 0,61        | 1,8                | -2,2             | 4,0  | 0,7          | 0,63        | 3,7                | 1,4              | 3,7  | 19           | -3,7        | 0,61              | -3,0               | -0,8             | 237 | 0,8   |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Phages    | 32,21                 | 31,67               | 32,68        | 4,8         | 1,5                | 3,2              | 47   | 33,77        | 5,2         | 4,9                | 6,6              | 19   | -3,3         | 32,37       | 7,3               | 0,5                | 2,2              | 237 | 1,0   |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Piges     | 1,084                 | 1,042               | 1,08         | 3,4         | -0,4               | 3,6              | 47   | 1,11         | 3,4         | 2,2                | 6,3              | 19   | -2,6         | 1,03        | 5,2               | -4,7               | -0,8             | 237 | 4,3   |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Siges     | 0,124                 | 0,118               | 0,13         | 10          | 4,8                | 10,2             | 47   | 0,110        | 10,5        | -16,3              | 19               | 20,4 | 0,12         | 0,66        | -2,5              | 2,4                | 237              | 7,0 |       |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Zages     | 86                    | 82,86               | 85,59        | 4           | -0,5               | 3,3              | 47   | 85,85        | 5,7         | -0,2               | 3,6              | 19   | -0,3         | 83,29       | 8,2               | -3,2               | 0,5              | 237 | 2,7   |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Kges      | 0,5                   | 0,661               | 0,99         | 4,5         | 38,0               | 33,3             | 47   | 0,48         | 6,3         | -3,9               | 27,3             | 19   | 51,5         |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-SAC  | OAKW1.1   | Niges     | 29,64                 | 29,06               | 30,69        | 3,8         | 3,5                | 5,6              | 47   | 32,67        | 7,2         | 10,2               | 12,4             | 19   | -6,5         |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-THUE | ATNU1.1   | Cages     | 7,974                 | 7,868               | 8,06         | 1,1         | 1,1                | 2,6              | 89   | 7,87         | 6,1         | -1,3               | 0,2              | 13   | 2,3          | 8,13        | 1,8               | 1,9                | 3,4              | 274 | -0,8  |
| BZE-THUE | ATNU1.1   | Niges     | 0,596                 | 0,596               | 0,62         | 1,5         | 4,0                | 4,0              | 89   | 0,68         | 13,2        | 14,2               | 14,2             | 53   | -9,8         | 0,63        | 4,3               | 6,3                | 6,3              | 274 | -2,1  |
| BZE-THUE | AKE1.1    | Alges     | 51,2                  | 49,3                | 52,09        | 3           | 1,7                | 5,7              | 73   | 50,60        | 4,5         | -1,2               | 2,6              | 86   | 2,9          |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-THUE | AKE1.1    | Cages     | 5,56                  | 5,54                | 5,9          | 4,4         | 6,1                | 6,5              | 73   | 5,73         | 6,8         | 3,1                | 3,5              | 86   | 2,9          |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-THUE | AKE1.1    | Fages     | 0,27                  | 0,47                | 0,54         | 13,3        | 39,69              | 14,9             | 73   | 0,55         | 19,6        | 10,53              | 16,7             | 86   | -1,6         |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-THUE | AKE1.1    | Kges      | 1,42                  | 1,46                | 1,46         | 4,4         | 2,8                | 0,0              | 73   | 1,52         | 11,2        | 7,1                | 4,2              | 86   | 4,2          |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-THUE | AKE1.1    | H+2       | 4,06                  | 4,02                | 4,1          | 6,4         | 1,0                | 2,0              | 73   | 3,99         | 1,8         | -1,7               | -0,7             | 86   | 2,6          |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-THUE | AKE1.1    | Mnges     | 1,1                   | 1,81                | 1,76         | 10,2        | 6,0                | -2,8             | 73   | 1,95         | 8,7         | 7,0                | 7,6              | 86   | -10,6        |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-THUE | AKE1.1    | Niges     | 1,63                  | 1,84                | 1,94         | 5,6         | 19,0               | 5,4              | 73   | 1,92         | 12,0        | 17,9               | 4,4              | 86   | 1,0          |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-THUE | AKE1.1    | Niges     | 0,35                  | 0,38                | 0,47         | 21,8        | 34,3               | 23,7             | 73   |              |             |                    |                  |      |              |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-THUE | AKT2.1    | Cages     | 5,35                  | x                   | 5,47         | 4,8         | 2,2                |                  | 39   |              |             |                    |                  |      |              |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-THUE | AKT2.1    | Bages     | 102,3                 | x                   | 101,9        | 3,4         | -0,4               |                  | 39   |              |             |                    |                  |      |              |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-THUE | AKT2.1    | Mgges     | 1,41                  | x                   | 1,59         | 11,5        | 12,8               |                  | 39   |              |             |                    |                  |      |              |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-THUE | AKT2.1    | Nages     | 0,37                  | x                   | 0,29         | 7,2         | -21,6              |                  | 39   |              |             |                    |                  |      |              |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-THUE | AKT2.1    | Kges      | 1,28                  | x                   | 1,32         | 8,1         | 3,1                |                  | 39   |              |             |                    |                  |      |              |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-SAC  | EXTH20.1  | Alges     | 1,178                 | 1,619               | 1,48         | 10,5        | 25,6               | -8,6             | 17   | 1,33         | 19,0        | 13,2               | -17,7            | 25   | 9,9          |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-SAC  | EXTH20.1  | Cages     | 2,163                 | 2,71                | 2,85         | 8,6         | 31,8               | 5,2              | 17   | 3,19         | 23,6        | 47,6               | 17,8             | 25   | -12,0        |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-SAC  | EXTH20.1  | Cages     | 52,14                 | 70,59               | 70,23        | 7,8         | 34,7               | -0,5             | 17   | 51,51        | 15,4        | -1,2               | 27,0             | 30   | 26,7         |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-SAC  | EXTH20.1  | Cl        | 1,57                  | 1,48                | 1,49         | 6,3         | -5,1               | 0,7              | 17   | 1,52         | 9,8         | -3,1               | 2,8              | 25   | -2,1         |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-SAC  | EXTH20.1  | Fages     | 0,46                  | 0,46                | 0,35         | 10,6        | -23,9              | -23,9            | 17   | 0,35         | 36,3        | 14,5               | 14,5             | 25   | 50,5         |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-SAC  | EXTH20.1  | H+        | 4,64                  | 4,65                | 4,73         | 8,9         | 1,9                | 1,7              | 17   | 4,78         | 2,8         | 3,1                | 2,9              | 15   | -1,1         |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-SAC  | EXTH20.1  | Kges      | 1,41                  | 1,69                | 1,64         | 8,7         | 16,3               | -3,0             | 17   | 1,48         | 10,8        | 4,6                | -12,7            | 25   | 10,0         |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-SAC  | EXTH20.1  | Lf        | 64                    | 80                  | 73,53        | 4,6         | 14,9               | -8,1             | 17   | 1,48         | 10,8        | 4,6                | -12,7            | 25   | 10,0         |             |                   |                    |                  |     |       |
| BZE-SAC  | EXTH20.1  | Mgges     | 1,11                  | 1,43                | 1,46         | 9,9         | 31,5               | 2,1              | 17   | 1,46         | 15,6        | 31,5               | 2,1              | 25   | 0,0          |             |                   |                    |                  |     |       |

(Fortsetzung Tabelle 41)

| Standard | U-Methode | Par-<br>meter       | BZE-<br>Mittelwert<br>2005/6 | BZE-<br>Mittelwert<br>2009 | MW<br>2006-<br>2009 | NWFWA      |                         |                       | HLH |                     |                   | BGR                     |                     |                   | Abw BGR<br>-<br>NW-FVA |
|----------|-----------|---------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------|------------|-------------------------|-----------------------|-----|---------------------|-------------------|-------------------------|---------------------|-------------------|------------------------|
|          |           |                     |                              |                            |                     | Std<br>(%) | Abw<br>vom MW<br>2005/6 | Abw<br>vom MW<br>2009 | n   | MW<br>2007-<br>2009 | Std<br>Abw<br>(%) | Abw<br>vom MW<br>2005/6 | MW<br>2006-<br>2011 | Std<br>Abw<br>(%) |                        |
| BZE-SAC  | EXH2O1.1  | Miges               | 0,9                          | 1,33                       | 1,3                 | 15,2       | 44,4                    | -2,3                  | 17  | 1,10                | 18,0              | 22,0                    | -17,4               | 25                | 15,5                   |
| BZE-SAC  | EXH2O1.1  | Nages               | 4,11                         | 4,62                       | 4,83                | 7,1        | 17,5                    | 4,5                   | 17  | 4,43                | 7,2               | 7,9                     | -4,0                | 25                | 8,2                    |
| BZE-SAC  | EXH2O1.1  | Nages               | 3,44                         | 4,21                       | 4,84                | 7,2        | 40,7                    | 15,0                  | 17  | 3,61                | 15,1              | 4,9                     | -14,3               | 25                | 25,4                   |
| BZE-SAC  | EXH2O1.1  | NH <sub>4</sub>     | 0,32                         | 0,59                       | 0,48                | 18,3       | 50,0                    | -18,6                 | 17  | 0,41                | 29,1              | 29,6                    | -29,7               | 25                | 13,6                   |
| BZE-SAC  | EXH2O1.1  | NO <sub>3</sub>     | 0,66                         | 0,7                        | 0,78                | 6,3        | 30,0                    | 11,4                  | 17  | 0,76                | 12,1              | 26,7                    | 8,6                 | 25                | 2,5                    |
| BZE-SAC  | EXH2O1.1  | Stes                | x                            | x                          | 4,77                | 8,3        | x                       | x                     | 17  | x                   | x                 | x                       | x                   | x                 | x                      |
| BZE-SAC  | EXH2O1.1  | SO <sub>4</sub> ber | 3,94                         | 4,24                       | 4,23                | 8,5        | 7,4                     | -0,2                  | 17  | 3,76                | 8,0               | -4,7                    | -11,4               | 25                | 11,2                   |
| BZE-NDS  | pHc4261   | H+                  | 4,045                        | 4,043                      | 4,03                | 9,2        | -0,4                    | -0,3                  | 99  | 4,13                | 4,1               | 2,0                     | 2,1                 | 9                 | -2,4                   |
| BZE-NDS  | pHKG361   | H+                  | 4,12                         | 4,02                       | 4,1                 | 9,6        | -0,5                    | 2,0                   | 83  | 4,11                | 2,1               | -0,3                    | 2,2                 | 9                 | -0,2                   |
| BZE-NDS  | pHHD961   | H+                  | 4,47                         | 4,49                       | 4,46                | 12,6       | -0,2                    | -0,7                  | 99  | 4,58                | 3,4               | 2,5                     | 2,1                 | 9                 | -2,7                   |
| BZE-HUM  | AKH31     | Alges               | 24,2                         | x                          | 21,8                | 14,7       | -9,9                    | x                     | 42  | 20,09               | 10,9              | 20,2                    | x                   | 33,4              |                        |
| BZE-HUM  | AKH31     | Cages               | 121                          | x                          | 110,1               | 9,3        | -9,0                    | x                     | 42  | 132,50              | 5,6               | 9,3                     | x                   | 20,3              |                        |
| BZE-HUM  | AKH31     | Feges               | 5,24                         | x                          | 4,96                | 16,3       | -5,3                    | x                     | 42  | 5,67                | 14,6              | 8,1                     | x                   | -14,2             |                        |
| BZE-HUM  | AKH31     | H <sup>+</sup> 2    | 2,8                          | x                          | 2,9                 | 7,2        | -3,6                    | x                     | 42  | 2,84                | 1,5               | 1,3                     | x                   | 2,2               |                        |
| BZE-HUM  | AKH31     | Miges               | 24                           | x                          | 22,7                | 10,2       | -5,4                    | x                     | 42  | 25,67               | 6,8               | 7,0                     | x                   | -13,1             |                        |
| BZE-HUM  | AKH31     | Miges               | 11,15                        | x                          | 10,12               | 11,4       | -9,2                    | x                     | 42  | 12,24               | 3,1               | 9,8                     | x                   | -21,0             |                        |
| BZE-HUM  | AKH31     | Nages               | 1,1                          | x                          | 1,19                | 28,8       | 8,2                     | x                     | 42  | 1,55                | 12,1              | 40,7                    | x                   | -30,0             |                        |
| BZE-HUM  | AKH31     | Feges               | 9,3                          | x                          | 8,88                | 11,5       | -4,3                    | x                     | 42  | 10,87               | 6,3               | 16,9                    | x                   | -22,5             |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Alges               | 2                            | x                          | 1,88                | 8,7        | -6,0                    | x                     | 36  | 1,79                | 6,0               | -10,7                   | x                   | 5,0               |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Cages               | 2,91                         | x                          | 2,85                | 2,6        | -2,1                    | x                     | 36  | 3,14                | 3,2               | 7,8                     | x                   | -10,0             |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Cages               | 2,73                         | x                          | 3,20                | 29,1       | 17,2                    | x                     | 36  | 280,34              | 4,2               | 2,8                     | x                   | 12,3              |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Cages               | 1,1                          | x                          | 1,24                | 1,3        | 12,7                    | x                     | 36  | 1,27                | 8,5               | 15,6                    | x                   | -2,6              |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Cages               | 18,8                         | x                          | 18,78               | 3,7        | -0,1                    | x                     | 36  | 22,18               | 13,9              | 18,0                    | x                   | -18,1             |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Feges               | 2,33                         | x                          | 2,22                | 4,4        | -4,7                    | x                     | 36  | 2,20                | 5,5               | -5,5                    | x                   | 0,8               |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Feges               | 0,536                        | x                          | 0,57                | 8,3        | 6,3                     | x                     | 36  | 0,57                | 4,2               | 7,0                     | x                   | -0,6              |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Miges               | 0,479                        | x                          | 0,45                | 2,9        | -6,1                    | x                     | 36  | 0,47                | 2,6               | -0,9                    | x                   | -5,5              |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Nages               | 7,28                         | x                          | 7,72                | 8,8        | 6,0                     | x                     | 36  | 8,81                | 7,6               | 21,0                    | x                   | -14,1             |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Piges               | 60,3                         | x                          | 59,95               | 3,4        | -0,6                    | x                     | 36  | 63,70               | 1,3               | 5,6                     | x                   | -6,3              |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Piges               | 0,678                        | x                          | 0,68                | 2,9        | 0,3                     | x                     | 36  | 0,69                | 1,6               | 2,1                     | x                   | -1,8              |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Siges               | 2,09                         | x                          | 2,07                | 2,7        | -1,0                    | x                     | 36  | 2,04                | 2,2               | -2,5                    | x                   | 1,6               |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Zniges              | 37                           | x                          | 37,51               | 4,9        | 1,4                     | x                     | 36  | 42,58               | 8,5               | 13,1                    | x                   | -13,5             |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Miges               | 0,395                        | x                          | 0,39                | 2,9        | -1,3                    | x                     | 36  | 0,42                | 5,8               | 5,4                     | x                   | -6,8              |                        |
| BZE-HUM  | OAKW1.1   | Cages               | 5,2                          | x                          | 6,73                | 11,5       | 29,4                    | x                     | 36  | 7,62                | 9,4               | 46,5                    | x                   | -13,2             |                        |
| BZE-HUM  | AINULL    | Cages               | 17,75                        | x                          | 17,48               | 1,6        | -1,8                    | x                     | 31  | x                   | x                 | x                       | x                   | x                 | x                      |
| BZE-HUM  | AINULL    | Cages               | 466,3                        | x                          | 458,11              | 5,6        | -1,8                    | x                     | 31  | x                   | x                 | x                       | x                   | x                 | x                      |
| BZE-HUM  | pHc4261   | H+                  | 3,05                         | x                          | 3,07                | 5,2        | 0,7                     | x                     | 36  | x                   | x                 | x                       | x                   | x                 | x                      |
| BZE-HUM  | pHKG361   | H+                  | 2,86                         | x                          | 2,87                | 5,4        | 0,3                     | x                     | 38  | x                   | x                 | x                       | x                   | x                 | x                      |
| BZE-HUM  | pHHD961   | H+                  | 3,69                         | x                          | 3,65                | 8,8        | -1,1                    | x                     | 38  | x                   | x                 | x                       | x                   | x                 | x                      |

## 11.4 Bedeutung methodisch bedingter Streuungen und Fehlerquellen

Im Rahmen der Auswertung der BZE II-Daten zeigten sich diverse Probleme in den Bereichen Probennahme und Analytik, die zum einen Methodenergänzungen und zum anderen die Identifizierung von Fehlerquellen und von methodisch bedingten Streuungen nötig machten. Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse dieser Prüfungen dargestellt.

### 11.4.1 Probleme der Probennahme

Für Parameter mit großem Tiefengradienten, wie z. B. dem Kohlenstoff-Gehalt, zeigten sich zwei Probleme bei der Probennahme: zum einen die Trennung von Humusaufgabe und Mineralboden und damit die Verschiebung des Nullpunkts der Mineralbodenprobennahme und zum anderen die Verschleppung von Probenmaterial in die nächsttiefere Tiefenstufe bei Beprobung mit Bohrzylindern.

#### 11.4.1.1 Vergleichbarkeit von Beprobungen der Profilgrube und Satelliten-Bohrungen

Die Vergleichbarkeit der Proben aus einer Probennahme mit Stechzylindern oder Schaufeln am Profil mit denen einer Probennahme mit Bohrzylindern hängt stark von der Homogenität der Fläche ab. Bei hoher Variabilität in der Fläche oder Störungen durch unterschiedliche Schichtungen, Bänder etc. führt die Probennahme nach dem BZE-Schema an acht Bohrpunkten mit Bohrzylindern zu einer mehr oder weniger repräsentativen Mischprobe, während die Beprobung der Profilgrube nur die Situation an einem Punkt widerspiegelt. Die Vergleichbarkeit ist begrenzt. Für manche Parameter kann die Probennahme am Profil zudem noch zu Minder- oder Mehrbefunden der Vorräte führen. Dies ist vermutlich für die C- und N-Vorräte der Fall, da Profile tendenziell stammferner liegen und deshalb geringere C- und N-Einträge durch Streufall und geringere Durchwurzelungsintensitäten haben.

#### 11.4.1.2 Räumliche Variabilität chemischer und physikalischer Kenngrößen

Um Informationen über die Homogenität der Beprobungspunkte und die Variabilität der diversen erfassten Parameter an den Punkten zu erhalten, hätten die Proben der acht Einzelbohrungen nicht zu Mischproben vereint, sondern einzeln untersucht werden müssen. Dies hätte den Analysenaufwand verachtacht und zu hohen Kosten verursacht. Um dennoch einen Eindruck von der Homogenität zu erhalten, wurden die Daten der Intensivmonitoringflächen der drei Bundesländer ausgewertet, da auf diesen Flächen die Probennahmen in sechsfacher Wiederholung mit je vier Bohrungen erfolgen.

Im Folgenden sind die Auswertungen der Variationskoeffizienten für einige Parameter zusammengefasst.



#### 11.4.1.2.1 Variabilität der Trockenrohdichte des Feinbodens und des Feinbodenanteils

Die Trockenrohdichte und der Feinbodenanteil nehmen direkten Einfluss auf die Höhe der errechneten Elementvorräte. Daher ist von großer Bedeutung, wie exakt sie bestimmt werden können und wie stark sie in der Fläche streuen.

Die Auswertung der Daten von fast 30 Intensivmonitoringflächen der drei Bundesländer zeigt, dass der Variationskoeffizient ( $C_v$ ) des Feinbodenanteils mit Zunahme des Skelettanteils (= Abnahme des Feinbodenanteils) deutlich zunimmt und auf Werte bis zu 25 % ansteigen kann, während er bei Böden mit einem Feinbodenanteil über 90 % eher bei nur 5 % liegt (s. Abb. 145).

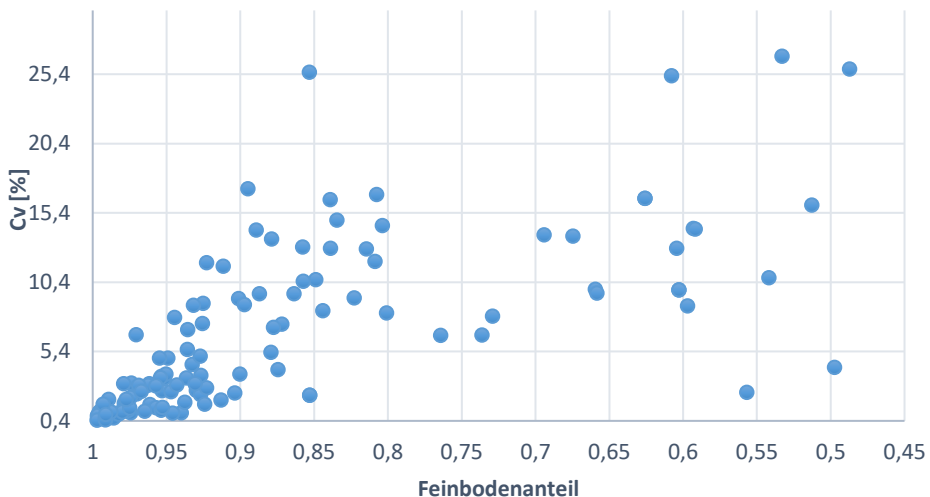


Abbildung 145: Variationskoeffizient  $C_v$  [%] des Feinbodenanteils in Abhängigkeit vom Feinbodenanteil

Auch für die Trockenrohdichte des Feinbodens gilt, dass ihr Variationskoeffizient  $C_v$  mit steigendem Skelettgehalt zunimmt. Dies zeigt der Vergleich der Abbildungen 146 und 147, bei denen unterschieden wird zwischen Böden mit weniger oder mehr als 10 % Skelettanteil. Während für Böden mit geringen Skelettanteilen ab 10 cm Tiefe der Variationskoeffizient  $C_v$  der Trockenrohdichte meist unter 10 % liegt, steigt dieser Wert für Böden mit höheren Skelettgehalten auf Werte bis 20 % an. Auffällig ist, dass in 0–5 cm Tiefe auch bei skelettarmen oder -freien Böden der Variationskoeffizient  $C_v$  der Trockenrohdichte bis zu 30 % betragen kann.

Die Trockenrohdichte des Feinbodens und der Skelettanteil bzw. Feinbodenvorrat sind die entscheidenden Größen für die Berechnung des Feinbodenvorrats, der für die Elementvorratsberechnungen benötigt wird. Aus den beschriebenen Auswertungen muss geschlossen werden, dass die Streuung bei der Berechnung des

Feinbodenvorrats zwischen 5 und 20 % liegt und damit im Bereich der Streuung der analytischen Elementgehaltsbestimmungen.

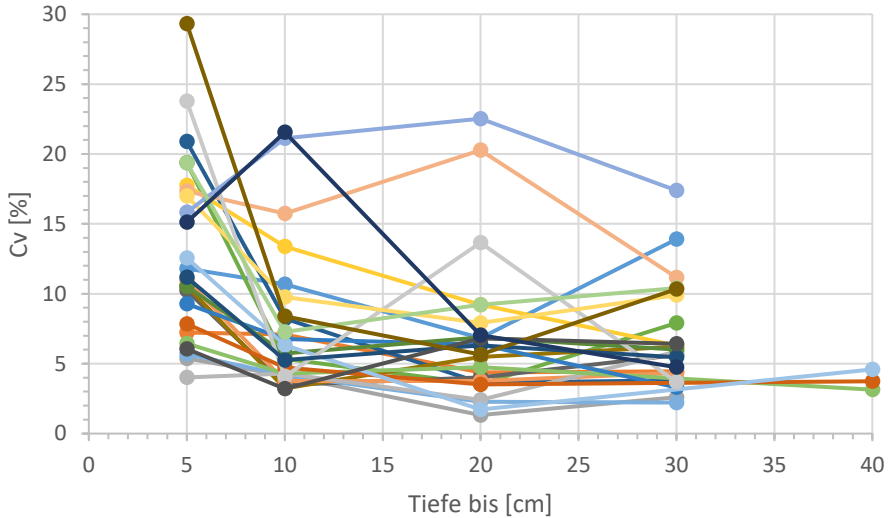


Abbildung 146: Variationskoeffizient  $C_v$  [%] der Trockenrohdichte des Feinbodens in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für Böden verschiedener Intensivmonitoringflächen mit Skelettgehalten unter 10 % (jede Farbe symbolisiert eine andere Fläche)

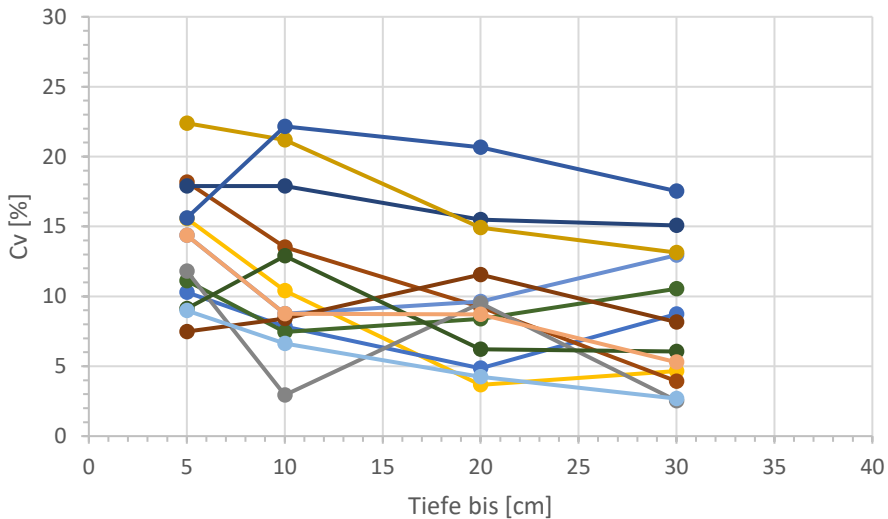


Abbildung 147: Variationskoeffizient  $C_v$  [%] der Trockenrohdichte des Feinbodens in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für Böden verschiedener Intensivmonitoringflächen mit Skelettgehalten über 10 % (jede Farbe symbolisiert eine andere Fläche)

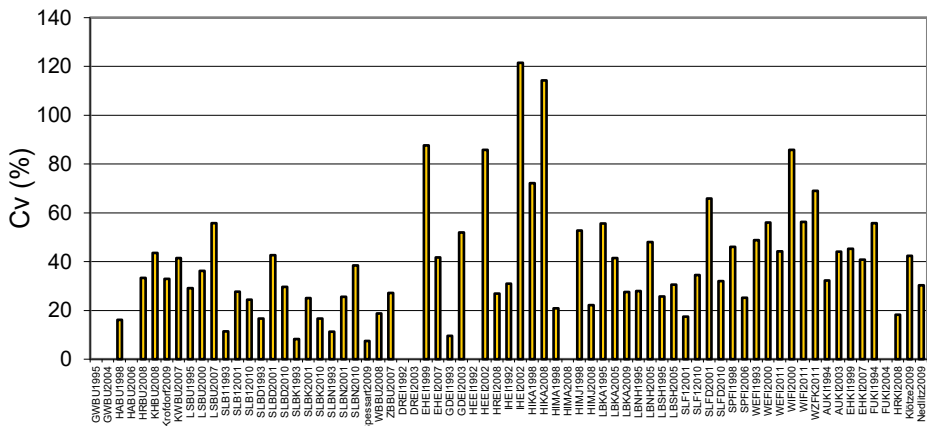
#### 11.4.1.2.2 Variabilität des Humusvorrats und der organischen Kohlenstoffgehalte

Eine wichtige Fragestellung der BZE ist die Ermittlung der Veränderungen der Kohlenstoffvorräte im Wald und damit verbunden die Verlagerung des organischen Kohlenstoffs (Corg) zwischen Humusaufgabe und Boden und innerhalb der Tiefenstufen des Mineralbodens. Daher ist es besonders wichtig, zu klären, wie genau die Humusvorräte und der Kohlenstoffgehalt in den Bodenkompartmenten ermittelt werden können.

In den folgenden Grafiken sind die Variationskoeffizienten (Cv) der Humusvorräte der verschiedenen Humuslagen L, Of und Oh und des Gesamthumusvorrats für 30 Monitoringflächen aus drei Bundesländern in verschiedenen Probennahmejahren dargestellt (s. Abb. 148 bis 151).

Dabei zeigt sich, dass die Variationskoeffizienten (Cv) in der Of-Lage (s. Abb. 149) geringer als in der L- (s. Abb. 148) und Oh-Lage (s. Abb. 150) sind. In der Of-Lage liegt der Cv überwiegend bei ca. 20 %, während er in der L- und Oh-Lage oft auch 40 % erreicht. Daneben gibt es in allen Lagen einzelne Ausreißer mit bis zu 120 %. Die größere Streuung in der Oh-Lage im Vergleich zur Of-Lage ist vermutlich auf die Schwierigkeit der Nullpunktfindung, also einer eindeutigen Trennung von Humus und Mineralboden, zurückzuführen.

Betrachtet man den gesamten Humusvorrat (s. Abb. 151), so ist die Streuung am geringsten und liegt bei ca. 20 % im Mittel. Vor diesem Hintergrund kann davon ausgegangen werden, dass in der Regel durch die Mischprobe aus acht Satelliten die Variabilität auf der Fläche berücksichtigt und der Humusvorrat auf +/- 30 % genau erfasst wird.



Intensivmonitoringflächen (mit Beprobungsjahr)

Abbildung 148: Variationskoeffizienten Cv [%] der Humusvorräte der L-Lage für 30 Monitoringflächen aus drei Bundesländern in verschiedenen Probennahmejahren

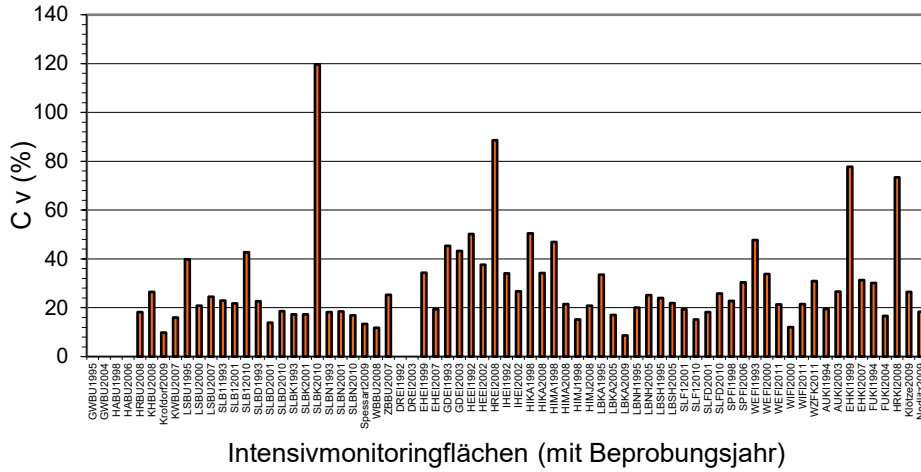


Abbildung 149: Variationskoeffizienten  $C_v$  [%] der Humusvorräte der Of-Lage für 30 Monitoringflächen aus drei Bundesländern in verschiedenen Probenahmejahren

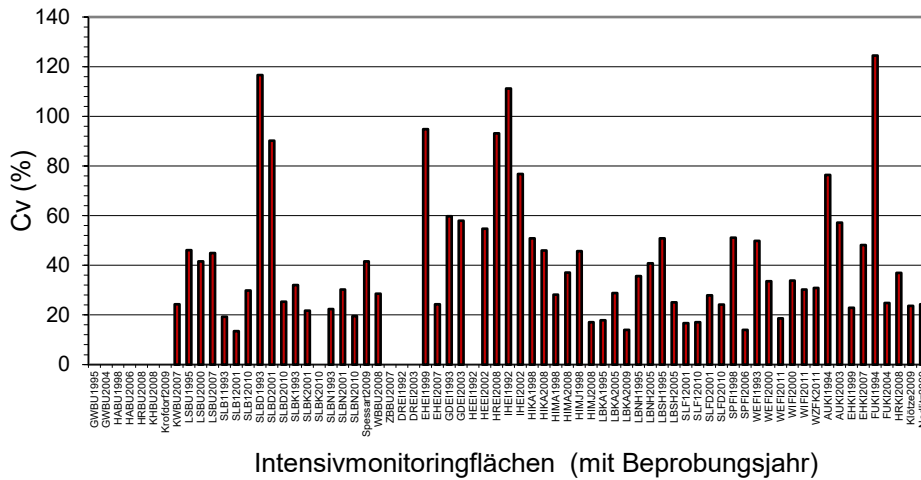
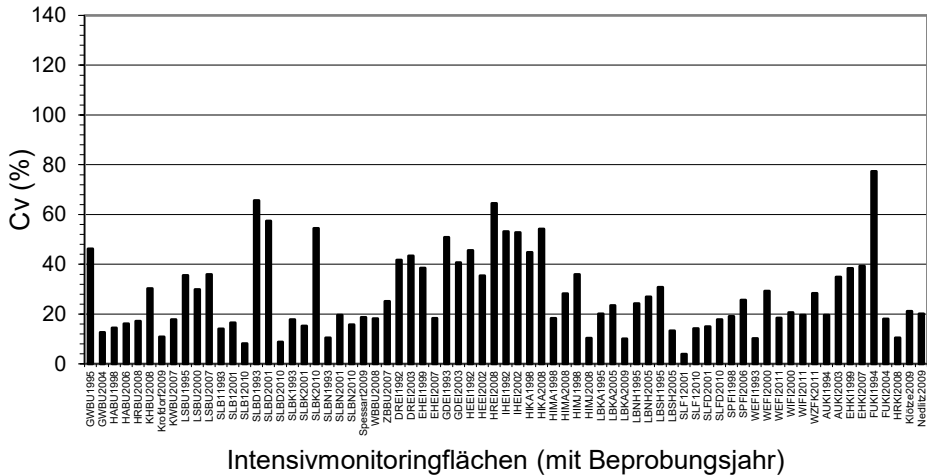


Abbildung 150: Variationskoeffizienten  $C_v$  [%] der Humusvorräte der Oh-Lage für 30 Monitoringflächen aus drei Bundesländern in verschiedenen Probenahmejahren



Intensivmonitoringflächen (mit Beprobungsjahr)

Abbildung 151: Variationskoeffizienten  $C_v$  [%] der Gesamthumusvorräte (L-, Of- und Ob-Lage) für 30 Monitoringflächen aus drei Bundesländern in verschiedenen Probenahmejahren

Die Auswertung der Daten der Intensivmonitoringflächen für die Corg-Gehalte in verschiedenen Tiefenstufen ergibt, dass die Variationskoeffizienten ( $C_v$ ) im Oberboden bei 10–25 % für skelettreiche bzw. 10–40 % für skelettarme Böden liegen und im Unterboden ansteigen (s. Abb. 152 u. 153). Dies hängt vor allem damit zusammen, dass die Corg-Gehalte sehr tiefenstufenabhängig sind und daher tiefenstufenabhängige Probenahmefehler bzw. eine unsaubere Trennung zwischen Auflage und Mineralboden sich besonders stark auswirken. In großer Tiefe sind die Corg-Gehalte allerdings sehr gering (s. Abb. 154), sodass hier teilweise schon die methodisch bedingten Bestimmungsgrenzen erreicht werden, was zu großen Streuungen führen kann. Für Gesamtvorratsberechnungen spielen daher die Corg-Gehalte in großer Tiefe keine große Rolle. Die Ermittlung von Vorratsveränderungen in großer Tiefe ist dagegen mit einem sehr großen Fehler behaftet.

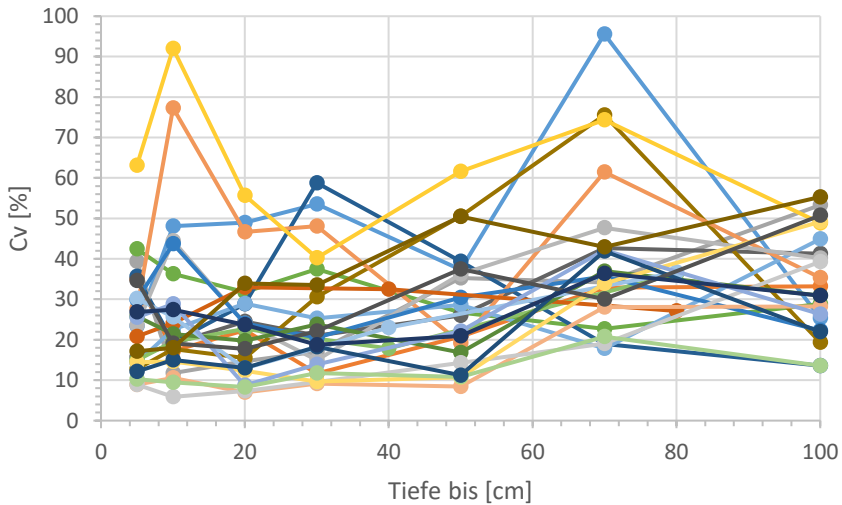


Abbildung 152: Variationskoeffizient  $C_v$  [%] des Corg-Gehalts in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für Böden mit Skelettgehalten unter 10 %, die Farben kennzeichnen die jeweiligen Böden

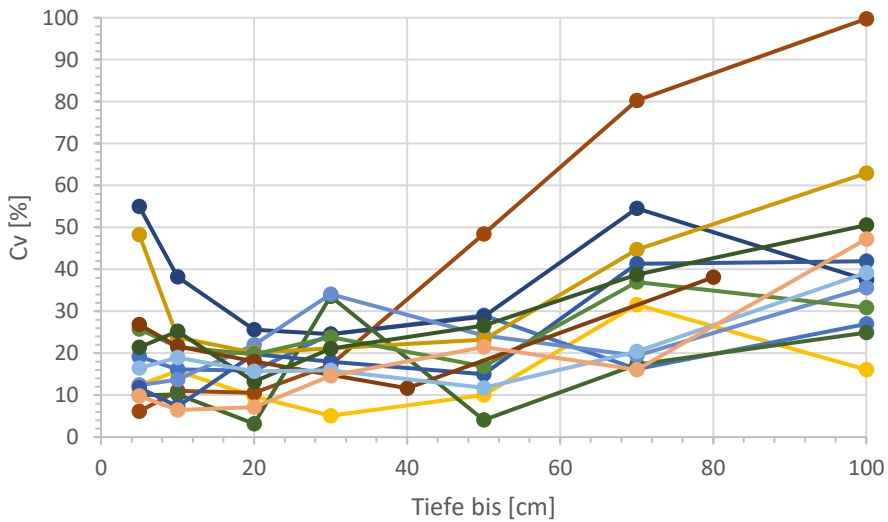


Abbildung 153: Variationskoeffizient  $C_v$  [%] des Corg-Gehalts in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für Böden mit Skelettgehalten über 10 %, die Farben kennzeichnen die jeweiligen Böden

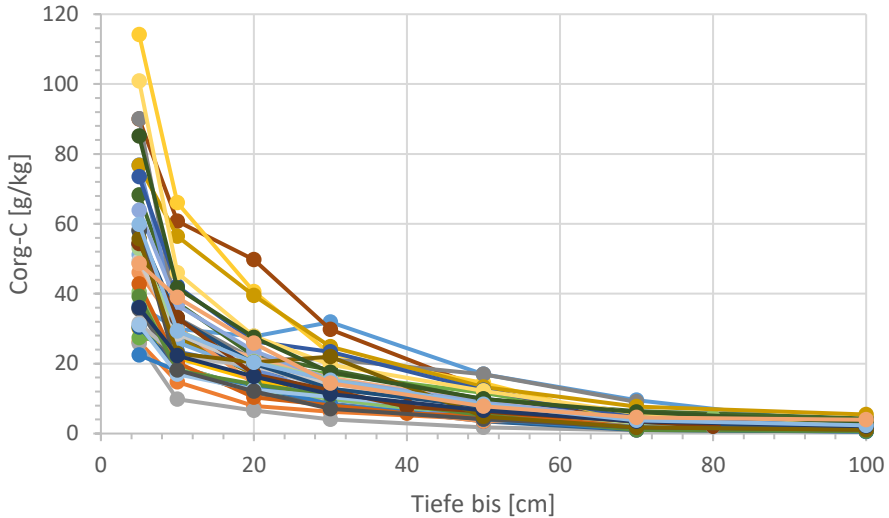


Abbildung 154: Mittlere Corg-Gehalte [g/kg] in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für 30 Intensivmonitoringflächen, die Farben kennzeichnen die jeweiligen Böden

#### 11.4.1.2.3 Variabilität chemischer Kennwerte am Beispiel der Gehalte im Königswasseraufschluss

Um Veränderungen von Vorräten zwischen der BZE I und BZE II bewerten zu können, ist es wichtig zu wissen, wie hoch die Variabilität bestimmter Parameter auf der Fläche und in den verschiedenen Tiefenstufen ist. Bei geringer Variabilität sollten bestimmte Parameter, wie z. B. die Königswasser-löslichen Eisen- (Fe), Phosphor- (P) oder Blei- (Pb) Gehalte, die sich über einen Zeitraum von 15 Jahren im Mineralboden nicht wesentlich verändern, bei der BZE I und BZE II sehr ähnliche Ergebnisse haben (s. Vorstudie BZE II, EVERS et al. 2001). Ist jedoch die Variabilität sehr hoch und finden sich für diese Parameter bei der BZE I und BZE II sehr verschiedene Gehalte, so kann dies nur mit hoher Variabilität am Standort erklärt werden. In diesen Fällen ist der Einfluss der standörtlichen Variabilität vermutlich deutlich höher als der der zeitlichen Veränderung.

An den Ergebnissen der Untersuchungen der Intensivmonitoringflächen ist dieser Sachverhalt gut zu erkennen. Im Folgenden sind beispielhaft die Daten zweier Monitoringflächen wiedergegeben.

Wie das Profildfoto der Kiefernfläche in Augustendorf (AuKi) zeigt (s. Abb. 155), befindet sich hier in 23–48 cm ein Bh-Horizont unterschiedlich starker Ausprägung. In den davon berührten Probenahme-Tiefenstufen sollte die Variabilität diverser Parameter deutlich höher sein als darüber und vor allem darunter liegender Tiefenstufen. Dies zeigen die Königswasser-extrahierbaren Elementgehalte deutlich (s. Tab. 42).



*Abbildung 155: Bodenprofil auf der Intensivmonitoringfläche Augustendorf Kiefer*



Tabelle 42: Variationskoeffizienten  $C_v$  [%] der Elementgehalte im Königswasseraufschluss (OAKW) in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] (Augustendorf, Kiefer, 2003; gelb = < 20 %, orange = 20 bis 50 %, rot = > 50 %)

| AUKI 2003           | Cv [%] | Cv [%] | Cv [%] | Cv [%] | Cv [%] | Cv [%] | Cv [%] | Cv [%] | Cv [%] |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| von (cm)            | 0      | 5      | 10     | 20     | 30     | 40     | 50     | 70     | 80     |
| bis (cm)            | 5      | 10     | 20     | 30     | 40     | 50     | 70     | 80     | 100    |
|                     |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| OAKW<br>Al (g/kg)   | 18     | 30     | 27     | 71     | 59     | 18     | 14     | 9      | 10     |
| QAKW<br>Ca (g/kg)   | 66     | 65     | 26     | 83     | 51     | 23     | 20     | 10     | 14     |
| OAKW<br>Cd (mg/kg)  | 40     | 75     | 65     | 39     | 52     | 222    | 100    | 45     | 98     |
| OAKW<br>Co (mg/kg)  | 21     | 25     | 21     | 21     | 59     | 28     | 20     | 16     | 22     |
| OAKW<br>Cr (mg/kg)  | 83     | 12     | 21     | 47     | 48     | 19     | 11     | 5      | 11     |
| OAKW<br>Cu (mg/kg)  | 19     | 25     | 43     | 26     | 29     | 22     | 7      | 10     | 9      |
| OAKW<br>Fe (g/kg)   | 12     | 15     | 27     | 78     | 76     | 32     | 36     | 8      | 10     |
| OAKW<br>K (g/kg)    | 9      | 9      | 9      | 18     | 35     | 20     | 15     | 9      | 10     |
| OAKW<br>Mg (g/kg)   | 23     | 14     | 25     | 76     | 84     | 31     | 18     | 11     | 11     |
| OAKW<br>Mn (g/kg)   | 41     | 19     | 9      | 18     | 21     | 27     | 21     | 21     | 21     |
| OAKW<br>Na (g/kg)   | 71     | 82     | 90     | 78     | 71     | 80     | 69     | 70     | 67     |
| OAKW<br>Ni (mg/kg)  | 98     | 18     | 37     | 34     | 49     | 19     | 15     | 10     | 11     |
| OAKW<br>Pges (g/kg) | 26     | 29     | 28     | 86     | 49     | 42     | 36     | 37     | 29     |
| OAKW<br>Pb (mg/kg)  | 20     | 15     | 49     | 56     | 18     | 31     | 17     | 9      | 5      |
| OAKW<br>Sges (g/kg) | 24     | 34     | 44     | 57     | 42     | 58     | 38     | 37     | 30     |
| OAKW<br>Zn (mg/kg)  | 26     | 22     | 41     | 38     | 41     | 13     | 12     | 5      | 7      |

Während in 70–100 cm Tiefe die Variabilität der meisten Elemente unter 20 %, zum Teil sogar unter 10 % liegt, steigt die Variabilität zwischen 20 und 40 cm Tiefe für viele Elemente auf 51 bis 86 % an.

Im Gegensatz dazu ist die Buchenfläche im Göttinger Wald (s. Abb. 156) sehr viel homogener. Bis 30 cm Tiefe variiert nur Ca mehr als 20 %, darunter die Elemente Cd, Mn und Pb. Variationskoeffizienten über 50 % wie bei der Fläche Augustendorf Kiefer treten überhaupt nicht auf (s. Tab. 43).



Abbildung 156: Bodenprofil auf der Intensivmonitoringfläche Göttinger Wald Buche

Tabelle 43: Variationskoeffizienten  $C_v$  [%] der Elementgehalte im Königswasseraufschluss (KöWa) in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] (Göttinger Wald, Buche, 2004; gelb = < 20 %, orange = 20–50 %)

| Gehalte KöWa | Cv [%] | Cv [%] | Cv [%] | Cv [%] | Cv [%] | Cv [%] | Cv [%] | Cv [%] | Cv [%] |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| von (cm)     | 0      | 5      | 10     | 20     | 30     | 40     | 50     | 70     | 80     |
| bis (cm)     | 5      | 10     | 20     | 30     | 40     | 50     | 70     | 80     | 100    |
| Al (g/kg)    | 5      | 3      | 3      | 16     | 22     | 17     | 12     | 11     | 20     |
| Ca (g/kg)    | 8      | 34     | 45     | 45     | 24     | 12     | 9      | 7      | 13     |
| Cd (mg/kg)   | 6      | 16     | 17     | 10     | 30     | 25     | 29     | 27     | 27     |
| Co (mg/kg)   | 4      | 4      | 8      | 12     | 17     | 14     | 19     | 20     | 18     |
| Cr (mg/kg)   | 7      | 6      | 14     | 12     | 12     | 14     | 12     | 10     | 14     |
| Cu (mg/kg)   | 6      | 7      | 6      | 7      | 13     | 17     | 16     | 18     | 19     |
| Fe (g/kg)    | 5      | 4      | 6      | 15     | 19     | 16     | 16     | 14     | 20     |
| K (g/kg)     | 12     | 10     | 11     | 10     | 12     | 12     | 8      | 7      | 17     |
| Mg (g/kg)    | 7      | 6      | 7      | 8      | 8      | 6      | 5      | 4      | 10     |
| Mn (g/kg)    | 13     | 17     | 17     | 8      | 31     | 24     | 29     | 26     | 17     |
| Ni (mg/kg)   | 4      | 4      | 10     | 11     | 14     | 16     | 16     | 11     | 16     |
| Pges (g/kg)  | 10     | 12     | 14     | 12     | 13     | 15     | 14     | 8      | 7      |
| Pb (mg/kg)   | 15     | 15     | 9      | 14     | 27     | 22     | 29     | 32     | 25     |
| Sges (g/kg)  | 7      | 10     | 12     | 15     | 13     | 12     | 13     | 12     | 19     |
| Zn (mg/kg)   | 10     | 12     | 13     | 13     | 24     | 20     | 18     | 15     | 16     |

Diese Beispiele zeigen, dass mithilfe bestimmter Königswasser-extrahierbarer Elementgehalte Einschätzungen zur Homogenität der Fläche möglich sind und somit auch bei der BZE, durch Vergleich der Königswasser-extrahierbaren Elementgehalte bei der BZE I gegenüber der BZE II, abgeschätzt werden kann, ob am jeweiligen BZE-Punkt der Einfluss der Flächenvariabilität größer ist als der Einfluss der zeitlichen Veränderung.

#### 11.4.1.3 *Nullpunktdefinition*

Der Übergang vom Auflagehumus zum Mineralboden ist nur selten scharf abgegrenzt und ist bei den meisten Waldstandorten fließend. Auf Standorten mit geringen Auflagen (Mull) und solchen mit Rohhumus sind die Übergänge relativ eindeutig. Bei den Moder-Standorten ist es jedoch häufig schwierig, eine eindeutige Grenze zu finden. Bei zu tiefer Grenzziehung und Probennahme gelangt zu viel Mineralboden in die Probe des Auflagehumus, es kommt zu einer „Verdünnung“ der Humusaufgabe mit Mineralboden und stets zu geringeren C-Gehalten in den jeweiligen Mineralbodenschichten. Umgekehrt gelangt bei zu hoch angesetzter Grenzziehung und Probennahme Humusmaterial in die oberste Mineralbodenprobe, sodass der C-Gehalt zu hoch ausfällt und der Humusvorrat unterschätzt wird.

Dies kann sich besonders beim Vergleich der Daten der BZE I mit der BZE II auswirken, wenn dieser tiefenstufenweise erfolgt.

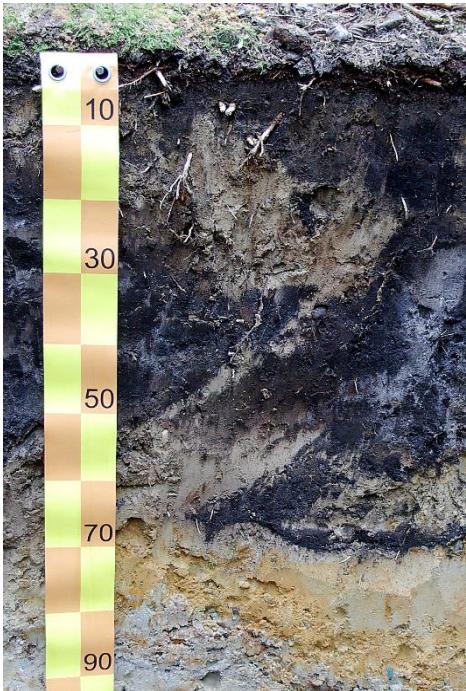
Aus diesem Grund wurden diejenigen 25 Aufnahmepunkte der BZE II in Niedersachsen näher betrachtet, bei denen der C-Gehalt in 0–5 cm bei der BZE I oder BZE II über 100 g/kg liegt und stark vom C-Gehalt der jeweils anderen BZE-Erhebung abweicht. Eine Auswertung der Profildaten ergab, dass nur in 3–4 Fällen tatsächlich eine Nullpunkt-Verschiebung die Ursache der hohen C-Gehaltsunterschiede war. In den anderen Fällen waren andere Störungen (Bodenschichtung, Pflügen, Durchwurzelung etc.) die Ursache (s. Abb. 157).



Punkt 585: Horizontierung gestört



Punkt 540: Tiefpflug



Punkt 916: Tiefpflug



Punkt 642: Durchwurzelung und Störung

*Abbildung 157: Mögliche Störungen an Bodenprofilen der BZE*

#### 11.4.1.4 *Verschleppung*

Das Verschleppungsproblem tritt nicht bei Probennahmen an der Profilgrube auf. Bei Probenahme mit Bohrzylindern kann jedoch C-reicheres Material an der Zylinderinnenwand durch Verschmieren in C-ärmere untere Schichten verlagert werden. Zwar kann dieses verschleppte Material vom Bohrkern abgeschabt werden, jedoch nur auf der einen Hälfte des Bohrkerns. Dies würde dann zu Mehrbefunden führen.

Durch die Probenahme in zwei Stufen (0–30 cm per Stechzylinder und mit Bohrzylinder in 30–90 cm) ist jedoch keine Verschleppung des C-reichen Materials aus 0–5 cm in C-arme Tiefenstufen unter 30 cm möglich. Damit ist der Fehler durch Verschleppung eher gering.

#### 11.4.1.5 *Veränderung der Trockenrohdichte in oberen Bodenschichten („Soufflé-Effekt“)*

Kommt es durch Veränderung der Humusform oder durch Entsauerung zu einer erhöhten Aktivität von Bodenwühlern, so kann der Boden durch verstärkte Durchmischung mit Humusmaterial aufgelockert werden. Da der aufgelockerte Boden mehr Volumen (und eine geringere Trockenrohdichte) hat, kann er nur nach oben „wachsen“ (Soufflé-Effekt). Bei der Probenahme nach Tiefenstufen wird von der Grenzlinie zwischen Humusaufgabe und Mineralboden an nach unten gemessen. Dies führt in den obersten Tiefenstufen des Mineralbodens dazu, dass die Proben z. B. aus 0–5 cm Tiefe nicht die gleiche Feinbodenmenge haben und damit zwischen BZE I und BZE II nicht mehr direkt vergleichbar sind. Der Fehler durch diesen Effekt ist schwer abschätzbar. Modellberechnungen von KÖLLING et al. (2010a) zeigen, dass der Fehler bei den aus den Elementkonzentrationen und der Trockenrohdichte errechneten Elementvorräten durchaus 20 % in der Tiefenstufe 0–5 cm ausmachen kann. Wenn bei Vorratsberechnungen hingegen das gesamte Profil bis z. B. 90 cm Tiefe addiert wird, wird der Fehler vernachlässigbar. Prinzipiell sind tiefenstufenbezogene Vorräte nur direkt vergleichbar, wenn die Trockenrohdichte und der Skelettanteil sich nicht verändert haben.

### 11.4.2 *Probleme der Probenanalyse*

#### 11.4.2.1 *Abschätzung der Streuung chemischer Parameter durch kontinuierliches Mitmessen von Kontrollstandards*

Im Labor der NW-FVA werden neben den speziell für die BZE II mitgeführten Kontrollstandards seit vielen Jahren weitere Kontrollstandards mitgeführt und die Ergebnisse in Kontrollkarten erfasst. In der Tabelle 44 sind die Ergebnisse ausgewählter Kontrollstandards im Vergleich zu den Ergebnissen der BZE II-Standards dargestellt. Daraus lässt sich ableiten, welche Parameter welchen analytisch bedingten Streuungen unterliegen.

Tabelle 44: Standardabweichungen für verschiedene Parameter ausgewählter Kontrollstandards

| Probenart | Standard    | Untersuchungsmethode          | Parameter | Mittelwert | Std-Abw. % |
|-----------|-------------|-------------------------------|-----------|------------|------------|
| Boden     | Harste30–50 | effektive Austauschkapazität  | Alges     | 256,77     | 2,4        |
|           |             |                               | Cages     | 221,90     | 2,8        |
|           |             |                               | H+        | 4,20       | 0,5        |
|           |             |                               | Kges      | 47,33      | 5,0        |
|           |             |                               | Mgges     | 26,61      | 4,1        |
|           |             |                               | Mnges     | 106,03     | 3,1        |
| Boden     | ISE974      | Königswasseraufschluss        | Alges     | 16,29      | 3,6        |
|           |             |                               | Cages     | 0,19       | 8,9        |
|           |             |                               | Cdges     | 0,04       | 14,9       |
|           |             |                               | Coges     | 3,97       | 7,2        |
|           |             |                               | Crges     | 20,92      | 2,4        |
|           |             |                               | Cuges     | 4,61       | 4,5        |
|           |             |                               | Feges     | 16,37      | 2,6        |
|           |             |                               | Kges      | 2,92       | 3,9        |
|           |             |                               | Mgges     | 1,53       | 2,6        |
|           |             |                               | Mnges     | 0,42       | 2,6        |
|           |             |                               | Nages     | 0,05       | 29,5       |
|           |             |                               | Ni ges    | 7,42       | 4,4        |
|           |             |                               | Pbges     | 50,79      | 4,9        |
|           |             |                               | Pges      | 0,36       | 4,5        |
| Sges      | 0,17        | 5,2                           |           |            |            |
| Znges     | 23,73       | 4,1                           |           |            |            |
| Humus     | NFVH        | Elementaranalyse              | Cges      | 425,66     | 1,3        |
|           |             |                               | Nges      | 21,05      | 1,4        |
| Boden     | Boden4      | Elementaranalyse              | Cges      | 24,15      | 0,8        |
|           |             |                               | Nges      | 0,48       | 2,1        |
| Pflanze   | NHARZ       | Druckaufschluss Salpetersäure | Alges     | 0,09       | 3,2        |
|           |             |                               | Cages     | 5,62       | 1,6        |
|           |             |                               | Cdges     | 0,15       | 26,9       |
|           |             |                               | Coges     | 0,28       | 14,3       |
|           |             |                               | Crges     | 0,38       | 19,5       |
|           |             |                               | Cuges     | 2,71       | 4,7        |
|           |             |                               | Feges     | 0,06       | 1,6        |
|           |             |                               | Kges      | 3,36       | 1,5        |
|           |             |                               | Mgges     | 0,81       | 1,5        |
|           |             |                               | Mnges     | 1,37       | 1,6        |
|           |             |                               | Nages     | 0,04       | 12,2       |
|           |             |                               | Niges     | 1,36       | 10,7       |
|           |             |                               | Pbges     | < 1,829    | -          |
|           |             |                               | Pges      | 1,25       | 2          |
| Sges      | 0,93        | 1,7                           |           |            |            |
| Znges     | 33,1        | 1,9                           |           |            |            |

#### 11.4.2.2 *Eingeschränkte Repräsentativität von Teilproben*

##### 11.4.2.2.1 Probenvorbereitung

Bei der Analyse von Mineralbodenproben mit hohem C-Gehalt und Humusproben mit hohem Mineralboden- bzw. Sand-Anteil zeigten sich bei Wiederholungsanalysen von Proben der BZE I aus Sachsen-Anhalt erhebliche Abweichungen bei den C-Gehalten um bis zu 100 % (s. GAFA 2014, Methode A1.4.1, dort Anhang 1).

Als mögliche Fehlerursache stellte sich die Entnahme einer Teilprobe der gesiebten Probe aus dem Probenaufbewahrungsgefäß heraus, da sich die sehr viel leichteren organischen Partikel von den schwereren Mineralpartikeln mechanisch trennen und Schichten im Gefäß bilden können, die durch Umrühren nicht vollständig homogenisiert werden. Um das Ausmaß des dadurch möglicherweise verursachten Fehlers zu bestimmen, wurde ein Methodenvergleich an sechs Humus- und zwei Bodenproben durchgeführt. Verglichen wurde dabei die im Labor der NW-FVA übliche Methode des Umrührens der gesiebten Probe im Probengefäß und anschließender Entnahme einer Teilprobe mit einem Probenlöffel für das Mahlen der Probe mit der Methode der Homogenisierung der Probe über einen automatischen Probenteiler und anschließender Mahlung einer Teilprobe sowie der anschließenden Analyse der Teilproben. Dabei stellte sich heraus, dass die einfache Handrührmethode nur unwesentlich größere Streuungen verursacht als die aufwendige Probenteilermethode. Der mittlere Variationskoeffizient von 3,5 % (Spanne zwischen 0,4 und 5,9 %) beim Handrühren der Probe ist nur unwesentlich schlechter als der mittlere Variationskoeffizient von 2,6 % (Spanne zwischen 0,2 und 10,8 %) beim Verwenden eines Probenteilers.

Damit kann davon ausgegangen werden, dass im Regelfall die gewählte Handrührmethode nicht zu verfälschten Analysenwerten führt. Lediglich bei Humusproben mit geringer Probenmenge führt das Rühren von Hand nicht ausreichend zur Probenhomogenisierung, was die gefundenen hohen Abweichungen bei den Nachanalysen von Proben der BZE I aus Sachsen-Anhalt erklärt.

##### 11.4.2.2.2 Aufschlüsse und Extrakte

Gesiebte Humusproben sind teilweise sehr inhomogen, da sie noch Bruchstücke von Blättern und Nadeln enthalten können. Bei Extraktions- oder Perkulationsmethoden wie der Bestimmung der Austauschkapazität werden zum Teil nur kleine Probenmengen eingewogen (bei der AK Humus-Bestimmung nur 1 g). Da zudem die Benetzung von getrocknetem organischen Material sehr schlecht ist, besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass die Ergebnisse der Austauschkapazitätsbestimmung von Humusproben (AK Humus) stark streuen. Um diese Streuung zu erfassen, wurden grundsätzlich Doppelbestimmungen bei der AK Humus durchgeführt und die Abweichungen ermittelt. Diese lag bei manchen Proben für einige Elemente bei bis zu 50 %. Aus diesem Grund wurde entschieden, bei Abweichungen von mehr als 25 % bei drei oder mehr Elementen eine dritte Perkulation der Humusprobe

durchzuführen und dann entweder den Mittelwert aus den drei Perkolationen oder den Mittelwert aus den zwei nahe beieinander liegenden Perkolationen zu verwenden und den dritten Wert als Ausreißer zu eliminieren. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass in der Regel der Variationskoeffizient auch bei den inhomogeneren Proben unter 20 % lag.

Einen Eindruck von den Variationskoeffizienten der verschiedenen Methoden gibt die Tabelle 44.



## 12 Aspekte des BZE-Datenmanagements

*Andreas Hafner, Jan Evers*

### 12.1 Anforderungen

Die im Rahmen der BZE II durchgeführten Erhebungen und deren übergeordnete Zielsetzungen stellten erhebliche Anforderungen an das Datenmanagement:

- in fast allen Kompartimenten wurde der Erhebungsumfang gegenüber der BZE I deutlich ausgeweitet oder zusätzliche Erhebungen eingeführt (ertragskundliche Aufnahme von Einzelbäumen, Verjüngung, Bodenvegetation, getrennte Beprobungen zur Bodenphysik und Organika)
- intern wurden teilweise noch über den BZE II-Katalog hinausgehende Erhebungen beschlossen, z. B. Zuwachsbohrungen und Triebblängen-Messungen
- in der BZE I und BZE II gleichlautende Parameter sind nicht immer tatsächlich auch inhaltlich gleichbedeutend (z. B. Umstellung der Referenzbasis von der Kartieranleitung (KA) 3 (AG BODENKUNDE 1982) auf die KA 5 (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN 2005))
- über die pure Dokumentation des aktuellen Zustands der Waldböden und Bestände hinaus mussten mit der BZE II auch erstmals deren zeitliche Veränderungen ableitbar werden

Damit war eine Weiternutzung der für die BZE I entwickelten IT-Lösungen von vornherein ausgeschlossen. Die erforderlich werdende Neukonzeption richtete sich an folgenden Anforderungen aus:

#### 12.1.1 *Integration der Merkmalsgruppen*

Um zunächst mit dem alleinigen Fokus auf die BZE II kompartimentsübergreifende Fragestellungen (z. B. Ernährungszustand der Bäume vs. Bodenchemismus) möglichst einfach und sicher zu ermöglichen, war für alle beteiligten Kompartimente (z. B. Bestandsaufnahme, Bodenprofilbeschreibungen, Bodenvegetationsaufnahme, Labordaten) eine integrative Datenverwaltung vorzusehen, also eine Separierung in physikalisch isolierte Datenbestände, z. B. getrennt nach Feld- und Labordaten oder Bestandes- und Bodendaten, zu vermeiden (Datenintegration der 1. Ebene, s. Abb. 158).

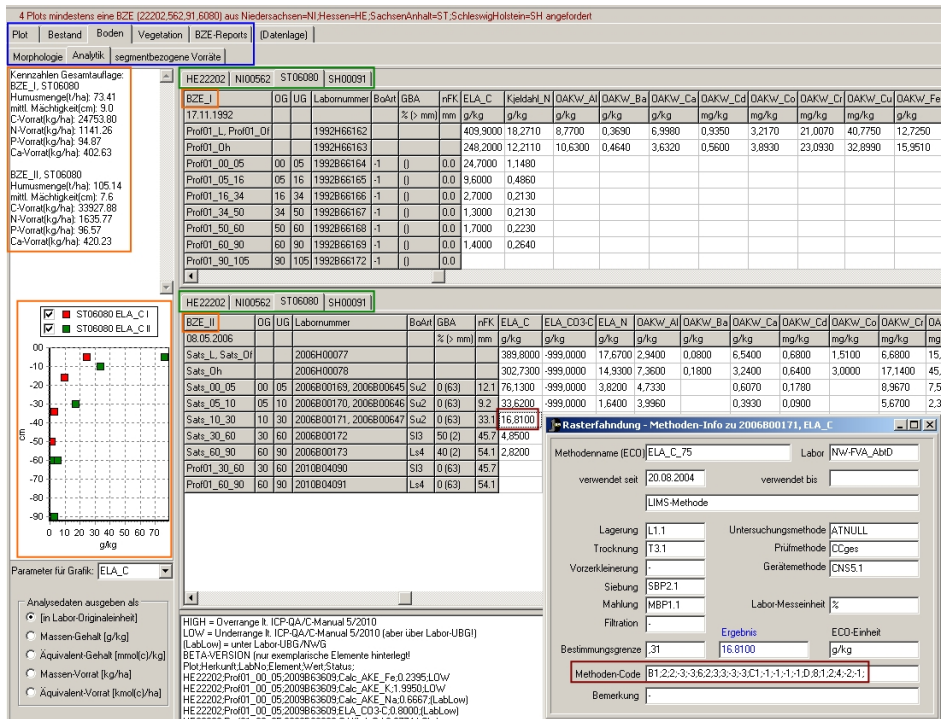


Abbildung 158: Integrierende BZE-Programmierfläche

### 12.1.2 Integration der Datenbestände der Bundesländer

Zum zweiten musste es vor der Zielsetzung späterer bundeslandübergreifender Auswertungen gelingen, die Feld-Kampagnen der einzelnen Bundesländer IT-technisch zu harmonisieren und zu integrieren, obwohl es bei der Durchführung nennenswerte Verfahrensunterschiede gab (die Konzeption der BZE II-Durchführung in den heutigen Partnerländern der NW-FVA fiel noch in die Phase vor Gründung der NW-FVA als Mehrländeranstalt) und die BZE II-Anleitung während der ersten Außenaufnahmen teilweise noch in der Überarbeitung war. Die bundeslandübergreifende Datenhaltung stellt eine 2. Ebene der Datenintegration dar (s. Abb. 158). Hieraus erwachsen nicht nur technische, sondern auch fachlich-inhaltliche Anforderungen, wie z. B. die Harmonisierung mehrerer tradierteter Standortkartierungsverfahren im Hinblick auf eine länderübergreifende Auswertbarkeit (vgl. SCHMIDT et al. 2015). Dies sei am Beispiel der Kategorisierungen der Nährstoffversorgung im Rahmen der Standortkartierung der beteiligten Bundesländer in Tabelle 45 verdeutlicht.

Tabelle 45: Zuordnung landesspezifischer Kodierungen der Nährstoffversorgung zu übergreifenden Kategorien

| länderübergreifende Kategorie | übergreifender Code | Codes NI, HB, SH | Codes Hessen | Codes Sachsen-Anhalt |
|-------------------------------|---------------------|------------------|--------------|----------------------|
| carbonat-eutroph              | 11                  | 6                | 1+           | RC                   |
| eutroph                       | 12                  | 5+ 5             | 1 1-         | R                    |
| gut-mesotroph                 | 21                  | 5- 4+            | 2+           | K                    |
| mesotroph                     | 22                  | 4 4- 3+ 3        | 2            | M M+                 |
| schwach-mesotroph             | 23                  | 3- 2+ 2          | 2-           | Z                    |
| oligotroph                    | 31                  | 2- 1             | 3            | A                    |

NI = Niedersachsen; HB = Bremen; SH = Schleswig-Holstein

### 12.1.3 Integration von BZE I und II

Ein weiteres wesentliches Auswertungsziel lag in der Analyse der zeitlichen Veränderung des Boden- und Bestandeszustands seit der BZE I. Daraus folgte die Notwendigkeit der direkten Gegenüberstellbarkeit der aktuellen und der damaligen Ergebnisse für die einzelnen Erhebungspunkte, also die zusätzliche Übernahme der BZE I-Daten in die neue Umgebung (3. Integrationsebene, s. Abb. 158). Dabei war neben allen inhaltlichen Veränderungen insbesondere für Niedersachsen der Umstand zu beachten, dass es zwischen BZE I und BZE II zu nennenswerten Raster-Bereinigungen kam, also nicht alle Plots grundsätzlich zu beiden Inventuren gehören.

### 12.1.4 Integration von Methodeninformation

Die Laboranalytik steht bezüglich mehrerer Auswertungsziele im Mittelpunkt des Interesses, stellt sich aber gleichzeitig (wie weiter unten näher ausgeführt) äußerst komplex dar: Allein bedingt durch die Mehrländerzuständigkeit waren spezifische Datenformate unterschiedlicher Labore zu verarbeiten, wobei Methodenunterschiede recherchierbar bleiben mussten (4. Integrationsebene, s. Abb. 158).

Aber auch bei der Dokumentation der Bezüge (Herkünfte) von Laborproben liegt die Tücke oft im Detail: Ob sich z. B. die Blatt-Nadel-Beprobung einer Baumart auf einem Plot bei der BZE I und II bei der Mischprobenbildung auf dieselben Baumindividuen bezieht, sollte im Einzelfall genauso erkennbar bleiben, wie die Frage nach der exakten Herkunft der Bodenproben (Profilgruben-Einzelprobe oder Satelliten-Mischprobe? Horizontbezogene oder tiefenstufenbezogene Probe?).

### 12.1.5 Externe Fachinhalte

Weiterhin erschien eine Einbindung der Daten in erweiterte Fachbezüge (über die beiden Inventuren der BZE hinaus) erforderlich. So musste die direkte Verknüpfbarkeit der BZE-Daten mit den jährlichen Erhebungen der Waldzustandserhebung (WZE) gewährleistet werden, insbesondere für die Plots, auf denen sowohl die WZE als auch die BZE durchgeführt werden. Nicht zuletzt sollte ein Abgleich mit den Standortkartierungen der Bundesländer oder Bodeninventuren des Intensiven Umweltmonitorings (Level II) oder eine Erfolgskontrolle der Kompensations-Kalkungen ermöglicht werden, was ein grundlegendes Konzept zur technischen Integration der mit unterschiedlichen Zielvorstellungen unabhängig voneinander erhobenen Daten erforderte (weitere Integriertebenen).

Nicht alle Details werden im Rahmen jeder einzelnen Auswertung relevant, aber Ziel des IT-Konzepts war es insgesamt, sämtliche erhobenen Ausgangsinformationen so zu verwalten und, flankiert von grundlegenden Auswertungsfunktionen, so zur Verfügung zu stellen, dass allen potenziellen Fragestellungen schnell, einfach und verlässlich nachgegangen werden kann, der Gesamtdatenbestand dabei allen Bearbeitern stets identisch vorliegt und die Entstehung fach- oder personenbezogener „Daten-Inseln“ oder Verrechnungsverfahren (s. Abb. 159, linker Teil) vermieden wird.

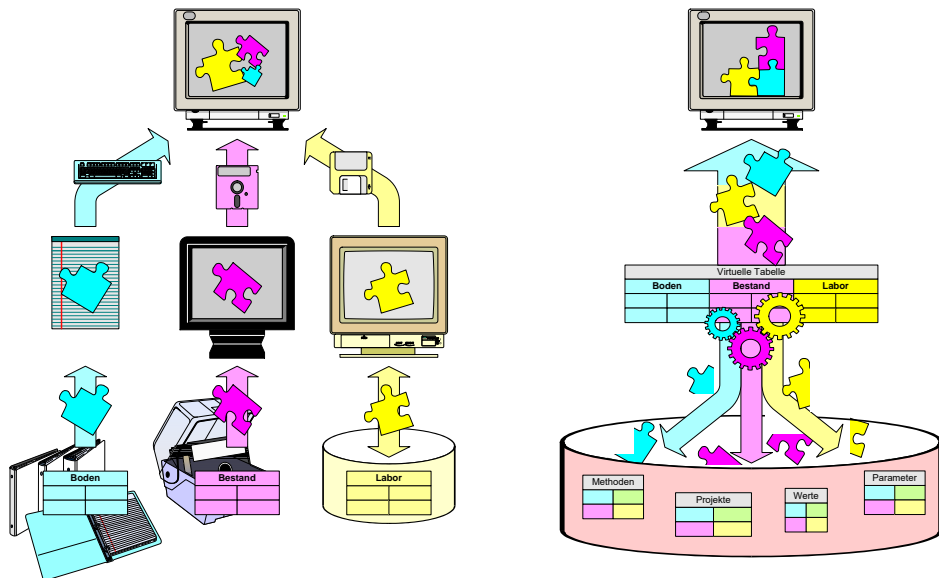


Abbildung 159: Gegenüberstellung von Datenverwaltung in Teildatenbanken (links) und mit zentraler Datenintegration (rechts)

## 12.2 Umsetzung

In der Abteilung Umweltkontrolle der NW-FVA wird seit 1996 das forstökologische Datenbanksystem ECO entwickelt und betrieben, das neben der vollständigen Integrierbarkeit einschlägiger Erhebungen u. a. mit der konzeptionellen Leitidee entwickelt wurde, zusätzliche Inhalte auch nachträglich ohne strukturelle Änderungen integrieren zu können (HOPPE u. SCHULZE 1997, vgl. Abb. 159, rechter Teil). Dies hat neben einer einheitlichen, redundanzfreien Datenhaltung den gravierenden Vorteil, auch für neu zu übernehmende Datenbestände auf existierende ausgetestete Funktionalitäten zurückgreifen zu können.

Im Zuge der Analyse des BZE-Erhebungsumfangs zeigte sich wie schon bei früheren Projekten, dass dieser Konzept-Anspruch in der Praxis umsetzbar war. Erforderlich wird im Einzelfall die Definition einer Verfahrensweise, wie spezifische Teilinformationen in die bereits bestehenden, notwendigerweise abstrakten Datenstrukturen zu übernehmen sind, wie also die Datenstruktur bezüglich des konkreten Projektes zu interpretieren ist (s. Abb. 160, s. SCHULZE 2012).

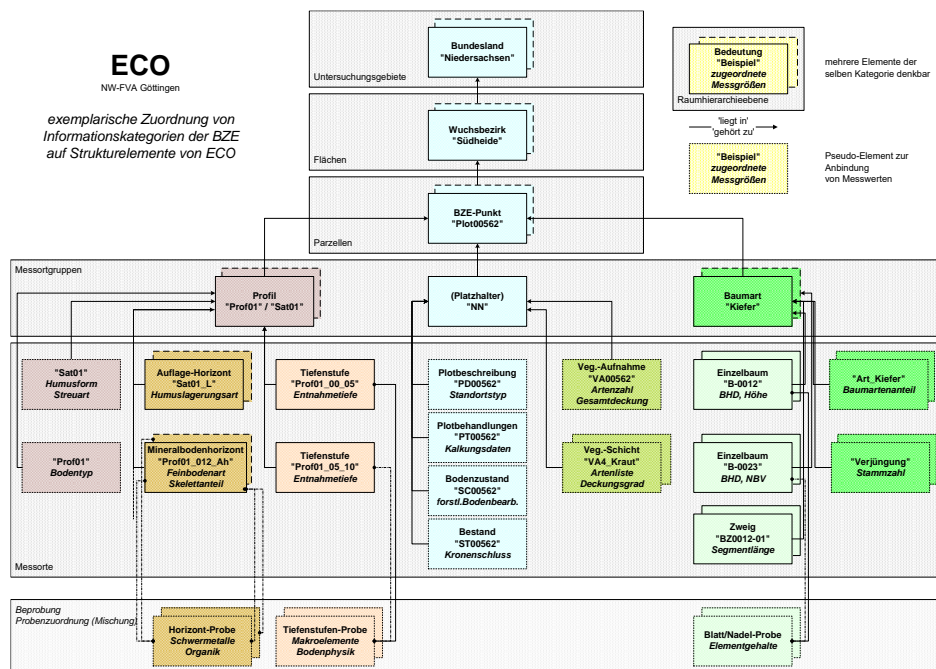


Abbildung 160: Zuordnung von Informationskategorien der BZE zu Strukturelementen von ECO

### 12.2.1 Identifizierung von Informations-Kategorien

Wichtig bei der Analyse der Projekt-Informationen als Vorstufe einer Anleitung zu ihrer Abbildung in das Datenmodell war eine saubere Kategorisierung, meist auch eine Hierarchisierung der Informationen, die nicht unbedingt von der zugrundeliegenden Fach-Arbeitsanleitung in ausreichendem Maß vorgegeben wird.

In Bezug auf die BZE wurden folgende Informations-Kategorien identifiziert und differenziert (s. Abb. 160):

- *Plotbezogene*, zeitlich unveränderliche (z. B. Koordinaten, Relief)
- *Plotbezogene*, zeitlich veränderliche (z. B. Kalkungsmaßnahmen)
- *Inventurbezogene*, zeitlich variable (z. B. die Standortstypisierung)
- *Profilbezogene* (z. B. die Humusform, die an einzelnen Satelliten abweichend sein kann)
- *Horizontbezogene* (z. B. die Feinbodenart, die in Horizonten des Profils wechseln kann)
- *Tiefenstufenbezogene* (z. B. Bereiche der Probenentnahme)
- *Bestandesbezogene* (z. B. Kronenschlussgrad)
- *Baumartenbezogene* (z. B. Verjüngungsanteile)
- *Einzelbaumbezogene* (z. B. Baumhöhe und Kronenverlichtung)
- *Vegetationsschichtbezogene* (z. B. Artenzahl)
- *Vegetationsartbezogene* (z. B. Deckungsgrad in einer Schicht)

Einhergehend mit dieser Analyse empfiehlt sich die Festlegung bestimmter Konventionen zur internen Benennung von Datenobjekten im jeweiligen fachlichen Kontext.

### 12.2.2 Integration der Fach-Arbeitsanleitung

Die Projekt-Integration in ECO zog auch die vollständige Hinterlegung der jeweiligen Fach-Arbeitsanleitung i. S. der Erhebungsparameter in der Datenbank nach sich (hier: Anleitungen der BZE I und BZE II). Betrachtet man die Informationen, also die Daten einer Kategorie i. e. S. konkret, ist für viele Parameter datenbank-technisch die Einhaltung einer Liste vorgegebener (erlaubter) Werte zu gewährleisten. Dies ist eine Voraussetzung, um bei Auswertungen zuverlässig stratifizieren zu können, also die Gewissheit zu haben, nicht von der Bedeutung her identische Inhalte in mehreren abweichenden Schreibweisen vorzufinden, die man potenziell nicht alle mit einer Selektion erfasst. Die Hinterlegung dieser Werte-Listen ist damit ein grundlegendes, in der Datenbankkonzeption berücksichtigtes Merkmal der Qualitätssicherung.

### 12.2.3 Projektübergreifende Listen mit projektspezifischen Kodierungen

Durch die Integration eines zusätzlichen Projektes ergeben sich i. d. R. Überschneidungen mit bereits in der Datenbank existierenden Inhalten, die dann einheitlich und projektübergreifend nutzbar werden sollten. Unter praktischen Aspekten ist es dabei bedeutsam, dass die Einzelinformationen – trotz integrativer, redundanzfreier Datenhaltung – projektspezifisch zuordenbar und kodierbar bleiben, da die Feldbelege i. d. R. in Code-Form ausgefüllt werden und auch Berichte oft projektspezifisch kodiert zu erstellen sind. Ein und derselbe Informationsgehalt, z. B. die Kalkgehaltsstufe eines Mineralbodenhorizontes, wird aber durchaus in verschiedenen Projekten – selbst zwischen BZE I und BZE II – verschieden kodiert (s. Tab. 46).

Tabelle 46: Kodierung von Kalkgehaltsstufen in verschiedenen Projekten

| Kalkgehaltsstufe      | BZE I | BZE II | SOK  |
|-----------------------|-------|--------|------|
| carbonatfrei          | cf    | c0     | c0   |
| sehr carbonatarm      | -     | c1     | c1   |
| carbonatarm           | ca    | c2     | c2   |
| durchsetzt            | cd    | -      | cx   |
| carbonathaltig        | ch    | c3     | c3   |
| mittel carbonathaltig | -     | -      | c3.2 |
| stark carbonathaltig  | -     | -      | c3.3 |
| carbonatreich         | cr    | c4     | c4   |
| sehr-carbonatreich    | -     | c5     | c5   |
| extrem-carbonatreich  | -     | c6     | c6   |
| Carbonat              | -     | c7     | -    |
| keine Angabe          | mv    | -9     | -9   |

SOK = Standortkartierung Niedersachsen

Umgekehrt kann ein identischer Code projektübergreifend verschiedene Bedeutungen haben, z. B. bedeutet der Code „HS“ des Parameters „Reliefformen“ bei der BZE I „Hangschulter“, in der BZE II „Hangversteilung“.

Aus der zentralen Speicherung des Volltextes ergibt sich eine maximal mögliche Transparenz, in dem inhaltlich Gleiches zwar in den vorgesehenen, unterschiedlichen Codes, nicht aber mit unterschiedlichen oder mehrfachen Nennungen der Bedeutung abgelegt wird.

#### 12.2.4 Differenzierung von Fehlwerten

Nicht unerheblich für eine lückenlose, hoch qualitative und interpretierbare Datenerhaltung ist eine adäquate Differenzierung von Fehlwerten. Fehlwerte können entstehen, wenn

- Einträge vergessen wurden („keine Angabe“)
- bestimmte, obligatorische Angaben im jeweiligen Kontext obsolet sind (z. B. Kronenschlussgrad der Unterschicht in einem einschichtigen Bestand: „entfällt“)
- aus den Feld-Protokollen ersichtlich wird, dass ganze Teilerhebungen nicht durchgeführt wurden (z. B. Bestandes-Ansprache nach Windwurf: „nicht erhoben“)
- Einträge auf Formularen nicht entziffert werden konnten („unklar“)

Von solchen Fehlwerten klar abzugrenzen sind fehlende Merkmalsausprägungen, also z. B. die Mächtigkeit „0“ cm eines nicht existierenden Oh-Horizonts (für den aber über eine solche Eintragung klar dokumentiert wird, dass der Eintrag nicht schlicht vergessen wurde), die Kronenverlichtungsangabe „0“ %, „keine“ Durchwurzelung oder „unbekannt“ bei einem beobachteten Merkmal mit nicht klärbarer Schadursache. Diese Sachverhalte dürfen im Hinblick auf die spätere Auswertbarkeit im technischen Sinne (wo Leerpositionen immer stören) wie im inhaltlichen Sinne (wo ein konkreter Eintrag immer dieselbe Bedeutung haben sollte) nicht durch „-“ oder schlichtes Freilassen des Datenfeldes abgebildet werden. Auch typischerweise optionale Freitext-Felder wie „Bemerkung“ werden deshalb ggf. mit einem Inhalt wie „(keine)“ durchgängig gefüllt. Um maximale Transparenz und Sicherheit bei der Dateninterpretation zu erreichen, sind Leerwerte also in der Datenbank insgesamt nicht vorgesehen.

#### 12.2.5 Methodendokumentation der Laboranalytik

Einen Informationsbereich mit besonderem qualitativen und quantitativen Gewicht stellt die Laboranalytik dar. Hier entstanden im Rahmen der BZE besondere Anforderungen, da die Ergebnisse diverser Labore, die sich auf unterschiedliche Teilproben teilweise überlappende Profilabschnitte beziehen können, integrativ zu verwalten waren. So gab es getrennte Beprobungen und/oder Analysen von Teilproben für Hauptelemente, Schwermetalle, Organika und bodenphysikalische Parameter, die häufig in unterschiedlichen Laboren (d. h. mit unterschiedlicher technisch-struktureller und fachlicher Notation) durchgeführt wurden. Auch Unterprogramme wie das EU-BioSoil-Projekt im Rahmen der BZE II erforderten die Dokumentation spezifischer Probenzuordnungen und Beprobungs- und Analysemethoden. Nicht zuletzt lagen in einer Probe häufig multiple Ergebnisse zu einem Element vor, wenn unterschiedliche Materialaufschlüsse durchgeführt wurden (was wiederum in diversen Laboren und mit großem zeitlichen Abstand erfolgt sein kann).



Zwischen BZE I und BZE II erfolgten i. d. R. auch methodische Weiterentwicklungen bzw. Methodenfestlegungen. Für die Humusaufgaben ergab eine Analyse der Laborverfahren z. B. zunächst folgendes, in der Tabelle 47 dargestelltes Bild:

*Tabelle 47: Übersicht der Analyseverfahren der Humusaufgaben bei der BZE I und II für Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt*

|                | BZE I                  | BZE II                 |
|----------------|------------------------|------------------------|
| Niedersachsen  | Druckaufschluss        | Königswasseraufschluss |
| Hessen         | Königswasseraufschluss | Königswasseraufschluss |
| Sachsen-Anhalt | Gesamtaufschluss       | Königswasseraufschluss |

Damit war für die BZE I zunächst kein direkter Ländervergleich möglich und eine Zeitreihenbetrachtung nur für Hessen aussagekräftig. Erst über die Nachanalyse von Rückstellproben der BZE I konnte hier eine einheitlich interpretierbare Datenlage hergestellt werden (durchgängig Königswasseraufschluss).

Insgesamt wird also ein Vergleich von Laborergebnissen – egal, ob auf der zeitlichen Schiene BZE I/II oder auch bundeslandübergreifend innerhalb einer Inventur – erst auf der Basis einer Methodendokumentation zulässig, die Aussagen zur Vergleichbarkeit von methodischen Varianten erlaubt. Die interne Datenhaltung muss damit mindestens die Verfahren der Probenvorbereitung, des Aufschlusses und der Messung sowie Einheiten und Bestimmungsgrenzen umfassen und diese müssen wiederum technisch unmittelbar mit den Analyseergebnissen verknüpft verwaltet werden.

### 12.2.6 Anwendungsprogrammierung

Die aus den dargestellten Anforderungen und Aspekten resultierende Datenstrukturierung führt zur technischen Speicherung der Daten in einer Form, die für den Nutzer insofern „wertlos“ ist, als er die benötigten Datensätze in der Datenbank nicht so vorfindet, dass sie unmittelbar für ihn verwendbar sind. Die Datenspeicherung kann nämlich gerade nicht in einer nah an die verwendeten Formulare angelehnten Form erfolgen (wie sie zwar traditionell üblich ist, aber wodurch sie auch einschlägige Schwächen aufweist). Vielmehr müssen die i. d. R. physikalisch stark zergliedert gespeicherten Teilm Informationen durch sogenannte „Sichten“ in eine allgemein verständliche Form rücktransferiert werden. Diese Sichten müssen darüber hinaus in Programmoberflächen eingebunden werden, um z. B. alle wesentlichen Datenbereiche eines Plots gleichzeitig darzustellen. Es wird also eine Anwendungsprogrammierung erforderlich, die es dem Nutzer ermöglicht, ohne Kenntnisse der internen Datenstrukturen auf die gewünschten Informationen in einer Form zuzugreifen, die primär inhaltlichen (und nicht technischen) Erfordernissen genügt.

Grundsätzlich wird im entwickelten Anwendungsprogramm die Auswahl und Betrachtung unterschiedlichster Plot-Teilmenen unterstützt, wobei man nach zeitlichen (BZE I/II), räumlichen (z. B. Bundesländer, Wuchsgebiete), administrativen (Forstämter, Landkreise) oder inhaltlichen (z. B. Besitzart, Baumart, Kalkungsstatus) Parametern stratifizieren kann (s. Abb. 161, rechts). Standard-Verrechnungen werden automatisch ausgeführt und sind teilweise parametrisierbar. Es ist die Ausgabe einschlägiger Standard-Reports (u. a. Plot-, „Steckbriefe“, s. Kap. 2) möglich, aber auch anspruchsvollerer, z. B. zeitreihenorientierter Zusammenstellungen. Auch die Zielformate für die BZE-Bundesdatenbank lassen sich automatisiert generieren.

Aspekte des technischen Grundkonzeptes der Anwendungsentwicklung, die mit Borland Delphi umgesetzt wurde, sind:

- eine übergreifende, hierarchische, erweiterbare Klassenbildung für Datenobjekte aus der WZE, der BZE, der Standortkartierung und aus Bodeninventuren (s. Abb. 161, links)
- vollständige Kapselung aller Datenbankzugriffe in Anwendungsmasken
- zentrale Hinterlegung von statischen Basisinformationen (z. B. Parameter für nFK-Berechnung etc.) in geschützten Steuerdateien
- Eingrenzung von Programmfunktionen in Abhängigkeit von Benutzerrechten.

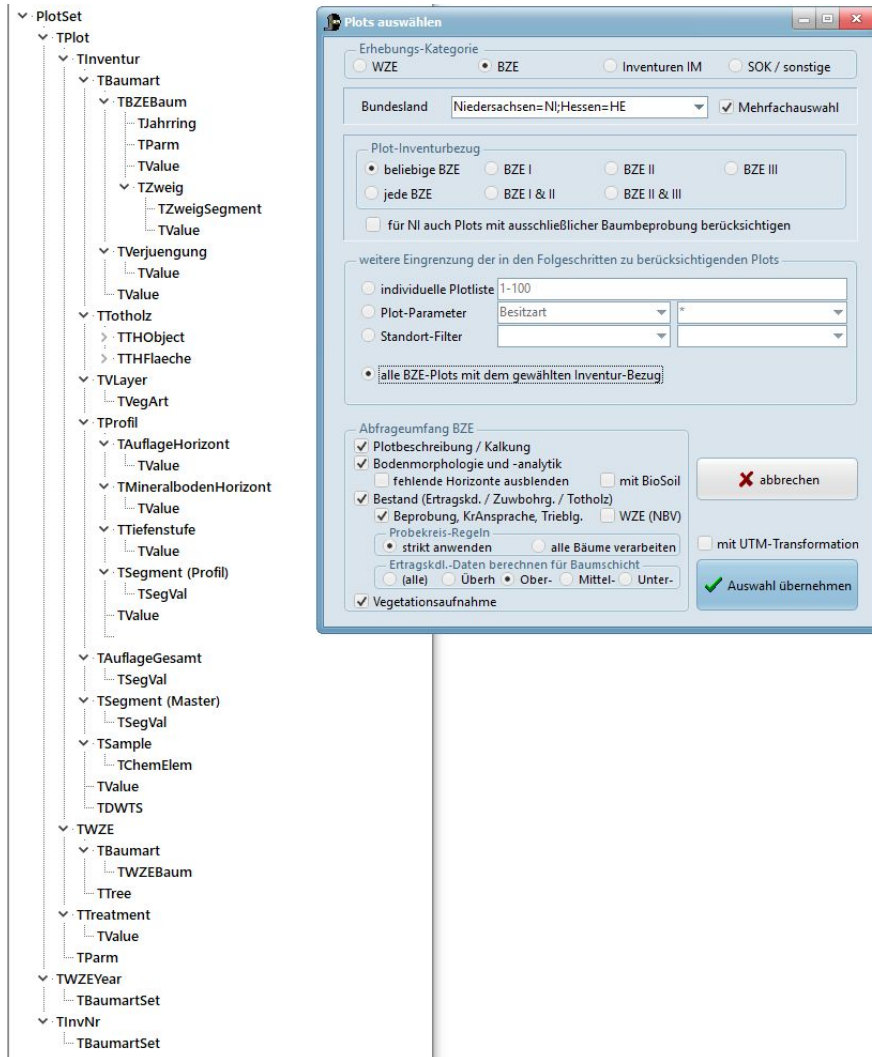


Abbildung 161: Klassendefinitionen und -hierarchie sowie Plot-Auswahlmaske der BZE-Applikation

### 12.3 Praktische Erfahrungen

Der eigentlichen wissenschaftlichen Datenauswertung muss erfahrungsgemäß eine Phase der Datenvalidierung vorausgehen, bzw. bringen erste Auswertungsschritte i. d. R. Dateninkonsistenzen oder Unvollständigkeiten zum Vorschein. Zur Klärung von Detailfragen (z. B. der ausgewiesene Bodentyp passt nicht zur Horizontfolge) erwies es sich als äußerst hilfreich, neben den eigentlichen Erhebungsdaten ergänzende Medien zu integrieren und dem Benutzer unmittelbar zur Verfügung zu stellen (s. Abb. 162): Fotos der Bodenprofile und des Bestandes, großmaßstäbige Lagepläne (im Hinblick auf Einfluss z. B. von Landwirtschaft, Besiedlung oder Verkehrsstrassen in der Nachbarschaft des Plots) sowie die gescannten Originalbelege (z. B. Wert fehlt nur in der Datenbank, nicht aber auf dem Beleg) konnten oft direkt zur Klärung von Unplausibilitäten beitragen.

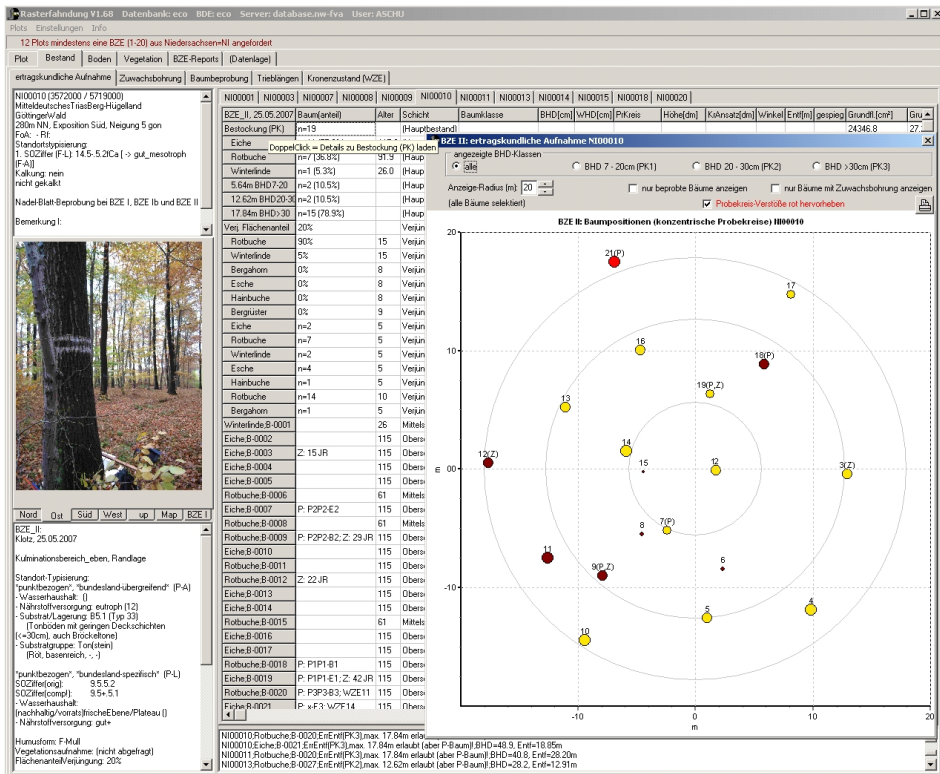


Abbildung 162: Einbindung von Fotos und Graphiken zur Veranschaulichung der Plot-Situation

Die Auswertungen i. e. S. können dann auf dem „geprüften“ Datensatz erfolgen. Für sie gilt, dass bei der Datenerhebung oder Laboranalyse existierende Verfahrensunterschiede routinemäßig egalisiert werden müssen, damit eine einheitliche Bewertung der Informationen ohne größeren Aufwand möglich wird. So erfolgten z. B.

die Bodenprobenahmen bei der BZE I in Sachsen-Anhalt horizontbezogen, bei der BZE II aber tiefenstufenbezogen. Um die Daten trotzdem unmittelbar vergleichbar zu machen, erfolgt eine automatisierte, durch den Nutzer parametrisierbare Umrechnung auf einheitliche Bodensegmente (s. Abb. 163).

Gleiches gilt für zentrale Parameter wie z. B. den Kohlenstoff-Gehalt in Bodenproben: Hier wird aus potenziell unterschiedlichen Ausgangsgrößen (C<sub>ges</sub>, C<sub>org</sub>, CaCO<sub>3</sub>-C) einheitlich C<sub>org</sub> abgeleitet, um übergreifende Bewertungen zu erlauben (gleiches gilt für pH-Werte und die Austauschkapazität). Dies ist auch für stratifizierende Größen wie z. B. die Trophiestufe der Standortskartierung implementiert, die zur Programmlaufzeit aus bundeslandspezifischen Angaben zu übergreifenden Kategorien umgeformt wird (vgl. Tab. 46, S. 407).

| ST06080           |  |                   |      |        |         |       |       |         |       |      |            |         |        |
|-------------------|--|-------------------|------|--------|---------|-------|-------|---------|-------|------|------------|---------|--------|
| BZE_I, 17.11.1992 | Zuordnungsfaktoren   | TRD               | GBA  | FBV    | nFK(dw) | pHH2O | pHKCl | CorgI   | NI    | BS   | AKI        | AKE_AI  | AKE_Al |
|                   |  | g/cm <sup>3</sup> | Vol% | t/ha   | mm      | (DIN) | (DIN) | kg/ha   | kg/ha | %    | kmol(c)/ha | kg/ha   | kg/ha  |
| 0-5               | Prof01_00_05 (100*100)   | 1.15              | 8.9  | 523.8  | 0.0     | 3.70  | 3.45  | 12938.5 | 601.4 | 42.3 | 38.9       | 144.79  |        |
| 5-10              | Prof01_05_16 (45*100)  | 1.64              | 18.1 | 671.6  | 0.0     | 3.96  | 3.50  | 6447.2  | 326.4 | 33.7 | 30.9       | 148.42  |        |
| -10-30            | Prof01_05_16 (55*30)+Prof01_16_34 (78*70)                        | 1.56              | 21.3 | 2451.5 | 0.0     | 4.09  | 3.61  | 12180.8 | 742.3 | 32.2 | 94.9       | 504.84  |        |
| -30-60            | Prof01_16_34 (22*13)+Prof01_34_50 (100*53)+Prof01_50_60 (100*33) | 1.11              | 29.6 | 2356.6 | 0.0     | 3.97  | 3.56  | 4012.4  | 509.2 | 29.5 | 215.1      | 1239.10 |        |
| -60-90            | Prof01_60_90 (100*100)   | 1.27              | 9.8  | 3447.1 | 0.0     | 3.94  | 3.51  | 4825.9  | 910.0 | 49.7 | 668.8      | 2854.86 |        |

| ST06080            |                      |                   |      |        |         |       |       |         |        |      |            |        |         |        |        |        |        |
|--------------------|----------------------|-------------------|------|--------|---------|-------|-------|---------|--------|------|------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| BZE_II, 08.05.2006 | Zuordnungsfaktoren   | TRD               | GBA  | FBV    | nFK(dw) | pHH2O | pHKCl | CorgI   | NI     | BS   | AKI        | AKE_AI | AKE_Ca  | AKE_Fe | AKE_K  | AKE_Mg | AKE_Mn |
|                    |                      | g/cm <sup>3</sup> | Vol% | t/ha   | mm      | (DIN) | (DIN) | kg/ha   | kg/ha  | %    | kmol(c)/ha | kg/ha  | kg/ha   | kg/ha  | kg/ha  | kg/ha  | kg/ha  |
| 0-5                | Sats_00_05 (100*100) | 1.15              | 8.9  | 523.4  | 12.1    | 4.11  | 3.31  | 39847.9 | 1999.5 | 33.1 | 48.4       | 209.37 | 217.53  | 40.93  | 94.95  | 29.10  | 2.51   |
| 5-10               | Sats_05_10 (100*100) | 1.64              | 15.3 | 693.2  | 9.2     | 4.10  | 3.30  | 23305.3 | 1136.8 | 27.9 | 43.9       | 197.91 | 149.73  | 40.76  | 101.21 | 21.91  | 1.87   |
| -10-30             | Sats_10_30 (100*100) | 1.65              | 20.4 | 2628.4 | 33.1    | 4.63  | 3.81  | 44183.8 | 1997.6 | 54.9 | 102.9      | 323.56 | 832.16  | 46.00  | 213.95 | 103.03 | 33.64  |
| -30-60             | Sats_30_60 (100*100) | 1.05              | 30.7 | 2175.3 | 45.7    | 6.83  | 4.28  | 7649.9  | 717.9  | 51.4 | 64.4       |        |         |        |        |        |        |
| -60-90             | Sats_60_90 (100*100) | 1.27              | 9.8  | 3447.0 | 54.1    | 4.67  | 3.97  | 9720.5  | 930.7  | 77.4 | 261.6      | 492.92 | 2647.27 | 6.20   | 656.99 | 608.74 | 5.86   |

Abbildung 163: Automatisierte Umrechnung von Bodendaten auf beliebige Zieltiefensegmente

Andererseits müssen je nach Fragestellung unterschiedlich scharfe Berechnungs- und Bewertungskriterien zur Anwendung kommen, die ggf. als Verfahrensvarianten formalisiert und programmiert wurden und vom Benutzer optional gewählt werden können. So gibt es z. B. im Rahmen der Ableitung der Stoffvorräte über die analytisch bestimmten Stoffgehalte und die erforderlichen bodenphysikalischen Parameter die Möglichkeit, diese Berechnung auf eine konkrete Tiefenstufe eines Profils zu beziehen (also vorauszusetzen, dass alle Angaben einen identischen Bezug haben) oder ersatzweise auch die Einbeziehung eines weiteren Profilstadiums zuzulassen (Chemieprobe und Physikprobe entstammen nicht dem identischen Profil, aber derselben Tiefenstufe). Bezüglich der Laborergebnisse gibt es die Möglichkeit, Sonderwerte (unter der Bestimmungs- oder Nachweisgrenze) wahlweise durch Standards ersetzen zu lassen (z. B. „halbe Bestimmungsgrenze“), um Datenlücken zu vermeiden, oder explizit nach diesen Bedingungen zu suchen, in dem spezielle Markierungen ausgegeben werden.

Insgesamt wurden einige Standard-Auswertungsfunktionen definiert, die automatisiert beim Abfragen der Daten ausgeführt werden. Für die Bodendaten ist neben der Umrechnung der Analyseergebnisse in Gehalte oder Vorräte in Massen- oder

Äquivalent-Einheiten für frei vom Nutzer definierbare, beprobungsunabhängige Tiefenabschnitte (z. B. „Wurzelraum“) u. a. auch die Ableitung der nutzbaren Feldkapazität (nFK) implementiert. Die ertragskundlichen Daten der Einzelbäume werden zu baumarten- und bestandesbezogenen Kennzahlen verdichtet. In einigen Fällen erfolgt zusätzlich eine automatische graphische Visualisierung von Sachverhalten (z. B. Stammverteilungspläne, Grundflächenzuwachs auf der Basis von Jahrringanalysen, Triebblängen, Tiefenverlauf von Stoffgehalten).

Ein hervorzuhebender Konzept-Grundsatz im Kontext von Auswertungen ist, dass Verdichtungs- oder Verrechnungsergebnisse i. d. R. nicht in der Datenbank gespeichert werden, sondern stets zur Programmlaufzeit erneut aus den Ausgangsdaten erzeugt werden (z. B. AK-Summe, Basensättigung, Feinbodenmenge etc.). Dies hat den Vorteil, dass nach Datenkorrekturen oder -ergänzungen die Nachführung der abgeleiteten Informationen nicht gesondert beachtet werden muss und sich keine Inkonsistenzen zwischen Ausgangs- und Auswertungsdaten ergeben können, was sonst erfahrungsgemäß unvermeidbar ist. Die zentrale Vorhaltung der Verarbeitungsfunktionen und -formeln gewährleistet zusätzlich personenübergreifend absolute Einheitlichkeit der angewendeten Verfahren und, nach einer entsprechenden Testphase, auch Fehlerfreiheit.

## 12.4 Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die anspruchsvollen Ziele des BZE-Datenmanagements erreicht wurden. Die Arbeiten der puren Datenerfassung und die anschließenden Vollständigkeits- und Plausibilitätsprüfungen erforderten – vor dem Hintergrund der eingangs dargestellten Ansprüche – mit Abstand den größten Aufwand und wurden erheblich unterschätzt. Waren die Ausgangsdaten – meist in mehreren immer wieder zu korrigierenden Anläufen – aber erst einmal erfasst, stellte sich die Entwicklung der entsprechenden Programmoberflächen und Auswertungsroutinen vergleichsweise einfach und zügig umsetzbar dar.

Zu einer zukünftigen Minimierung des Aufwandes bei der Aufarbeitung, Verwaltung und Auswertung der Daten – einhergehend mit einer weiteren Steigerung der Datenqualität – würden beitragen:

- präzise Strukturierung der zu erhebenden Informationen in den Fachvorgaben unter Beteiligung von IT-Experten, darauf aufsetzend Entwurf praxis- und IT-gerechter Felderhebungsbelege
- möglichst weitgehende Eingrenzung und Definition zulässiger Methoden für Felderhebung, Probennahme und Analytik
- zeitlich vorgeschalteter „Testlauf“ an einem Teil-Kollektiv unter Realbedingungen, Analyse von Schwachpunkten und letzte Anpassungen
- Finalisierung der Fachvorgaben (als Grundlage der IT-Umsetzungen) vor Beginn der relevanten Durchführung

- 
- detaillierte Anweisungen an die Kartierer\*innen und Probenehmer\*innen, u. a.:
    - Aufklärung über die Relevanz lückenlos und eindeutig im Sinne der Fachvorgaben ausgefüllter Feldbelege
    - Aufklärung über die Bedeutung und Behandlung von Fehlwerten
    - intensive Kontrolle auf Einhaltung der Vorgaben noch während der Feldkampagnen  - klare Definition der Schnittstellen (inhaltlich und technisch) zwischen Drittlaboren und Inventurleitungen
  - Etablierung angemessener IT-Strukturen in datenproduzierenden Institutionen

Dies bedeutet, dass der projektvorbereitenden Phase insgesamt mehr Gewicht und Zeit eingeräumt werden sollte. Letztlich ist dadurch kein Mehraufwand, sondern eher eine Umschichtung von Ressourcen im Dienste der Qualitätssteigerung zu erwarten. Mittel- und langfristig würden auf diese Weise deutlich erweiterte und effizientere Auswertungsmöglichkeiten geschaffen.





## Literatur

- ABER, J. D.; NADELHOFFER, K. J.; STEUDLER, P.; MELILLO, J. M. (1989): Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *Bioscience*, 39, 6, 378–386
- Aber, J. D.; McDowell, W.; Nadelhoffer, K. J.; Magill, A.; Berntson, G.; Kamakea, M.; McNulty, S.; Currie, W.; Rustad, L.; Fernandez, I. (1998): Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: Hypotheses revisited. *BioScience* 48, 921–934
- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 5. Aufl., Hannover, 438 S.
- AG BODENKUNDE (1982): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 3. Aufl., Hannover, 331 S.
- AHREND, B., BÖTTCHER, J.; DUIJNISVELD, H.M. (2005): Auswirkungen des Waldumbaus von Kiefernreinbeständen auf die Stoffdeposition und die Grundwasserqualität in Nordwestdeutschland. *Freiburger Forstliche Forschung*, 62, 221–234
- AHREND, B. (2008): Dynamische Modellierung der langfristigen Auswirkungen des Waldumbaus von Kiefernreinbeständen auf die Kohlenstoffspeicherung im Auflagehumus saurer Waldböden in Nordwestdeutschland; *Der Andere Verlag: Tönning, Lübeck & Marburg*, Volume 21, p. 162
- AHREND, B., WAGNER, M.; KLINCK, U. (2018a): Herleitung flächiger Depositionsdaten. *Ber. Freibg. Forstl. Forsch.*, 101, 150–180
- AHREND, B.; VONDERACH, C.; WEIS, W.; WILPERT v., K. (2018b): Unsicherheitsanalysen zur Nährstoffbilanzierung auf Umweltmessnetzen. *Freiburger Forstliche Forschung* 101, 242–267
- AHREND, B.; SCHMITZ, A.; PRESCHER, A.-K.; WEHBERG, J.; GEUPEL, M.; ANDREAE, H.; MEESENBERG, H. (2020): Comparison of Methods for the Estimation of Total Inorganic Nitrogen Deposition to Forests in Germany. *Front. For. Glob. Change*, 3, (103): DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00103>
- AK STANDORTSKARTIERUNG (2003): *Forstliche Standortsaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Arbeitskreis Standortskartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung*. 6. Auflage. IHW-Verlag, Eching, 352 S.
- AK STANDORTSKARTIERUNG (2016): *Forstliche Standortsaufnahme*. 7. Auflage. IHW-Verlag, Eching bei München, 400 S.
- ALBRECHT, R. (2007): 1970 bis 1990 – Zwei Jahrzehnte Industriegeschichte und Luftverunreinigung in Mitteldeutschland am Beispiel des Standortes Bitterfeld Wolfen. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung* Bd 46, Heft 3, 13–24
- ALBRECHT, R. (2009): Einst streng geheim: Beobachtungen zur Luftverunreinigung in Wolfen und Umgebung in den Jahren zwischen 1970 und 1990-eine Dokumentation. In MÖHRING, C. (Hrsg) (2009): *Phönix auf Asche. Von Wäldern und Wandel in der Dübener Heide und Bitterfeld*. Kessel Verlag 30–41
- ANDREAE, H.; EICKENSCHIEDT, N.; EVERS, J.; GRÜNEBERG, E.; ZICHE, D.; AHREND, B.; HÖHLE, J.; NAGEL, H.-D.; WELLBROCK, N. (2016): Stickstoffstatus und dessen zeitliche Veränderungen in Waldböden. In: WELLBROCK, N.; BOLTE, A.; FLESSA, H. (Hrsg.) (2016): *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland*. Thünen Report, 43, Braunschweig, 135–180 mit Kartenband
- ANDREAE, H.; JACOB, F. (2018): Medizin für den Wald-(Boden), Forstliche Bodenschutzkalkungen, ein bundesweiter Überblick 2.0. Poster der Arbeitsgruppe “Operative Bodenschutzkalkung”, FoWiTa 2018 Göttingen
- ASCHE, N. (1997): Nährelementgehalt in Buchenblättern unter besonderer Berücksichtigung der zeitlichen Variation auf basenarmen Standorten in Nordrhein-Westfalen. *Forstw. Cbl.*, 116, 394–402
- AUGUSTIN, S.; STEPHANOWITZ, H.; WOLFF, B.; SCHRÖDER, J.; HOFFMANN, E. (2005): Manganese in tree rings of Norway spruce as an indicator for soil chemical changes in the past. *European Journal of Forest Research*, 124, 313–318

- BARTH, N.; BRANDTNER, W.; CORDSEN, E.; DANN, T.; EMMERICH, K.-H.; FELDDHAUS, D.; KLEEFISCH, B.; SCHILLING, B.; UTERMANN, J. (2000): Boden-Dauerbeobachtung, Einrichtung und Betrieb von Bodendauerbeobachtungsflächen. In: ROSENKRANZ, D.; BACHMANN, G.; KÖNIG, W.; EINSELE, G. (Hrsg.): Bodenschutz. Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Erich Schmidt Verlag, Berlin. Bd. 3, Kennziffer 9152, 127 S.
- BBODSCHG (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 3 Abs. 3 Verordnung vom 27. Sept. 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist.
- BEESE, F. (1992): Umweltbelastungen und Standort. In: Boden, Wasser und Luft, Umweltvorsorge in der AGF (Hrsg.). Proc. vom 26.11.1992, Bonn, 36–39
- BEESE, F.; MEIWES, K. J. (1995): 10 Jahre Waldkalkung, Stand und Perspektiven. AFZ 17, 946–949
- BENDIX, B. (2007): Waldentwicklung und Forstwirtschaft in der Dübener Heide. Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung Bd 46, Heft 3, 31–45
- BENDIX, B. (2009): Dünger aus der Luft. In MÖHRING, C. (Hrsg) (2009): Phönix auf Asche. Von Wäldern und Wandel in der Dübener Heide und Bitterfeld. Kessel Verlag 42–50
- BEISECKER, R.; BITTERSÖHL, J.; BLANKENBURG, J.; EVERS, J.; IHLING, H.; MAUDEN, R.; MEESENBERG, H.; MEISSNER, R.; RUPP, H.; SCHRAUTZER, J.; WALTHER, W.; BARION, D. (2020): Diffuse Stoffausträge in Gewässer aus Wald und naturnahen Nutzungen. DWA-Themen T1/2020, Hennef. 127 S.
- BERG, B.; MCCLAUGHERTY, C.; SANTO, A.V.D.; JOHANSSON, M.-B.; EKBOHM, G. (1995): Decomposition of litter and soil organic matter – Can we distinguish a mechanism for soil organic matter buildup? Scand. J. For. Res. 1995, 10, 108–119, DOI: <https://doi.org/10.1080/02827589509382874>
- BERNHARDT, M. (2005): Reaktionen der Waldbodenvegetation auf erhöhte Stickstoffeinträge: Analyse und Vorhersage von Vegetationsveränderungen anhand von funktionellen Merkmalen. Dissertationes Botanicae, 397, 1–121
- BERNHARDT, E. S.; LIKENS, G. E.; HALL JR, R. O.; BUSCO, D. C.; STUART, S. G.; BURTON, T. M.; MEYER, J. L.; McDOWELL, W. H.; MAYER, M. S.; BOWDEN, W. B.; FINDLAY, S. E. G.; MACNEALE, K. H.; STELZER, R. S.; H. LOWE, W. H. (2005): Can't see the forest for the stream? In-stream processing and terrestrial nitrogen exports. BioScience, Vol. 5, I. 3, 219–230, DOI: [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0219:ACSTFF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0219:ACSTFF]2.0.CO;2)
- BGR (2007): Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (BÜK 1000 N2.3). – Auszugskarten Acker, Grünland, Wald; Digit. Archiv FISBo Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR; Hannover und Berlin. <https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Aktuelles/Archiv/Datenbank-BUEK1000N.html>
- BIMSCHV (2013): Verordnung über Großfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 1021, 1023, 3754), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 19. Dezember 2017 (BGBl. I S. 4007) geändert worden ist
- BLOCK, J. (2006): Stickstoffbelastung der rheinland-pfälzischen Wälder. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Nr. 60/06, 1–31.
- BLOCK, J.; GAUER, J. (2012): Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz: Ergebnisse der zweiten landesweiten Bodenzustandserhebung BZE II. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, 70, 228 S.
- BLOCK, J. u. MEIWES, K.J. (2013): Erhaltung der Produktivität der Waldböden bei der Holz- und Biomassenutzung. BoS Erg.-Lfg. 1/13 - VII/13, 1–50
- BLOCK, J.; MEIWES, K. J. (2013): Erhaltung der Produktivität der Waldböden bei der Holz- und Biomassenutzung. In: BACHMANN, G.; KÖNIG, W.; UTERMANN, J.: Bodenschutz – Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. 4200, 1. Lfg./13, 1–50

- BLOCK, J.; EICHHORN, J.; GEHRMANN, J.; KÖLLING, C.; MATZNER, E.; MEIWES, K. J.; VON WILPERT, K.; WOLFF, B. (2000): Kennwerte zur Charakterisierung des ökochemischen Bodenzustandes und des Gefährdungspotentials durch Bodenversauerung und Stickstoffsättigung an Level II-Wald-ökosystem-Dauerbeobachtungsflächen. Arbeitskreis C der Bund-Ländergruppe Level II. BML (Hrsg.), Bonn, 167 S.
- BLOCK, J.; SCHUCK, J.; SEIFERT, T. (2007): Einfluss der waldbaulichen Behandlung und der Holznutzung auf den Nährstoffhaushalt von Traubeneichenbeständen. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, 63, 117–150
- BLUM, U.; HEINBACH, R. (2010): Gesamtauswertung der Datengrundlage sämtlicher BZE Ringversuche 2005 bis 2009. Gegenüberstellung der Ergebnisse von statistisch berechneten und fest definierten Toleranzbereichen (Methode der BZE sowie der EU-Auswertung). Durchgeführt im Auftrage des Gutachterausschusses „Forstliche Analytik“ am Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz durch die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
- BLUME, H.-P.; BRÜMMER, G. W.; HORN, R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R.; STAHR, K.; WILKE, B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York. 570 S.
- BMEL (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT) (2016): Forstliches Umweltmonitoring in Deutschland. Durchführungskonzept Forstliches Umweltmonitoring. 40 S.
- BML (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN) (1990): Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE). Arbeitsanleitung. Bonn
- BÖTTCHER, J.; SPRINGOB, G. (2001): A carbon balance model for organic layers of acid forest soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 164, 399–405
- BORKEN, W.; MATZNER, E. (2004): Nitrate leaching in forest soils: an analysis of long-term monitoring sites in Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 167, Issue 3, 277–283
- BORMANN, B. T., SPALTENSTEIN, H.; MCCLELLAN, M.H.; UGOLINI, F.C.; CROMACK, K.; NAY, JR. U. S.M. (1995): Rapid soil development after windthrow disturbance in pristine forests. *Journal of Ecology*, 83, 747–757
- BRAUN, S.; FLÜCKIGER, W. (2009): Wie geht es unserem Wald? 25 Jahre Walddauerbeobachtung. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch. Bericht 3, 86 S.
- BRAUN, S.; THOMAS, V. F. D.; QUIRING, R.; FLÜCKIGER, W. (2010): Does nitrogen deposition increase forest production? The role of phosphorus. *Environmental Pollution*, 158, 2043–2052, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.11.030>
- BRINKMANN, S.; NIEDER, R. (2002): Critical Loads für eutrophierenden Stickstoff – Weiterentwicklung des Ansatzes unter besonderer Berücksichtigung der Umsetzung im Boden (Humusschicht). Inst. f. Geoökologie, Techn. Univ Braunschweig. Braunschweig. 116 S.
- BRUMME, R.; AHRENDTS, B.; BLOCK, J.; SCHULZ, C.; MEESENBURG, H.; KLINCK, U.; WAGNER, M.; KHANNA, P.K. (2021): Cycling and retention of nitrogen in European beech (*Fagus sylvatica* L.) ecosystems under elevated fructification frequency. *Biogeosciences*, 18, 3763–3779, doi:10.5194/bg-18-3763-2021
- BURSE, K.; SCHLUTOW, A.; STUBENRAUCH, F.; SCHEUSCHNER, T.; NAGEL, H.-D.; WEIGELT-KIRCHNER, R. (2011): Waldbodenbericht für Thüringen. Mitteilungen der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei 31, 268 S.
- BWALDG (1975): Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz) vom 2. Mai 1975 (BGBl. I S. 1037), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Januar 2017 (BGBl. I S. 75) geändert worden ist
- CEULEMANS, R.; JANSSENS, I. A.; JACH, M. E. (1999): Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on trees and forests: Lessons to be learned in view of future ecosystem studies. *Annals of Botany*, 84, 577–590
- COE, H. (2020): Luftverschmutzung: Wie Stadtgase zu Feinstaub kondensieren. *Spektrum der Wissenschaft* 10.20, 26–28

- COLE, D. W. (1992): Nitrogen Chemistry, Deposition, and Cycling in Forests. In: JOHNSON, D. W.; LINDBERG, S. E. (Hrsg.): Atmospheric Deposition and Forest Nutrient Cycling. Ecological Studies Vol. 91. Berlin, Springer-Verlag, 150–152
- COOLS, N.; VERSTRAETEN, A.; WEIS, W.; CARNICELLI, S.; CECCHINI, G.; CLARKE, N.; PANNATIER, E. G.; JOHNSON, J.; JONARD, M.; MEESENBURG, H.; NIEMINEN, T. M.; KARLSON, G. P.; VANGUELOVA, E.; SINTERMANN, J.; VESTERDAL, L.; HANSEN, K. (2016): Forest Soil Acidification in Europe today. In SEIDLING, W. (Hrsg.): Forests Conditions. ICP Forests 2016 Executive report, Eberswalde, 19 S., 6–10, (Zugriff am 15.05. 2018)
- DAMMANN, I.; PAAR, U.; EICHHORN, J. (2007): Waldzustandsbericht 2007 für Niedersachsen. In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.), 32 S.
- DAMMANN, I.; SCHÖNFELDER, E.; TALKNER, U.; EVERS, J.; PAAR, U. (2016): Waldernährung. In: PAAR, U.; EVERS, J.; DAMMANN, I.; KÖNIG, N.; SCHULZE, A.; SCHMIDT, M.; SCHÖNFELDER, E.; SCHELER, B.; ULLRICH, T.; EICHHORN, J. (2016): Waldbodenzustandsbericht für Hessen. Ergebnisse der Zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Beiträge aus der NW-FVA, Bd 15, 217–266
- DAMMANN, I.; SCHÖNFELDER, E.; TALKNER, U.; EVERS, J.; PAAR, U. (2019): Waldernährung. 261–338. In: EVERS, J.; DAMMANN, I.; KÖNIG, N.; PAAR, U.; STÜBER, V.; SCHULZE, A.; SCHMIDT, M.; SCHÖNFELDER, E.; EICHHORN, J. (2019): Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen. Ergebnisse der Zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 19, 498 S.
- DE VRIES, W.; REINDS, G. J.; GUNDERSEN, P.; STERBA, H. (2006): The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration in European forests and forest soils. Glob. Chang. Biol. 12, 1151–1173, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01151.x>
- DE VRIES, S.; SUHARTI, S.; POUVREAU, L. A. M. (2007). Nitric oxide reductase: structural variations and catalytic mechanism. Biology of the Nitrogen Cycle, 57–66
- DE VRIES, W.; DOBBERTIN, M. H.; SOLBERG, S.; VAN DOBBEN, H. F.; SCHAUB, M. (2014): Impacts of acid deposition, ozone exposure and weather conditions on forest ecosystem in Europe: an overview. Plant and Soil. 380, 1–45, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2056-2>
- DE VRIES, W.; POSCH, M.; SVERDRUP, H.; LARSEN, T.; DE WIT, H. A.; BOBBINK, R.; HETTELINGH, J.-P. (2015): Geochemical Indicators for Use in the Computation of Critical Loads and Dynamic Risk Assessments. In: DE VRIES, W.; HETTELINGH, J.-P.; POSCH, M.: Critical and Dynamic Risk Assessments. Nitrogen, Acidity and Metals in Terrestrial and Aquatic Ecosystems. Environmental Pollution, Springer. Dordrecht, Heidelberg, New York, London. 15–58
- DE WITTE, L. C.; ROSENSTOCK, N. P.; VAN DER LINDE, S.; BRAUN, S. (2017): Nitrogen deposition changes ectomycorrhizal communities in Swiss beech forests. Science of the Total Environment 605–606, 1083–1096
- DISE, N. B.; MATZNER, E.; FORSIUS, M. (1998 a): Evaluation of organic horizon C:N ratio as an indicator of nitrate leaching in conifer forests across Europe. Environ Pollut 1998, S1: 453–6
- DISE, N.; MATZNER, E.; GUNDERSEN, P. (1998 b): Synthesis of nitrogen pools and fluxes from European forest ecosystems. Water, Air and Soil Pollution, 105, 143–154
- DOBLER, L. (1999): Der Einfluss der Bergbaugeschichte im Ostharz auf die Schwermetall-tiefengradienten in historischen Sedimenten und die fluviale Schwermetalldispersion in den Einzugsgebieten von Bode und Selke im Harz. – Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale)
- DUQUESNAY, A.; DUPOUEY, J. L.; CLEMENT, A.; ULRICH, E.; LE TACON, F. (2000): Spatial and temporal variability of foliar mineral concentration in beech (*Fagus sylvatica*) stands in northeastern France. Tree Physiology, 20, 13–22
- EICHHORN, J. (1995): Stickstoffsättigung und ihre Auswirkung auf das Buchenwaldökosystem der Fallstudie Zierenberg. Habilitationsschrift, Forstwissenschaftliche Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen. 174 S.
- ELLENBERG, H. (1977): Stickstoff als Standortfaktor, insbesondere für mitteleuropäische Pflanzengesellschaften. Oecol. Plant., 12 (1), 1–21, 82–92

- ELLENBERG, H.; WEBER, H. E.; DÜLL, R.; WIRTH, V.; WERNER, W.; PAULISSEN, D. (2001): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. 3. Aufl., Scripta Geobot., 18, 1–262
- ENDERS, K. (2007): Die Entwicklung der Verunreinigungen der Luft im Raum Bitterfeld/Wolfen. Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung Bd 46, Heft 3, 25–30
- ENGARDT, M.; SIMPSON, D.; SCHWIKOWSKI, M.; GRANAT, L. (2017): Deposition of sulphur and nitrogen in Europe 1900–2050. Model calculations and comparison to historical observations. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 69, 1328945, DOI: <https://doi.org/10.1080/16000889.2017.1328945>
- ETZOLD, S.; FERRETTI, M.; REINDS, G. J.; SOLBERG, S.; GESSLER, A.; WALDNER, P.; SCHAUB, M.; SIMOSOND, D.; BENHAM, S.; HANSEN, K.; INGERSLEV, M.; JONARD, M.; KARLSSON, P. E.; LINDROOS, A.-J.; MARCHETTO, A.; MANNINGER, M.; MEESENBERG, H.; MERILÄ, P.; NÖJD, P.; RAUTIO, P.; SANDERS, T. G. M.; SEIDLING, W.; SKUDNIK, M.; THIMONIER, A.; VERSTRAETEN, A.; VESTERDAL, L.; VEJPUSTKOVA, M.; DE VRIES, W. (2020): Nitrogen deposition is the most important environmental driver of growth of pure, even-aged and managed European forests. Forest Ecology and Management, Vol. 458, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117762>
- EVERS, F. H. (1964): Die Bedeutung der Stickstoff-Form für Wachstum und Ernährung der Pflanzen, insbesondere der Waldbäume. Stuttgart: Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, 14, 19–37
- EVERS, F. H. (1972): Die jährweisen Fluktuationen der Nährelementkonzentrationen in Fichtennadeln und ihre Bedeutung für die Interpretation nadelanalytischer Befunde. AFJZ, 143, 68–74
- EVERS, F. H. (1986): Die Blatt- und Nadeldiagnose als Instrument der Bioindikation. AFZ, 1/2, 6–9
- EVERS, J.; PAAR, U. (2013): Bodenzustandserhebung (BZE II) und Standortskartierung. In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2013 für Hessen, 26–35
- EVERS, J.; KÖNIG, N.; WOLFF, B.; MEIWE, K. J. (2001): Vorbereitung der Zweiten Bodenzustandserhebung im Wald – Untersuchungen zur Laboranalytik, Stickstoffbestimmung und zeitlichen Variabilität bodenchemischer Parameter. BMVEL, Bonn, 243 S.
- EVERS, J.; DAMMANN, I.; NOLTENSMEIER, A.; NAGEL, R. V. (2008): Auswirkungen von Bodenschutzkalkungen auf Buchenwälder (*Fagus sylvatica* L.) In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der NW-FVA, Bd. 3, 21–50
- EVERS, J.; PAAR, U.; SCHMIDT, W. (2010): Ziele und erste Ergebnisse der BZE II. In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2010 für Niedersachsen, 24–27
- EVERS, J.; PAAR, U.; EICHHORN, J. (2013a): Bestätigt die BZE die Trophieeinschätzung der forstlichen Standortskartierung? AFZ-DerWald, 14, 11–15
- EVERS, J.; PAAR, U.; SCHMIDT, W.; EICHHORN, J. (2013b): Substratgruppen in der BZE als Brücke zur forstlichen Standortskartierung. Ergebnisse der BZE II für Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt. AFZ-DerWald, 14, 16–20
- EVERS, J.; SCHÖNFELDER, E.; STEINMANN, V.; JENSEN, T.; STÜBER, V.; JANSSEN, M. (2015): Bodenchemie und Durchwurzelung in tieferen Bodenschichten. In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2015 für Niedersachsen, 33–35
- EVERS, J.; DAMMANN, I.; KÖNIG, N.; PAAR, U.; STÜBER, V.; SCHULZE, A.; SCHMIDT, M.; SCHÖNFELDER, E.; EICHHORN, J. (2019): Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen. Ergebnisse der Zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 19, 498 S.
- FABIAN, P.; MENZEL, A. (1998): Wie sehen die Wälder von morgen aus – aus der Sicht eines Klimatologen. Forstw. Cbl., 117, 339–354
- FALK, W.; STETTER, U. (2010): Stickstoff – vom Mangel in den Überfluss. LWF aktuell 78, 18–20
- FALLER, N.; HERWIG, K.; KÜHN, H. (1970): Die Aufnahme von Schwefeldioxid ( $S^{35}O_2$ ) aus der Luft. I. Einfluss auf den pflanzlichen Ertrag. Plant and Soil, 33, 177–191

- FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS) (2006): Global Forest Resources Assessment. FAO Forestry Paper, 147, Rome, 320 S.
- FIEDLER, H. J.; RÖSLER, H. J. (1988): Spurenelemente in der Umwelt. 1. Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- FISCHER, S.; NICOLAI, B.; TOLKMITT, D. (HRSG.) (2020): Die Vogelwelt des Landes Sachsen-Anhalt. [www.vogelwelt-sachsen-anhalt.de](http://www.vogelwelt-sachsen-anhalt.de), Online Publikation, Stand 5.10.2020
- FLECK, S.; AHRENDTS, B.; SUTMÖLLER, J.; ALBERT, M.; EVERS, J.; MEESENBERG, H. (2017): Is Biomass Accumulation in Forests an Option to Prevent Climate Change Induced Increases in Nitrate Concentrations in the North German Lowland? *Forests*, 8, 1–28, DOI: <https://doi.org/10.3390/f8060219>
- FLECK, S.; EICKENSCHIEDT, N.; AHRENDTS, B.; EVERS, J.; GRÜNEBERG, E.; ZICHE, D.; HÖHLE, J.; SCHMITZ, A.; WEIS, W.; SCHMIDT-WALTER, P.; ET AL. (2019): Nitrogen Status and Dynamics in German Forest Soils; Springer Verlag Berlin; Volume 237, 123–166
- FLÜCKIGER, W.; BRAUN, S. (1999): Nitrogen and its effect on growth, nutrient status and parasite attacks in beech and Norway spruce. *Water, Air, and Soil Pollution*; 116, 99–110
- FLÜCKIGER, W.; BRAUN, S. (2003): Critical limits for nutrient concentrations and ratios for forest trees – a comment. Additional Documents-Working Group Presentations. 273–280
- FLÜCKIGER, W.; BRAUN, S.; MAINIERO, R.; SCHÜTZ, K.; THOMAS, V. (2011): Auswirkungen erhöhter Stickstoffbelastung auf die Stabilität des Waldes. Synthesebericht im Auftrag des BAFU. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch
- FÖRSTLICHE LANDESANSTALT SACHSEN-ANHALT (Hrsg.) (1998): Waldbodenbericht Sachsen-Anhalt. Gernrode-Haferfeld, 71 S.
- FORTMANN, H.; RADEMACHER, P.; GROH, H.; HÖPER, H. (2012): Stoffgehalte und -vorräte im Boden und deren Veränderungen. In: HÖPER, H.; MEESENBERG, H. (Hrsg.): Tagungsband 20 Jahre Dauerbeobachtung in Niedersachsen. *GeoBerichte*, 23, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 48–69
- FORUMV (2013): Verordnung über Erhebungen im Forstlichen Umweltmonitoring (ForUmV) vom 20. Dezember 2013 (BGBl. I S. 4384)
- FRITZ, H.; MAKESCHIN, F. (2007): Chemische Eigenschaften flugaschebeeinflusster Böden der Dübener Heide. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung* Bd 46, Heft 3, 105–120
- FÜRST, C.; PIETZSCH, K.; MAKESCHIN, F. (2009): ENFORCHANGE – Wälder von heute für die Umwelt von morgen. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, Heft 8, 5–7
- GÄRTNER, E. J.; URFER, W.; EICHHORN, J.; GRABOWSKI, H.; HUSS, H. (1990): Die Nadelverluste mittelalter Fichten (*Picea Abies* (L.) Karst.) in Hessen in Abhängigkeit von Nadelinhaltsstoffen, Bodenelementgehalten und Standortfaktoren. *Hess. Forstl. Versuchsanstalt*, Bd. 10, 192 S.
- GAFÄ (GUTACHTERAUSSCHUSS FÖRSTLICHE ANALYTIK, Hrsg.) (2005): Handbuch Forstliche Analytik – eine Loseblattsammlung der Analysemethoden im Forstbereich. Grundwerk. BMELV
- GAFÄ (GUTACHTERAUSSCHUSS FÖRSTLICHE ANALYTIK, Hrsg.) (2014): Handbuch Forstliche Analytik – eine Loseblattsammlung der Analysemethoden im Forstbereich. Grundwerk und 1. bis 5. Ergänzung. BMELV
- GAUGER, T.; ANSHELM, F.; SCHUSTER, H.; DRAAIJERS, G. P. J.; BLEEKER, A.; ERISMAN, J. W.; VERMEULEN, A. T.; NAGEL, H.-D. (2002): Kartierung ökosystembezogener Langzeittrends atmosphärischer Stoffeinträge und Luftschadstoffkonzentrationen in Deutschland und deren Vergleich mit Critical Loads und Critical Levels. Forschungsvorhaben im Auftrag des BMU/UBA, FE-Nr. 299 42 210. Institut für Navigation, Univ. Stuttgart; 207 S.
- GLATZEL, G. (1991): The impact of historic land use and modern forestry on nutrient relations of Central European forest ecosystems. *Fertilizer Research*, 27, 1–8
- GÖTTLEIN, A. (2015): Grenzwertbereiche für die ernährungsdiagnostische Einwertung der Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Eiche, Buche. *AFJZ*, 186, 110–116
- GREVE, M. (2014): Langfristige Auswirkungen der Waldkalkung auf Bodenzustand, Sickerwasser und Nadelspiegelwerte von drei Versuchsanlagen in Rheinland-Pfalz. *Forstarchiv*, 46, 35–46

- GREVE, M.; BLOCK, J.; SCHRÖCK, H. W.; SCHULTZE, J.; WERNER, W.; WIES, K. (2016): Nährstoffversorgung rheinland-pfälzischer Wälder. Mitteilung FAWF, Trippstadt, Nr. 76/16, 268 S.
- GRÜNEBERG, E.; RIEK, W.; SCHÖNING, J.; EVERS, J.; HARTMANN, P.; ZICHE, D. (2016): Kohlenstoffvorräte und deren zeitliche Veränderungen in Waldböden. In: WELLBROCK, N.; BOLTE, A.; FLESSA, H. (Hrsg.) (2016): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Thünen Report, 43, Braunschweig, 181–209
- GUCKLAND, A.; PAAR, U.; DAMMANN, I.; EVERS, J.; MEIWES, K. J.; MINDRUP, M. (2011): Einfluss der Kalkung auf die Bestandesernährung. AFZ-Der Wald, 6, 23–25
- GUNDERSEN, P.; CALLESEN, I.; DE VRIES, W. (1998a): Nitrate leaching in forest ecosystems is related to forest floor C/N ratios. *Environmental Pollution*, 102, 403–407
- GUNDERSEN, P.; EMMETT, B. A.; KJØNAAS, O. J.; KOOPMANS, C. J.; TIETEMA, A. (1998b): Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests. A synthesis of NITREX data. *Forest Ecology and Management*, 101, 37–55
- HAIDER, K. (1996): *Biochemie des Bodens*. Ferdinand Enke, Stuttgart, 174 S.
- HAMKENS, H.; SPELLMANN, H.; NAGEL, R.-V.; BURESCH, M. (2020): Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl im Land Sachsen-Anhalt. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie Sachsen-Anhalt (Hrsg.), 69 S.
- HARTMANN, G.; NIENHAUS, F.; BUTIN, H. (2007): *Farbatlas Waldschäden – Diagnose von Baumkrankheiten*. Ulmer Verlag Stuttgart, 269 S.
- HARTMANN, P.; BUBERL, H.; PUHLMANN, H.; SCHÄFFER, J.; TREFZ-MALCHER, G.; ZIRLEWAGEN, D.; VON WILPERT, K. (2016): *Waldböden Südwestdeutschlands. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald von 1989–1992 und 2006–2008*. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Verlag Kessel, Remagen-Oberwinter, 328 S.
- HARTMANN, P.; VON WILPERT, K. (2016): Statistisch definierte Vertikalgradienten der Basensättigung sind geeignete Indikatoren für den Status und die Veränderungen der Bodenversauerung in Waldböden. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 187, 61–69
- HAYNES, R. J. (1982): Effects of liming on phosphate availability in acid soils – A critical review. *Plant and Soil*, 68, 289–308
- HEGG, C.; JEISY, M.; WALDNER, P. (2004): *Wald und Trinkwasser. Eine Literaturstudie*. Brimendorf. 60 S.
- HEINSDORF, D.; KRAUB, H.-H.; TÖLLE, H. (1986): Entwicklung der C- und N-Vorräte nach Kahlschlag auf ärmeren anhydromorphen Sandböden unter Kiefer. *Beiträge für die Forstwirtschaft*, 20, (1): 8–13
- HEINSDORF, D.; BRANSE, C. (2002): Entwicklung der Nährelementgehalte in den Nadeln von Kiefernbeständen auf charakteristischen pleistozänen Standorten Brandenburgs in den Jahren 1964–1999. *Forst und Holz*, 57, 421–428
- HEINZE, M.; FIEDLER, H. J. (1992): Ernährung der Gehölze. 43–115. In: LYR, H.; FIEDLER, H. J.; TRANQUILLINI, W. (Hrsg.): *Physiologie und Ökologie der Gehölze*. Verlag Gustav Fischer. 620 S.
- HEITKAMP, F.; AHRENDTS, B.; EVERS, J.; STEINICKE, C.; MEESENBURG, H. (2020): Inference of forest soil nutrient regimes by integrating soil chemistry with fuzzy-logic: regionwide application for stakeholders of Hesse, Germany. *Geoderma Regional*, 23, e00340, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00340>
- HELBIG, H.; AHRENDTS, B.; KAINZ, W. (2020): Flächenbilanzierung anthropogen überprägter Böden in Sachsen-Anhalt. *Planung/Bodenschutz* 1 20, 4–14
- HIEDERER, R.; DURRANT-HOUTEN, T.; MICHELI, E. (2011): Evaluation of BioSoil demonstration project – Soil Data Analysis. JRC63301, Publications Office of the European Union, Ispra. 155 S.
- HMLWLFN (HESSISCHES MINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG, WOHNEN, LANDWIRTSCHAFT, FORSTEN UND NATURSCHUTZ, Hrsg.) (1994): *Naturgemäßer Waldbau. Wald in Hessen*. 40 S.
- HÖPER, H.; MEESENBURG, H. (Hrsg.) (2012): *Tagungsband 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen*. *GeoBerichte*, 23, 256 S.
- HOFMANN, G.; HEINSDORF, D. (1990): Depositionsgeschehen und Waldbewirtschaftung – Quantifizierung und Abgrenzung des Depositionsgeschehens in den Wäldern als Grundlage für eine ökologisch orientierte Waldbewirtschaftung. *Der Wald Berlin*, 40, 208–213

- HOFMEISTER, H. (2004): Lebensraum Wald. Nachdruck der 4. Aufl., Verlag Dr. Kessel, 285 S.
- HOLZ, U. (2007): Das Industriegebiet Bitterfeld-Wolfen – Eine Einführung in die Industriegeschichte der Region. Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung, Bd 46, Heft 3, 5–11
- HOPPE, J.; SCHULZE, A. (1997): ECO. Datenbank zur Stoffbilanzierung in Waldökosystemen. Teil 1: Datenbankstruktur und Virtuelle Tabellen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Bd. 54, 124 S.
- HORNBECK, J.W.; MARTIN, C.W.; PIERCE, R.S.; BORMANN, F.H.; LIKENS, G.E.; EATON, J.S. (1987): The northern hardwood Forest ecosystem: Ten years of recovery from clearcutting NE-RP-596. Broomall, PA: U.S., Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, 30 S.
- HUBER, C.; WEISS, W.; GÖTTLEIN, A. (2006): Tree nutrition of Norway spruce as modified by liming and experimental acidification at the Höglwald site, Germany, from 1982 to 2004. *Annals of Forest Science*, 63, 861–869
- HÜBSCH, H., NEHRING, K. (1960): Vergleichende Untersuchungen über die Bestimmung des Stickstoffgehaltes nach den Methoden von Kjeldahl und Dumas. *Z. Anal. Chem.* 173, 278–284 <https://doi.org/10.1007/BF00447592>
- HÜTTL, R. F. (1992): Die Blattanalyse als Diagnose- und Monitoringinstrument in Waldökosystemen. In: Festkolloquium anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Dr. H. Zöttl am 24.04.1992. Freiburger bodenkundliche Abhandlungen, Bd. 30, 31–59
- ICP FORESTS (1998): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Part IV: Sampling and analysis of needles and leaves. Bundesforschungsanstalt f. Forst- u. Holzwirtschaft, Hamburg
- ICP FORESTS (2010): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests). Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). UNECE, Hamburg, 578 S.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: EDENHOFER, O.; PICHs-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; FARAHANI, E.; KADNER, S.; SEYBOTH, K.; ADLER, A.; BAUM, I.; BRUNNER, S.; EICKEMEIER, P.; KRIEMANN, B.; SAVOLAINEN, J.; SCHLÖMER, S.; STECHOW, C. V.; ZWICKEL, T.; MINX, J. C. (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- JACOB, F.; ANDREAE, H. (2018): Sächsischer Waldbodenbericht. Aktueller Waldbodenzustand und dessen Veränderung. Staatsbetrieb Sachsenforst, Kompetenzzentrum für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.), Schriftenreihe Heft 30, 160 S.
- JOHNSON, J.; GRAF-PANNATIER, E.; CARNICELLI, S.; CECCHINI, G.; CLARKE, N.; COOLS, N.; HANSEN, K.; MEESBURG, H.; NIEMINEN, T. M.; PIHL-KARLSSON, G.; TITEUX, H.; VANGUELOVA, E.; VERSTRAETEN, A.; VESTERDAHL, L.; WALDNER, P.; JONARD, M. (2018): The response of soil solution chemistry in European forests to decreasing acid deposition. *Global Change Biology* 24, 3603–3619, DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14156>
- JONARD, M.; ANDRÉ, F.; GIOT, P.; WEISSEN, F.; VAN DER PERRE, R.; PONENTE, Q. (2010): Thirteen-year monitoring of liming and PK fertilization effects on tree vitality in Norway spruce and European beech stands. *European Journal of Forest Research*, 129, 1203–1211 (DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0410-3>)



- JONARD, M.; FÜRST, A.; VERSTRAETEN, A.; THIMONIER, A.; TIMMERMANN, V.; POTOČIĆ, N.; WALDNER, P.; BENHAM, S.; HANSEN, K.; MERILÄ, P.; PONETTE, Q.; DE LA CRUZ, A.; ROSKAMS, P.; NICOLAS, M.; CROISÉ, L.; INGERSLEV, M.; MATTEUCCI, G.; DECINTI, B.; BASCIETTO, M.; RAUTIO, P. (2014): Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. *Global Change Biology*, 1–13, DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12657>
- JONARD, M.; FÜRST, A.; VERSTRAETEN, A.; THIMONIER, A.; TIMMERMANN, V.; POTOČIĆ, N.; WALDNER, P.; BENHAM, S.; HANSEN, K.; MERILÄ, P.; PONETTE, Q.; DE LA CRUZ, A.; ROSKAMS, P.; NICOLAS, M.; CROISÉ, L.; INGERSLEV, M.; MATTEUCCI, G.; DECINTI, B.; BASCIETTO, M.; RAUTIO, P. (2015): Tree mineral nutrition is deteriorating in Europe. *Global Change Biology*, 1–13, DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12657>
- KAHLE, H. P. (2012): Signifikanz dynamischer Interaktionen zwischen dem jährlichen Radial- und Höhenzuwachs und jährlichen Nadelspiegelwerten von Kiefern unter dem Einfluss von Klima und Witterung. *Beiträge zur Jahrestagung 2012. DVFFA-Sektion Ertragskunde*, 53–62
- KAINZ, W. (2007): Geologie und Bodenentwicklung in der Dübener Heide. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung* Bd 46, Heft 3, 47–64
- KHANNA, P. K.; PRENZEL, J.; MEIWES, K. J.; ULRICH, B.; MATZNER, E. (1987): Dynamics of sulfate retention by acid forest soils in an acidic deposition environment. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 51, 446–452
- KHANNA, P. K.; FORTMANN, H.; MEESENBURG, H.; EICHHORN, J.; MEIWES, K. J. (2009): Biomass and Element Content of Foliage and Aboveground Litterfall on the Three Long-Term Experimental Beech Sites: Dynamics and Significance. In: BRUMME, R.; KHANNA, P. K. (Hrsg.): *Functioning and Management of European Beech Ecosystems. Ecological. Studies*, 208, 183–205, DOI: [https://doi.org/10.1007/b82392\\_12](https://doi.org/10.1007/b82392_12)
- KIMMINS, J. P. (1987): *Forest ecology*. New York: Macmillan, 531 S.
- KNABE, W. (1984): Merkblatt zur Entnahme von Blatt- und Nadelproben für chemische Analysen. *AFZ*, 39, 847–848
- KÖLLING, C. (1991): Stickstoffsättigung von Waldökosystemen. *AFZ*, 10, 513–517
- KÖLLING, C. (2005): *Gesunder Boden – gesunder Wald*. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.)
- KÖLLING, C. (2010): Macht sauer wirklich lustig? *LWF aktuell*, 78, 21–24
- KÖLLING, C.; FALK, W. (2010): Heute reichlich, morgen knapp: Wasser im Wald. *LWF aktuell*, 78, 15–17
- KÖLLING, C.; KÖNIG, N.; EVERS, J. (2010a): Trockenrohdichte und Feinbodenvorrat als Eingangsparameter zur C-Vorratsberechnung – Grenzlinienartefakt und Soufflé-Effekt. Vortrag. In: BMELV 2010: Ergebnisniederschrift über die BZE-Sitzung am 14./15.04.2010 in Braunschweig, Anlage 4
- KÖLLING, C.; BLUM, U.; DIETZ, E.; FALK, W.; SCHUBERT, A.; STETTER, U. (2010b): Daten für den Bodenschutz. *LWF aktuell*, 78, 4–6
- KÖNIG, N.; FORTMANN, H. (1996): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden des Umweltanalytik-Labor der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt und des Zentrallabors II des Forschungszentrums Waldökosysteme. Teile 1 bis 3. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen, Reihe B, Bd. 46–49*
- KÖNIG, N.; FORTMANN, H. (1999): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden des Umweltanalytik-Labors der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, 1. Ergänzung: 1996–1998, Teile 1 bis 3. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen, Reihe B, Bd. 58 bis 60*
- KÖNIG, N.; FORTMANN, H. (2012): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden des Umweltanalytik-Labors der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. 3. Ergänzung: 1999–2011. – Teile 1 und 2. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Bd. 79 und 80*
- KÖNIG, N.; WOLFF, B. (1993): Abschlußbericht über die Ergebnisse und Konsequenzen der im Rahmen der BZE durchgeführten Ringanalysen. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Bd. 33*

- KÖNIG, N.; FORTMANN, H.; LÜTER, K.-L. (2009): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden des Umweltanalytik-Labors der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. 2. Ergänzung: 1999–2008. Teile 1 bis 4. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Bd. 75–78
- KÖNIG, N., SCHÖNFELDER, E.; BLUM, U. (2014): Auswertung der Standardmessungen und der Ringversuche im Rahmen der BZE II. BMELV (Hrsg.)
- KOPP, D. (1965): Die periglaziäre Deckzone (Geschiebedecksand) im nordostdeutschen Tiefland und ihre bodenkundliche Bedeutung. – Berichte der Geologischen Gesellschaft in der DDR 10 (6): 739–771
- KOPP, D. (1970): Periglaziäre Umlagerungs- (Perstriktions-)zonen im norddeutschen Tiefland und ihre bodengenetische Bedeutung. Tag. Ber. Dt. Akad. Landwirtschaft 102, 55–81
- KRAVCHENKO, A. N.; ROBERTSON, G. P. (2011): Whole-profile soil carbon stocks: the danger of assuming too much from analyses of too little. SSSAJ, 75, 1, 235–240
- KREUTZER, K. (1972): Über den Einfluss der Streunutzung auf den Stickstoff-Haushalt von Kiefernbeständen. Forstw. Cbl., 91, 263–270
- KREUTZER, K. (1993): Changes in the Role of Nitrogen in Central European Forests. In: HÜTTL, R. F.; MÜLLER-DOMBOIS, G. (Hrsg.): Forest decline in the Atlantic and Pacific Region. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 82–96
- KRÜGER, J.; HERSCHBACH, C.; NIEDERBERGER, J.; LANG, F. (2020): Wie Buchenwälder auch mit wenig Phosphor auskommen. AFZ-DerWald, 3, 16–19
- KRZAK, J. (1981): A model of forest nitrogen cycling to assess the effects of management intensity on longterm productivity in Douglas fir forests of the Pacific Northwest. Ph. D. Thesis, Oregon State University, Corvallis, OR, 232 S.
- KULHAVÝ, J.; MARKOVÁ, I.; DRÁPELOVÁ, I.; TRUPAROVÁ, S. (2009): The effect of liming on the mineral nutrition of the mountain Norway spruce (*Picea abies* L.). Journal of Forest Science, 55, 1–8
- LAU (2019): Immissionsschutzbericht Luftqualität 2018 Sachsen-Anhalt. Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Fachbereich Immissionsschutz, Klima, Erneuerbare Energien, Nachhaltigkeit, Halle. 153 S.
- LAUBHANN, D.; STERBA, H.; REINDS, G. J.; DE VRIES, W. (2009): The impact of atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: An individual tree growth model. Forest Ecology and Management, 258, 1751–1761 (DOI: 10.1016/j.foreco.2008.09.050)
- LEYER, I.; WESCHE, K. (2007): Multivariate Statistik in der Ökologie. – Berlin, Heidelberg, New York. 221 S.
- LUYSSAERT, S.; CIAIS, P.; PIAO, S.; SCHULZE, E.-D.; JUNG, M.; ZAEHLE, S.; SCHELHAAS, M. J.; REICHSTEIN, M.; CHURKINA, G.; PAPALE, D.; ABRIL, G.; BEER, C.; GRACE, J.; LOUSTAU, D.; MATTEUCCI, G.; MAGNANI, F.; NABUURS, G. J.; VERBEECK, H.; SULKAVA, M.; VAN DER WERF, G. R.; JANSSENS, I. A. and members of the CARBOEUROPE-IP SYNTHESIS TEAM (2010): The European carbon balance. Part 3: forests. Global Change Biology, 16, 1429–1450, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02056.x>
- MARSCHNER, H. (1986): The mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London (u. a.), 674 S.
- MARSCHNER, H. (1995): Mineral Nutrition of Higher Plants. 2<sup>nd</sup> edn. Academic Press, London (u. a.), 889 S.
- MATZNER, E. (1988): Der Stoffumsatz zweier Waldökosysteme im Solling. Göttingen: Bericht des Forschungszentrums Waldökosysteme der Georg-August-Universität. Vol. A, 40, 217 S.
- MEESBURG, H.; KLINCK, U.; SCHELER, B.; AHRENDTS, B. (2015): Schutz vor luftgetragenen Bodenbelastungen. In: FRÜND, H.-C.; BEUKER, R. H. (Hrsg), Fakultät Agrarwissenschaften Landschaftsarchitektur Osnabrück: Bodenschutz im Wald, Beiträge Forum Boden-Gewässer-Altlasten. Heft 15, 21–35

- MEESENBURG, H.; AHREND, B.; FLECK, S.; WAGNER M.; FORTMANN, H.; SCHELER, B.; KLINCK, U.; DAMMANN, I.; EICHHORN, J.; MINDRUP, M.; MEIWES, K.J. (2016): Long-term changes of ecosystem services at Solling, Germany: Recovery from acidification, but increasing nitrogen saturation? *Ecological Indicators*, 65, 103–112
- MEESENBURG, H.; RIEK, W.; AHREND, B.; EICKENSCHIEDT, N.; GRÜNEBERG, E.; EVERS, J.; FORTMANN, H.; KÖNG, N.; LAUER, A.; MEIWES, K.J.; ET AL. (2019): Soil Acidification in German Forest Soils. In *Status and Dynamics of Forests in Germany*, Wellbrock, N., Bolte, A., Eds.; Springer Nature Switzerland AG; Volume 237, pp. 93–120.
- MEINING, S.; VON WILPERT, K.; SCHÄFFER, J.; HARTMANN, P.; SCHUMACHER, J.; DELB, H.; JOHN, R.; HUG, R.; HÖLSCHER, A.; AUGUSTIN, N. (2013): *Waldzustandsbericht 2013*. Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.), 63 S.
- MEIWES, K. J. (1995): Application of lime and wood ash to decrease acidification of forest soils. *Water, Air and Soil Pollution* 85, 143–152
- MEIWES, K. J.; KÖNIG, N.; KHANNA, P. K.; PRENZEL, J.; ULRICH, B. (1984): Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben*, Göttingen, Bd. 7
- MELLERT, K. H.; GÖTTLEIN, A. (2012): Comparison of new foliar nutrient thresholds derived from van den Burg's literature compilation with established central European references. *European Journal of Forest Research*, 131, 1461–1472, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0615-8>
- MELLERT, K. H.; KÖLLING, C. (2006): Stickstoffsättigung – ein wachsendes Problem ohne Lösung? *Forst und Holz*, 61, 95–98
- MELLERT, K. H.; PRIETZEL, J.; STRAUSSBERGER, R.; REHFUSS, K. E. (2004): Long-term nutritional trends of conifer stands in Europe: results from the RECOGNITION project. *European Journal of Forest Research*, 123, 305–319, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-004-0044-4>
- MEYER, F. H. (1984): Mykologische Beobachtungen zum Baumsterben. *AFZ*, 39, 212–228
- MEYER, F. H. (1985): Einfluss des Stickstoff-Faktors auf den Mykorrhizabesatz von Fichtensämlingen im Humus einer Waldschadensfläche. *AFZ*, 40, 208–219
- MILNIK, A. (2013): In Verantwortung für den Wald. Die Geschichte der Forstwirtschaft in der Sowjetischen Besatzungszone und in der Deutschen Demokratischen Republik. Verlag Kessel 650 S.
- ML (NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ) (2013): Langfristige, ökologische Waldentwicklung in den Niedersächsischen Landesforsten (LÖWE-Erlass). Nds. MBL. Nr. 9, S. 214, 13 S.
- MLU (MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT UND UMWELT DES LANDES SACHSEN-ANHALT) (2014): Leitlinie Wald 2014 zur Erhaltung und weiteren nachhaltigen Entwicklung des Waldes im Land Sachsen-Anhalt. 55 S.
- MOBLEY, M.L.; YANG, Y.; YANAI, R.D.; NELSON, K.A.; BACON, A.R.; HEINE, P.R.; RICHTER, D.D. (2019): How to Estimate Statistically Detectable Trends in a Time Series: A Study of Soil Carbon and Nutrient Concentrations at the Calhoun LTSE. *Soil Science Society of America Journal* 83, S133–S140, DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.09.0335>
- MOHREN, G. M. J.; VAN DEN BURG, J.; BURGER, W. (1986): Phosphorus deficiency induced by nitrogen input in Douglas fir in the Netherlands. *Plant and Soil*, 95, 191–200
- NÄTSCHER, L.; SCHWERTMANN, U. (1991): Proton buffering in organic horizons of acid forest soils. *Geoderma*, 48, Iss. 1–2, 93–106
- NAVE, L.E.; VANCE, E.D.; SWANSTON, C. W.; CURTIS, P.S. (2009): Impacts of elevated N inputs on north temperate forest soil C storage, C/N, and net N-mineralisation. *Geoderma* 153, 231–240
- NIEDER, R.; BRINKMANN, S. (2003): Humuskörper norddeutscher Kiefernforste: Senken- oder Quellensysteme für C und N? *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 102, 379–380
- NIHLGÅRD, B. (1985): The ammonium hypothesis – An additional explanation to the forest dieback in Europe. *AMBIO* 14, 2–8

- NILSSON, L. O.; WALLANDER, H. (2003): Production of external mycelium by ectomycorrhizal fungi in a Norway spruce forest was reduced in response to nitrogen fertilization. *New Phytologist*, 158, 409–416
- NLF (NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTEN, Hrsg.) (2016): 25 Jahre ökologische Waldentwicklung in den Niedersächsischen Landesforsten. Aus dem Wald – Schriftenreihe Waldentwicklung in Niedersachsen, Heft 60, 88 S.
- NLR (NIEDERSÄCHSISCHE LANDESREGIERUNG, Hrsg.) (1991): Niedersächsisches Programm zur langfristigen ökologischen Waldentwicklung in den Landesforsten., Hannover. 49 S.
- NW-FVA (NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT, Hrsg.) (2010): Merkblatt Bodenschutzkalkungen in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt. Göttingen, 27 S., [https://www.nw-fva.de/fileadmin/user\\_upload/Verwaltung/Publikationen/Merkblaetter/Merkblatt\\_Bodenschutzkalkungen\\_und\\_Anlagen\\_11\\_2010.pdf](https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Verwaltung/Publikationen/Merkblaetter/Merkblatt_Bodenschutzkalkungen_und_Anlagen_11_2010.pdf)
- PAAR, U. (1994): Untersuchungen zum Einfluss von Ammonium und Nitrat auf wurzelphysiologische Reaktionsmuster der Buche. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A*, Bd. 115, 124 S.
- PAAR, U.; GUCKLAND, A.; DAMMANN, I.; ALBRECHT, M.; EICHHORN, J. (2011): Häufigkeit und Intensität der Fruktifikation der Buche. *AFZ-Der Wald*, 6, 26–29
- PAAR, U.; EVERS, J.; DAMMANN, I.; KÖNIG, N.; SCHULZE, A.; SCHMIDT, M.; SCHÖNFELDER, E.; SCHELER, B.; EICHHORN, J. (2016): Waldbodenzustandsbericht für Hessen. Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Beiträge aus der NW-FVA, Bd. 15, 458 S.
- OULEHLE, F.; EVANS, C.D.; HOFMEISTER, J.; KREJCI, R.; TAHOVSKA, K.; PERSSON, T.; CUDLIN, P.; HRUSKA, J. (2011): Major changes in forest carbon and nitrogen cycling caused by declining sulphur deposition. *Global Change Biology* 2011, 17, 3115–3129, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02468.x>
- PEÑUELAS, J.; POULTER, B.; SARDANS, J.; CIAIS, P.; VAN DER VELDE, M.; BOPP, L.; BOUCHER, O.; GODDERIS, Y.; HINSINGER, P.; LLUSIA, J.; NARDIN, E.; VICCA, S.; OBERSTEINER, M.; JANSSENS, I. A. (2013): Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe. *Nature Communications*, 4, 2934, 1–10, DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms3934>
- PEUKE, A. D.; RENNENBERG, H. (2004): Carbon, nitrogen, phosphorus, and sulphur concentration and partitioning in beech ecotypes (*Fagus sylvatica* L.): phosphorus most affected by drought. *Trees*, 18, 639–648, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-004-0335-x>
- PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. (2000): *Mixed-Effects Models in S and S-PLUS*. Springer-Verlag, New York, 528 S.
- PREGNITZER, K.S.; BURTON, A. J.; ZAK, D. R.; TALHELM, A. F. (2008): Simulated chronic deposition increases carbon storage in Northern Temperate forests. *Global change Biology* 14, 142–153, DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01465.x>
- PRENZEL, J. (1982): Ein bodenchemisches Gleichgewichtsmodell mit Kationenaustausch und Aluminiumhydroxosulfat. *Gött. Bodenk. Ber.* 72, 1–113
- PRIETZEL, J.; KÖLLING, C. (1999): Ein einfaches Routineverfahren zur Beurteilung des Remobilisierungspotenzials von Waldböden für Sulfat-Schwefel aus atmosphärischen Einträgen. *Forstw. Cbl.*, 118, 329–344
- PRIETZEL, J.; REHFUESS, K. E.; STETTER, U.; PRETZSCH, H. (2008): Changes of soil chemistry, stand nutrition, and stand growth at two Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sites in Central Europe during 40 years after fertilization, liming, and lupine introduction. *European Journal of Forest Research*, 127, 43–61, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-007-0181-7>
- PUHLMANN, H.; AHRENDTS, B.; KÖHLER, D.; WEIS, W. (2018): Keine Zuwachsverluste im Stammholz riskieren. Energieholznutzung von Schwachholz und Kronenmaterial erhöht das Risiko unzureichender Nährstoffversorgung. *Holz-Zentralblatt*, 38, 880–882
- PUHLMANN, H.; SOHRT, J.; RINDERER, M.; PRIETZEL, J.; KRÜGER, J.; LANG, F. (2020): Wo der Phosphormangel droht. *AFZ-DerWald*, 3, 20–23

- RASPE, S.; GÖTTLEIN, A. (2008): Nährstoffbilanzen von Fichtenökosystemen. *Forst u. Holz*, 7/8, 60–65
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2009): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. <http://R-project.org>
- REEMTSMA, J. B. (1964): Untersuchungen an Fichte und anderen Nadelbaumarten über den Nährstoffgehalt der lebenden Nadeljahrgänge und der Streu. Diss. Univ. Göttingen, 139 S.
- REEMTSMA, J. B. (1986): Der Magnesium-Gehalt von Nadeln niedersächsischer Fichtenbestände und seine Beurteilung. *AFJZ*, 10, 196–200
- REUSS, J. O. (1983): Implications of the Calcium-Aluminium Exchange System for the Effect of Acid Precipitation on soils. *J. Environ. Qual.*, Vol. 12, No. 4, 591–595
- REUSS, J. O.; JOHNSON, D. W. (1985): Effect of Soil Processes on the Acidification of Water by Acid Deposition. *J. Environ. Qual.*, Vol 14, No. 1, 26–31
- REUSS, J. O.; JOHNSON, D. W. (1986): Acid Deposition and the Acidification of Soils and Waters. *Ecological Studies*, 59, Springer, 199 S.
- RIEK, W.; DIETRICH, H.-P. (2000): Ernährungszustand der Hauptbaumarten an den deutschen Level II-Standorten. *Forstarchiv*, 71, 65–69
- RIEK, W.; WOLFF, B. (2007): Bodenkundliche Indikatoren für die Auswertung der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme Reihe B*, Bd. 74, Selbstverlag, Göttingen
- RIEK, W.; RUSS, A.; KÜHN, D. (2015): *Waldbodenbericht Brandenburg*. Bd. 1, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd 50, 170 S.
- RIEK, W.; RUSS, A. (2019): *Waldbodenbericht Brandenburg*. Bd. 2, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd 68, 235 S.
- RIEK, W.; TALKNER, U.; DAMMANN, I.; KOHLER, M.; MEIWES, K. J.; GÖTTLEIN, A. (2016): Waldernährung. In: WELLBROCK, N.; BOLTE, A.; FLESA, H. (Hrsg.): *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008*. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Report, 43, 245–291
- RIEK, W.; RUSS, A.; MARX, M. (2021): Concentrations of Inorganic and Organic Pollutants in Forest Soils as an Archive of Anthropogenic Inputs in the State of Brandenburg, Germany. *Appl. Sci.* 11, 1189, DOI: <https://doi.org/10.3390/app11031189>
- ROTHER, A.; CROMACK JR, K.; RESH, S. C.; MAKINECI, E.; SON, Y. (2002 a): Soil carbon and nitrogen changes under Douglas-fir with and without Red Alder. *Soil Science Society of America Journals*, Vol. 66, 6, 1988–1995, <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1988>
- ROTHER, A.; HUBER, C.; KREUTZER, K.; WEIS, W. (2002 b): Deposition and soil leaching in stands of Norway spruce and European beech: Results from the Höglwald research in comparison with other European case studies. *Plant and Soil*, 240, 33–45
- RUMPF, S.; KHANNA, P. K.; BAUHUS, J.; MEIWES, K. J.; KOHLER, M.; SCHÖNFELDER, E. (2008): Phosphor-Versorgung – Zustand und Tendenzen sowie ihre Bedeutung für die Energieholznutzung. *Energieholz und Nachhaltigkeit*, Teil 3: Waldernährung. *Forst und Holz*, 63, 37–40
- RUSS, A.; RIEK, W.; MARTIN, J. (2011): Zustand und Wandel der Waldböden Mecklenburg-Vorpommerns. *Mitteilungen aus dem Forstlichen Versuchswesen Mecklenburg-Vorpommern*, 9, 108 S.
- SCHAAP, M.; HENDRIKS, C.; KRANENBURG, R.; KUENEN, J.; SEGERS, A.; SCHLUTOW, A.; NAGEL, H.-D.; RITTER, A.; BANZHAF, S. (2018): PINETI-3: Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland. *Texte Umweltbundesamt*, 79, 149
- SCHACHTSCHABEL, P.; BLUME, P.; BRÜMMER, G. W.; HARTGE, K. H.; SCHWERTMANN, U. (1998): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 14. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 494 S.
- SCHELER, B. (2017): Stoffeinträge. In: *NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2017 für Niedersachsen*, 28–30
- SCHELER, B. (2018): Stoffeinträge. 34–35. In: *Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.), Waldzustandsbericht für Sachsen-Anhalt 2018*, 48 S.

- SCHMIDT, W. (2006): Zeitliche Veränderung der Fruktifikation bei der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) in einem Kalkbuchenwald (1981–2004). *AFJZ*, 177, 9–19
- SCHMIDT, W.; STÜBER, V.; ULLRICH, T.; PAAR, U.; EVERS, J.; DAMMANN, K.; HÖVELMANN, T.; SCHMIDT, M. (2015): Synopse der Hauptmerkmale der forstlichen Standortskartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer. Beiträge aus der NW-FVA, Bd. 12, 136 S.
- SCHMIDT-WALTER, P.; AHREND, B.; MEESEBURG, H. (2016): Bodenwasserhaushalt und Trockenstress. In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2016 für Niedersachsen. 20–22
- SCHMITZ, A.; SANDERS, T.G.M.; BOLTE, A.; BUSSOTTI, F.; DIRNBÖCK, T.; JOHNSON, J.; PEÑUELAS, J.; POLLASTRINI, M.; PRESCHER, A.-K.; SARDANS, J.; ET AL. (2019): Responses of forest ecosystems in Europe to decreasing nitrogen deposition. *Environmental Pollution*, 244, 980–994, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.101>
- SCHULTE-BISPING, H.; BREDEMEIER, M.; BEESE, F. (2001): Nachhaltigkeit der Regelungsfunktion von Waldökosystemen: Bodeneigenschaften und Stoffhaushalt. *Forst und Holz* 56, 479–482
- SCHULZE, A. (2012): Strukturierung und Integration der Bodenzustandserhebungen I und II für Niedersachsen, Bremen, Sachsen-Anhalt, Hessen und Schleswig-Holstein (internes Dokument, unveröffentlicht)
- SCHULZE, A.; EVERS, J. (2013): Konzeption und Realisierung einer übergreifenden Datenorganisation für die Bodenzustandserhebung. *AFZ-DerWald*, 14, 21–24
- SCHULZE, E.-D.; DE VRIES, W.; HAUHS, H.; ROSÉN, K.; RASMUSSEN, L.; TAMM, C.-O.; NIELSSON, J. (1989): Critical loads for nitrogen deposition on forest ecosystems. *Water, Air and Soil Pollution*, 48, 451–456
- SCHULZE, E.-D.; BECK, E.; MÜLLER-HOHENSTEIN, K. (2002): Pflanzenökologie. Spektrum Akademischer Verlag, 846 S.
- SCHWANECKE, W. (1970): Richtlinie für die Bildung und Kartierung der Standortseinheiten im Hügelland und Mittelgebirge der DDR. VEB Forstprojektierung Potsdam
- SCHWANECKE, W.; KOPP, D. (1994): Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke des Landes Sachsen-Anhalt. Forstliche Landesanstalt Sachsen-Anhalt, Haferfeld 203 S.
- SIMON, K.-H.; WESTENDORFF, K. (1991): Stoffeinträge mit dem Niederschlag in Kiefernbeständen des nordostdeutschen Tieflandes in den Jahren 1985–1989. *Beitr. Forstwirtschaft*, 25, 4, S. 177–180
- SOLBERG, S.; DOBBERTIN, M.; REINDS, G. J.; LANGE, H.; ANDREASSEN, K.; FERNANDEZ, P. G.; HILDINGSSON, A.; DE VRIES, W. (2009): Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: A stand growth approach. *Forest Ecology and Management*, 258, 1735–1750, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.057>
- SRU (SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN) (2015): Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Sondergutachten. Berlin, 564 S.
- STUBER, M.; BÜRGI, M. (2011): Hüeterbueb und Heitisträhl. Traditionelle Formen der Waldnutzung in der Schweiz 1800 bis 2000. Haupt-Verlag, Bern, 302 S.
- SÜSSER, P.; SCHWERTMANN, U. (1991): Proton buffering in mineral horizons of some acid forest soils. *Geoderma*, 49, Iss. 1–2, 63–76
- SUTMÖLLER, J. (2017): Witterung und Klima. 16–19. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.), Waldzustandsbericht 2017 Sachsen-Anhalt, 36 S.
- SUTMÖLLER, J. (2020): Witterung und Klima. In: NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2020 für Sachsen-Anhalt, 18–21
- TALKNER, U.; MEIWE, K. J.; ANDREAE, H.; DAMMANN, I.; DIETRICH, H. P.; GENSSLER, L.; KALLWEIT, R.; SCHIMMING, C.; SCHRÖCK, H. W.; SEIDLING, W.; VON WILPERT, K. (2011): Raum-zeitliche Variabilität der Elementgehalte in Blättern und Nadeln auf Intensiv-Monitoringflächen in Deutschland. Vortrag. Tagung der Sektion Waldernährung im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten (DVFFA), 4.–6. Mai 2011 in Bamberg

- TALKNER, U.; MEIWES, K. J.; POTOČIĆ, N.; SLETKOVIĆ, I.; COOLS, N.; DE VOS, B.; RAUTIO, P. (2015): Phosphorus nutrition of beech (*Fagus sylvatica* L.) is decreasing in Europe. *Annals of Forest Science*, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0459-8>
- TALKNER, U.; ZEDERER, D. (2020): Die Phosphorversorgung der Rotbuche. *AFZ-DerWald*, 3, 12–15
- TAMM, C. O. (1991): Nitrogen in terrestrial ecosystems. Questions of productivity, vegetational changes and ecosystems stability. *Ecological Studies*, 81, Berlin, Springer Verlag, 116 S.
- TEEPE, R.; DILLING, H.; BEESE, F. (2003): Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166, 111–119
- THOMS, C., BURESCH, M.; MINDRUP, M.; SENNHENN-REULEN, H.; TALKNER, U.; EICHHORN, J.; GREVE, M.; HANNEMANN, J.; HARTMANN, P.; HABDENTEUFEL, M.; JANSONE, L.; KRÜGER, C.; RIEK W.; RUSS, A. (2018): Nachhaltige Nährstoffversorgung und Gesunderhaltung von Wäldern – Abschlussbericht des vom BMEL geförderten Modellvorhabens. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Bonn. 186 S.
- UBA (2014): Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2014. National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990–2012. Umweltbundesamt Dessau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/submission-under-the-united-nations-framework> (Zugriff am 16.11.2018)
- ULRICH, B. (1966): Kationenaustausch-Gleichgewichte in Böden. *Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.*, 113, 141–159
- ULRICH, B. (1981): Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 144, 289–305
- ULRICH, B. (1982): Gefahr für das Waldökosystem durch Saure Niederschläge. In: Immissionsbelastung von Waldökosystemen. Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung Nordrhein-Westfalen. 9–23
- ULRICH, B. (1983): Stabilität von Waldökosystemen unter dem Einfluss des „sauren Regens“. *AFZ*, 38, 26/27, 670–676
- ULRICH, B. (1986): Natural and anthropogenic components of soil acidification. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 149, 6, 702–717
- ULRICH, B. (1994): Nutrient and acid-base budget of central European forest ecosystems. In: DOUGLAS, L.; GODBOLD, D. L.; HÜTTERMANN, A. (Hrsg.): *Effects of Acid Rain on Forest Processes*, Wiley Liss. New York, 1–50
- ULRICH, B.; MAYER, R.; KHANNA, P. K. (1979): Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. *Schr. Forstl. Fakultät Univ. Göttingen*, 58, 291 S.
- ULRICH, B.; MEIWES, K. J.; KÖNIG, N.; KHANNA, P. K. (1984): Untersuchungsverfahren und Kriterien zur Bewertung der Versauerung und ihrer Folgen in Waldböden. *Der Forst- und Holzwirt*, 39, 278–286
- UNECE (UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE) (1979): *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP)*. Geneva
- VAN MIEGROET, H.; COLE, D. W.; FOSTER, N. W. (1992): Nitrogen distribution and cycling. In: JOHNSON, W.; LINDBERG, S. E. (Hrsg.) *Atmospheric deposition and forest nutrient cycling – A synthesis of the integrated forest study*. Springer Verlag, Heidelberg, 178–195
- VON WILPERT, K. (2003): Drift des Stoffhaushalts im Fichten-Düngeversuch Pfalzgrafenweiler. *AFJZ*, 174, 21–30
- VON WILPERT, K.; AHRENDTS, B.; WEIS, W.; VONDERACH, C.; PUHLMANN, H.; KÖHLER, D.; SÜCKER, C.; KÄNDLER, G.; NAGEL, J. (2018): Standortangepasste Nutzungsintensitäten und forstliche Handlungsoptionen. In: *Holznutzung und Nährstoffnachhaltigkeit. Abschlussbericht zum Projekt „Energieholzernte und stoffliche Nachhaltigkeit in Deutschland“ (EnNa)*. Freiburger Forstliche Forschung, Berichte, 101, 325–373
- WANG, M. et al. (2020): Rapid growth of new atmospheric particles by nitric acid and ammonia condensation. *Nature* 581, 184–189

- WALDNER, P.; THIMONIER, A.; GRAF PANNATIER, E.; ETZOLD, S.; SCHMITT, M.; MARCHETTO, A.; RAUTIO, P.; DEROME, K.; NIEMINEN, T.M.; NEVALAINEN, S.; LINDROOS, A.-J.; MERILÄ, P.; KINDERMANN, G.; NEUMANN, M.; COOLS, N.; DE VOS, B.; ROSKAMS, P.; VERSTRAETEN, A.; HANSEN, K.; PIHL KARLSSON, G.; DIETRICH, H.P.; RASPE, S.; GRANKE, O.; FISCHER, R.; IOST, S.; LORENZ, M.; SANDERS, T.G.M.; MICHEL, A.; NAGEL, H.-D.; SCHEUSCHNER, T.; SIMONČIĆ, P.; VON WILPERT, K.; MEESENBURG, H.; FLECK, S.; INGERSLEV, M.; GUNDENSEN, P.; STUPAK, I.; VESTERDAL, L.; JONARD, M.; NICHOLAS, M.; CLARKE, N.; BENHAM, S.; VANGUELOVA, E.; POTOČIĆ, N.; MINAYA, M. (2015): Exceedance of critical loads and of critical limits impacts tree nutrition across Europe. *Annals of Forest Science*, 72, 929–939, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0489-2>
- WALDROP M. P.; ZAK, D. R.; SINSABAUGH, R. L. (2004): Microbial community response to nitrogen deposition in northern forest ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 36, 1443–1451
- WEHRMANN, J. (1959): Methodische Untersuchungen zur Durchführung von Nadelanalysen in Kiefernbeständen. *Forstw. Cbl.*, 78, 77–97
- WEIS, W.; GRUBER, A.; HUBER, C.; GÖTTLEIN, A. (2009): Element concentrations and storage in the aboveground biomass of limed and unlimed Norway spruce trees at Höglwald. *European Journal of Forest Research*, 128, 437–445, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0291-5>
- WEIS, W.; AHREND, B. (2018): Nutzungsfreie Stoffbilanzen für die Punkte der BZE II. *Freiburger Forstliche Forschung*, 101, 206–226
- WELLBROCK, N.; AYDIN, C.-T.; BLOCK, J.; BUSSIAN, B.; DECKERT, M.; DIEKMANN, O.; EVERS, J.; FETZER, K. D.; GAUER, J.; GEHRMANN, J.; KÖLLING, C.; KÖNIG, N.; LIESEBACH, M.; MARTIN, J.; MEIWES, K. J.; MILBERT, G.; RABEN, G.; RIEK, W.; SCHÄFFER, W.; SCHWERHOFF, J.; ULLRICH, T.; UTERMANN, J.; VOLZ, H.-A.; WEIGEL, A.; WOLFF, B. (2006): Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II), Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen. BMELV (Hrsg.), Berlin, 413 S.
- WELLBROCK, N.; BOLTE, A.; FLESSA, H. (Hrsg.) (2016): Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. *Thünen Report*, 43, Braunschweig, 495 S. und Anhang
- WOLFF, B.; RIEK, W. (1997): Deutscher Waldbodenbericht 1996. Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987–1993 (BZE). BML (Hrsg.), Bonn, 141 S.
- YANAI, R. D. (1992): Phosphorus budget of a 70-year-old northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 17, 1–22



## Glossar und Abkürzungen

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| AAS                           | Atomabsorptionsspektroskopie mit Flammentechnik  |
| AAS-G                         | Atomabsorptionsspektroskopie mit Graphitrohrtechnik  |
| Ake                           | effektive Austauschkapazität   |
| Akt                           | potenzielle totale Austauschkapazität  |
| Al                            | Aluminium  |
| anthropogen                   | durch menschliche Aktivitäten verursacht   |
| atmogen                       | atmosphärisch erzeugt  |
| äolisch                       | durch Wind verursacht, luftbürtig  |
| Austauschkapazität (AK)       | Summe der austauschbaren Ionen in mmol/kg; abhängig vom pH-Wert  |
| Azidität                      | Säuregehalt einer Lösung   |
| Basensättigung                | Anteil der basisch wirkenden Kationen an der Kationenaustauschkapazität  |
| BBodSchG                      | Bundes-Bodenschutzgesetz   |
| BDF                           | Bodendauerbeobachtungsflächen  |
| BGR                           | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover  |
| Biozid                        | Mittel zur Bekämpfung von Schadorganismen  |
| Bodenart                      | Zusammensetzung des Bodens bezüglich der Hauptbodenarten, die ihrerseits auf der Korngrößenzusammensetzung der mineralischen Bodensubstanz beruhen |
| Bodentyp                      | Zusammenfassung von Böden mit gleicher Abfolge der Bodenhorizonte  |
| Bulk-Deposition               | Niederschlagsdeposition, mit ständig offenen Sammlern erfasst  |
| BZE                           | Bodenzustandserhebung  |
| C                             | Kohlenstoff  |
| C/N                           | Kohlenstoff-/Stickstoff-Verhältnis   |
| Ca                            | Calcium  |
| CaCl <sub>2</sub>             | Calciumchlorid   |
| Cd                            | Cadmium  |
| CO <sub>2</sub>               | Kohlendioxid   |
| CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | Carbonat-Ion   |
| Critical Load                 | Kritische Last; Belastungsgrenzwert für (Schad)stoffe  |
| Cu                            | Kupfer   |
| Cv                            | Variationskoeffizient  |

|                   |   |
|-------------------|---|
| DA                | Druckaufschluss mit Salpetersäure   |
| DA-PCI            | Druckaufschluss mit Salpetersäure und Perchlorsäure   |
| Deposition        | Niederschlag oder Ablagerung von Stoffen aus der Luft auf Oberflächen bzw. die Erdoberfläche                                |
| Derbholz          | Baumstamm und Äste über 7 cm Durchmesser  |
| DWD               | Deutscher Wetterdienst  |
| ECE               | Economic Commission for Europe  |
| EKI               | Ertragsklasse   |
| EMEP              | European Monitoring and Evaluation Programme der ECE  |
| eutroph           | gut nährstoffversorgt   |
| Eutrophierung     | Eintrag, ggf. Anreicherung von Nährstoffen in ein System  |
| Fb (Feinboden)    | Boden nur mit Körnern kleiner 2 mm Äquivalentdurchmesser  |
| Fe                | Eisen   |
| FFG               | Forsthydrologische Forschungsgebiete  |
| Fulvosäuren       | organische Säuren, die beim Abbau pflanzlichen Materials entstehen  |
| GA                | Gesamtaufschluss mit Flusssäure   |
| GAFA              | Gutachterausschuss Forstliche Analytik  |
| Georeferenzierung | Zuordnung von geographischen Koordinaten zu raumbasierenden Daten   |
| Gt                | Gigatonne (Milliarde Tonnen)  |
| H, H <sup>+</sup> | Wasserstoff, Wasserstoff-Ion (auch Proton)  |
| HFA               | Handbuch Forstliche Analytik  |
| HLUG              | Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (bis 2015)   |
| HLNUG             | Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (ab 2016)   |
| Huminsäuren       | organische Säuren, die beim Abbau pflanzlichen Materials entstehen  |
| Humusform         | typische Abfolge von Horizonten in der organischen Auflage und im mineralischen Oberboden                                   |
| ICP               | International Co-operative Programme  |
| ICP               | induktiv gekoppeltes Plasma, oft verwendet als Abkürzung für ICP-OES  |
| ICP-MS            | induktiv gekoppelte Plasmaspektroskopie gekoppelt mit einem Massenspektrometer  |
| ICP-OES           | "inductively coupled plasma optical emission spectrometry", optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma |
| IPCC              | International Panel for Climate Change  |

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| IPE                               | International Plant-analytical Exchange Programme                                      |
| ISE                               | International Soil-analytical Exchange Evaluating Programm for Analytical Laboratories |
| IWE                               | Immissionsökologische Waldzustandserhebung   |
| K                                 | Kalium   |
| K/Ca-Antagonismus                 | gegenseitige Hemmung der Aufnahme von Kalium- und Calciumionen                         |
| Kalkungskulisse                   | Standorte, die für eine Waldkalkung vorgesehen sind                                    |
| kmol                              | Kilomol = 1000 mol, Stoffmengeneinheit (siehe mol)                                     |
| kmol <sub>c</sub>                 | Kilomol (charge): Stoffmenge der Ionenäquivalente                                      |
| LAPIS                             | Laborproben-Informationssystem   |
| LHL Kassel                        | Landesbetrieb Hessisches Landeslabor Kassel  |
| LIMS                              | Labor Informations und Management System   |
| Ma-Kationen                       | saure Kationen (Al, Mn, Fe, H)   |
| mesotroph                         | mittelmäßig nährstoffversorgt  |
| Mg                                | Magnesium  |
| Mn                                | Mangan   |
| mol                               | Stoffmengeneinheit, 1Mol = 6,022 *10 <sup>23</sup> Teilchen                            |
| N                                 | Stickstoff   |
| N <sub>2</sub> O                  | Distickstoffoxid, Lachgas  |
| Na                                | Natrium  |
| nFK                               | nutzbare Feldkapazität   |
| Ni                                | Nickel   |
| NO, NO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | Nitrat, Nitrat-Ion   |
| oligotroph                        | schwach nährstoffversorgt  |
| P                                 | Phosphor   |
| Pb                                | Blei   |
| Perkolation                       | Durchfließen einer Lösung durch ein festes Substrat in einer Säule                     |
| pH                                | pH-Wert, Wasserstoffionenkonzentration   |
| pH(CaCl <sub>2</sub> )            | pH-Wert, in CaCl <sub>2</sub> -Lösung gemessen   |
| pH(H <sub>2</sub> O)              | pH-Wert, in H <sub>2</sub> O gemessen  |
| pH(KCl)                           | pH-Wert, in KCl-Lösung gemessen  |
| POP                               | Persistent Organic Pollutant, langlebiger organischer Schadstoff                       |
| Pufferbereich                     | Gliederung der Pufferkapazität des Bodens nach Pufferreaktionen                        |

|   |   |
|---|---|
| Pufferung                                       | Fähigkeit eines Systems, einen Kennwert innerhalb gewisser Grenzen trotz Zu- oder Abfuhr konstant zu halten; hier Fähigkeit des Bodens, Änderungen des pH-Werts abzufangen  |
| QM  | Qualitätsmanagement   |
| QS  | Qualitätssicherung  |
| Relief  | Oberflächenform des Geländes  |
| Residuen  | Statistik: Abweichung der Einzelwerte von der geschätzten Funktion  |
| Resilienz                                       | Widerstandsfähigkeit, Elastizität; in diesem Zusammenhang: gegen Störungen des Ökosystems, die das System grundlegend verändern   |
| S   | Schwefel  |
| Se  | Selen   |
| SO <sub>4</sub> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Sulfat, Sulfat-Ion  |
| Soliflukationsdecke                             | Fließerde   |
| Stratifizieren                                  | Zerlegung der Grundgesamtheit in Teile, aus denen Teilstichproben gezogen werden  |
| Substrat  | Grundmaterial – mineralisch und organisch – des Bodens, inklusive Ausgangsgestein und Verwitterungszustand  |
| Substratgruppe                                  | Zusammenfassung von Böden mit ähnlichen Merkmalen (u. a. Ausgangssubstrat, erdgeschichtliche Einordnung, Lagerungsverhältnisse)   |
| Substratlagerung                                | Zusammenfassung von Ausgangssubstrat, Aufbau, Körnigkeit, Dichte und Schichtfolge von Böden   |
| Substratzahl                                    | Codierung der Feineinteilung von Waldböden, die aus Substratgruppe, Substrat und Lagerung festgelegt wird   |
| TRD   | Trockenrohdichte, Masse des trockenen Bodens je Volumeneinheit in g/cm <sup>3</sup>   |
| TRD(Fb)   | Trockenrohdichte des Feinbodens in g/cm <sup>3</sup>  |
| Trophie   | Einstufung der Nährstoffversorgung eines Standortes   |
| TS  | Trockensubstanz   |
| VDLUFA  | Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V.  |
| Vollbaumnutzung                                 | Nutzung aller oberirdischen Teile eines Baumes  |
| WÖSSH   | Waldökosystemstudie Hessen  |
| WZE   | Waldzustandserhebung  |
| Zn  | Zink  |
| Z-Score   | ein statistisches Bewertungsverfahren, hier ein Maß für die Abweichung des Labormittelwertes vom Mittelwert aller Labore in Abhängigkeit von der Streuung unter den Laboren |

## **Danksagung**

Der vorliegende BZE II Bericht für Sachsen-Anhalt konnte nur durch das Engagement und die Arbeit vieler Personen ermöglicht werden. Das Autorenteam dankt allen Kolleginnen und Kollegen, die mit ihrem Einsatz zum Gelingen der BZE II und dieses Bandes beigetragen haben.

Ohne den intensiven und fruchtbaren Gedanken- und Erfahrungsaustausch der Bund/Länder-Arbeitsgruppe zur BZE II stünde die BZE nicht auf diesem soliden fachlichen Fundament.

Unser besonderer Dank gilt Dr. Thomas Heinkele für die Durchführung der bodenkundlichen Außenaufnahmen, Thomas Janssen und Heiner Heile für die ertragskundlichen Aufnahmen der Bestände und Dr. Thomas Kompa für die Aufnahme der Bodenvegetation an den BZE II-Punkten sowie den Zapfenpflückern für ihren nicht ungefährlichen Einsatz.

Für die Durchführung der umfangreichen physikalischen und chemischen Analysen der Boden-, Humus- und Pflanzenproben gilt unser besonderer Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Umweltlabors der NW-FVA, des Hessischen Landeslabors und des Labors der BGR.

Allen privaten Waldbesitzern, Vertretern von Körper- und Genossenschaftswald sowie den Landes- und Bundesforsten sei dafür gedankt, dass sie die Außenaufnahmen in ihren Wäldern zugelassen und unterstützt haben.

Nicht zuletzt sei den vielen wissenschaftlichen und studentischen Hilfskräften für ihren unermüdlichen Einsatz im Rahmen der BZE II gedankt.



## **Autor\*innen**

### **Dr. Bernd Ahrends**

Nordwestdeutsche Forstliche  
Versuchsanstalt  
Abt. Umweltkontrolle  
Grätzelstraße 2  
D-37079 Göttingen  
bernd.ahrends@nw-fva.de

### **Dr. Jan Evers**

Nordwestdeutsche Forstliche  
Versuchsanstalt  
Abt. Umweltkontrolle  
Grätzelstraße 2  
D-37079 Göttingen  
jan.evers@nw-fva.de

### **Andreas Hafner**

Nordwestdeutsche Forstliche  
Versuchsanstalt  
Abt. Umweltkontrolle  
Grätzelstraße 2  
D-37079 Göttingen  
andreas.hafner@nw-fva.de

### **Inge Dammann**

*Normals:* Nordwestdeutsche Forstliche  
Versuchsanstalt  
Abt. Umweltkontrolle  
Grätzelstraße 2  
D-37079 Göttingen

### **Prof. Dr. Johannes Eichhorn**

*Normals:* Nordwestdeutsche Forstliche  
Versuchsanstalt  
Abt. Umweltkontrolle  
Grätzelstraße 2  
D-37079 Göttingen  
johannes.eichhorn@nw-fva.de

*Jetzt:*

Altenhagenerstr. 39  
34359 Reinhardshagen  
Joeichhorn@gmx.de

### **Nils König**

*Normals:* Nordwestdeutsche Forstliche  
Versuchsanstalt  
Abt. Umweltkontrolle  
Grätzelstraße 2  
D-37079 Göttingen

**Dr. Uwe Paar**

Nordwestdeutsche Forstliche Ver-  
suchsanstalt

Abt. Umweltkontrolle

Grätzelstraße 2

D-37079 Göttingen

uwe.paar@nw-fva.de

**Birte Scheler**

Nordwestdeutsche Forstliche  
Versuchsanstalt

Abt. Umweltkontrolle

Grätzelstraße 2

D-37079 Göttingen

birte.scheler@nw-fva.de

**Dr. Marcus Schmidt**

Nordwestdeutsche Forstliche  
Versuchsanstalt

Abt. Waldnaturschutz

Prof. Oelkers-Straße 6

D-34346 Hann. Münden

marcus.schmidt@nw-fva.de

**Wolfgang Schmidt**

Krausenstr. 17

D-08523 Plauen

ws@filmkataput.de

**Dr. Egbert Schönfelder**

*Normals:* Nordwestdeutsche Forstliche  
Versuchsanstalt

Abt. Waldwachstum

egbert.schoenfelder@gmx.net



## Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt

Band

- 1 (2007) **Clusterstudie Forst und Holz Niedersachsen.** Burkhard Rüther, Jan Hansen, Agatha Ludwig, Hermann Spellmann, Jürgen Nagel, Bernhard Möhring, Matthias Dieter. 92 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2007-261>
- 2 (2008) **Die Waldkiefer – Fachtagung zum Baum des Jahres 2007.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 98 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2008-268>
- 3 (2008) **Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 343 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2008-269>
- 4 (2008) **Ergebnisse des westdeutschen IUFRO-Küstentannen-Provenienzversuches im Alter 27.** Hans-Martin Rau, Armin König, Wolfhard Ruetz, Hendrik Rumpf, Egbert Schönfelder. 62 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2008-271>
- 5 (2010) **Fichtenherkunftsversuch von 1962 und IUFRO-Fichtenherkunftsversuch von 1972. Ergebnisse von mehr als 30-jähriger Beobachtung in Deutschland.** Mirko Liesebach, Hans-Martin Rau, Armin O. König. 467 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2010-278>
- 6 (2011) **Kohlenstoffstudie Forst und Holz Niedersachsen.** René Wördehoff, Hermann Spellmann, Jan Evers, Jürgen Nagel. 92 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2011-252>
- 7 (2012) **Das digitale Luftbild. Ein Praxisleitfaden für Anwender im Forst- und Umweltbereich.** Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (Hrsg.). 84 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2012-254>
- 8 (2012) **Züchtung und Ertragsleistung schnellwachsender Baumarten im Kurzumtrieb. Erkenntnisse aus drei Jahren FastWood, ProLoc und Weidenzüchtung. Fachtagung vom 21. bis 22.09.2011 in Hann. Münden.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 430 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2012-256>

Band

- 9 (2012) **SILVAQUA – Auswirkungen forstlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Zustand von Gewässern in bewaldeten Einzugsgebieten am Beispiel der Oker im Nordharz.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 226 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2012-258>
- 10 (2013) **Waldentwicklungsszenarien für das Hessische Ried. Entscheidungsunterstützung vor dem Hintergrund sich beschleunigt ändernder Wasserhaushalts- und Klimabedingungen und den Anforderungen aus dem europäischen Schutzgebietssystem Natura 2000.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 397 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2013-259>
- 11 (2014) **Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGrOSS – Anwendung und theoretische Grundlagen.** Jan Hansen, Jürgen Nagel. 224 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2014-757>
- 12 (2015) **Synopse der Hauptmerkmale der forstlichen Standortskartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer.** Wolfgang Schmidt, Volker Stüber, Thomas Ullrich, Uwe Paar, Jan Evers, Klaus Dammann, Thomas Hövelmann, Marcus Schmidt. 136 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2015-797>
- 13 (2015) **Pilotstudie zu den lokalen Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft in ausgewählten Regionen Sachsen-Anhalts.** Stefan Fleck, Matthias Albert, Pavel Plašil, Ralf Nagel, Johannes Suttmöller, Bernd Ahrends, Matthias Schmidt, Jan Evers, Jan Hansen, Marc Overbeck, Wolfgang Schmidt, Hermann Spellmann, Henning Meesenburg. 221 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2015-892>
- 14 (2016) **Gefährdungen der Ökosystemdienstleistungen von Wäldern. Fachtagung vom 9. bis 10. Oktober 2014 in Göttingen.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 185 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2016-975>

Band

- 15 (2016) **Waldbodenzustandsbericht für Hessen – Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II).** Uwe Paar, Jan Evers, Inge Dammann, Nils König, Andreas Schulze, Marcus Schmidt, Egbert Schönfelder, Birte Scheler, Thomas Ullrich, Johannes Eichhorn. 466 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2016-1001>
- 16 (2017) **Hochwertiges Forstvermehrungsgut im Klimawandel. Symposium des Verbundprojektes FitForClim vom 14. bis 15. Juni 2016 in Chorin.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 185 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2017-1062>
- 17 (2017) **Waldböden: Nutzung und Schutz. Fachtagung vom 10. bis 11. Oktober 2016 in Göttingen.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 157 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2017-1066>
- 18 (2017) **Nachhaltiges Landmanagement im Norddeutschen Tiefland.** H. Spellmann, B. Ahrends, M. Albert, S. Andert, T. Barkmann, M. Böcher, B. Breckling, O. Christen, J. Dvorak, M. Eggers, S. Fleck, N. Fohrer, M. Gaulty, B. Gerowitt, D. Gieseke, J. Grocholl, W. Hakes, V. Hammes, V. Hartje, G. Haunert, M. Hoffmann, J. Hufnagel, J. Isselstein, R. Kätzel, M. Kayser, I. Kehr, H. Knauer, M. Krott, C. Lambertz, A. Lange, G. Langer, G. Leefken, S. Löffler, H. Meesenburg, R. Meißner, H. Messal, P. Meyer, B. Möhring, K. Möller, J. Nagel, R. Nuske, A. Oetzmann, S. Ohrmann, C. v. Redwitz, J. Riediger, M. Schmidt, J. Schröder, W. Schröder, R. Siebert, D. Spindelndreher, H. Stahlmann, L. Stöck, J. Suttmöller, N. Svoboda, D. Tänzer, A. v. Tiedemann, B. Ulber, K. Wegner, P.C. Werner, M. Winter., H. Wüstemann, P. Zander, T. Ziesche. 436 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2018-1073>
- 19 (2019) **Waldbodenzustandsbericht für Niedersachsen und Bremen – Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II).** Jan Evers, Inge Dammann, Nils König, Uwe Paar, Volker Stüber, Andreas Schulze, Marcus Schmidt, Egbert Schönfelder, Johannes Eichhorn. 498 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2019-1162>

Band

20 (2022) **Waldbodenzustandsbericht für Sachsen-Anhalt.** Jan Evers, Inge Dammann, Uwe Paar, Wolfgang Schmidt, Bernd Ahrends, Birte Scheler, Nils König, Egbert Schönfelder, Marcus Schmidt, Andreas Hafner, Johannes Eichhorn. 450 S.  
DOI: <https://doi.org/10.17875/gup2022-2005>

Alle Bände der „Beiträge der NW-FVA“ sind auch als freie Onlineversion über die Homepage der NW-FVA ([www.nw-fva.de](http://www.nw-fva.de)), des Verlags sowie über den Göttinger Universitätskatalog (GUK) bei der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen (<http://www.sub.uni-goettingen.de>) erreichbar.  
Es gelten die Lizenzbestimmungen der Onlineversion.

Die Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) gibt ein umfassendes Bild des aktuellen Zustands der Waldböden und deren Veränderungen im Laufe der Zeit. Die BZE in Sachsen-Anhalt basiert auf einem Rasternetz mit insgesamt 76 Aufnahmepunkten. Die BZE I (1992–1994) ergab deutlich kritische Zustände der Waldböden, vor allem infolge atmosphärischer Einträge. Die Wiederholungsinventur (BZE II, 2006–2008) gibt nun Aufschluss über Veränderungen in Waldböden vor dem Hintergrund zurückgehender Säure- und Flugascheinträge und weiterhin erhöhter Stickstoffeinträge. Neben der eingehenden Analyse chemischer Eigenschaften verschiedener Waldböden – von unverlehmten Sanden im Tiefland, Lösslehmen im Hügelland und Festgesteinen im Harz – stehen die Kohlen- und Stickstoffspeicherung im Fokus, außerdem Ergebnisse zur Baumernährung, zur Waldvegetation und zum Intensiven Monitoring. Der Waldbodenzustandsbericht für Sachsen-Anhalt liefert wichtige Entscheidungsgrundlagen für Wissenschaft, Praxis und Politik.



ISBN: 978-3-86395-549-6  
ISSN: 1865-6994  
eISSN: 2512-594X

Universitätsdrucke Göttingen