

Waldbodenzustandsbericht für Hessen

Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)

U. Paar, J. Evers, I. Dammann, N. König, A. Schulze, M. Schmidt,
E. Schönfelder, B. Scheler, T. Ullrich, J. Eichhorn



U. Paar, J. Evers, I. Dammann, N. König, A. Schulze, M. Schmidt,
E. Schönfelder, B. Scheler, T. Ullrich, J. Eichhorn

Waldbodenzustandsbericht für Hessen

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



erschieden als Band 15 der Reihe
„Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt“
in den Universitätsdrucken im Universitätsverlag Göttingen 2016

U. Paar, J. Evers, I. Dammann,
N. König, A. Schulze, M. Schmidt,
E. Schönfelder, B. Scheler, T. Ullrich,
J. Eichhorn

Waldbodenzustandsbericht für Hessen

Ergebnisse der zweiten
Bodenzustandserhebung im Wald
(BZE II)

Beiträge aus der
Nordwestdeutschen
Forstlichen Versuchsanstalt
Band 15



Universitätsverlag Göttingen
2016

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische 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

www.nw-fva.de

Schriftleitung der Reihe: Prof. Dr. Hermann Spellmann

Redaktion der Reihe: Inge Kehr, Ulrike Gaertner

Titelfotos: Waldböden in Hessen; *links:* Tonschiefer; *mittig:* Buntsandstein; *rechts:* Basalt; (Herbert Kasel, HLNUG)

Zitiervorschlag:

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, Band 15, 466 S.

Dieses Buch ist auch als freie Onlineversion über die Homepage 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.

© 2016 Universitätsverlag Göttingen

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

ISBN: 978-3-86395-293-8

ISSN: 1865-6994

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	IX
Zusammenfassung	1
Abstract	5
1 Überblick: Bewertung und Diskussion der bodenkundlichen Ergebnisse (Uwe Paar, Jan Evers)	9
1.1 Vorbemerkungen und Rahmenbedingungen	9
1.1.1 Ländlicher Versorgungswald und Waldboden	9
1.1.2 Säureeintrag und Waldboden	10
1.1.3 Veränderungen des Stickstoffhaushaltes und Waldboden	11
1.1.4 Klimaveränderungen und Waldboden	11
1.2 Repräsentativität der Bodenzustandserhebungen	12
1.3 Geologie, Boden und Bodenentwicklung	13
1.4 Substratgruppen	13
1.5 Substrat-Lagerungstypen	14
1.6 Bodentypen	14
1.7 Trockenrohdichten und Skelettanteile	15
1.8 Austauschkapazität	15
1.9 Status und Veränderung der Bodenversauerung	16
1.9.1 Kationen-Anteile an der Ake	16
1.9.2 Basensättigung	16
1.9.3 Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat	18
1.9.4 Pufferbereiche	18
1.9.5 Hinweise auf Prozesse und Bewertung	20
1.10 Wirkungen der Bodenschutzkalkung auf den Waldbodenzustand	20
1.10.1 Umfang durchgeführter Bodenschutzkalkungen	21
1.10.2 Vergleichende Bewertung gekalkter und ungekalkter BZE-Punkte	21
1.10.3 Bewertung	23
1.11 Hauptergebnisse zur Bodenchemie für die Substratgruppen	23
1.11.1 Buntsandstein (28 % der Waldfläche in Hessen)	23
1.11.2 Lösslehm (14 % der Waldfläche in Hessen)	25
1.11.3 Basalt/Diabas (14 % der Waldfläche in Hessen)	26
1.11.4 Tonschiefer (12 % der Waldfläche in Hessen)	27

1.11.5 Sande (10 % der Waldfläche in Hessen)	28
1.11.5.1 <i>Unverlehmte Sande</i>	28
1.11.5.2 <i>Schwach verlehmte Sande</i>	28
1.11.6 Grauwacke (5 % der Waldfläche in Hessen)	29
1.11.7 Ton(stein) (5 % der Waldfläche in Hessen)	29
1.11.8 Kalk-Standorte (3 % der Waldfläche in Hessen)	30
1.11.9 Lehm, Quarzit, Zechstein/Rotliegendes, Granit	31
1.11.9.1 <i>Lehm (3 % der Waldfläche in Hessen)</i>	31
1.11.9.2 <i>Quarzit (3 % der Waldfläche in Hessen)</i>	31
1.11.9.3 <i>Zechstein/Rotliegendes (2 % der Waldfläche in Hessen)</i>	32
1.11.9.4 <i>Granit (1 % der Waldfläche in Hessen)</i>	32
1.12 Humusformen	33
1.13 Status und Veränderung der Kohlenstoffspeicherung in den Waldböden	34
1.14 Stickstoffvorräte	36
1.15 C/N-Verhältnis	38
2 Kurzportraits der BZE-Punkte („Steckbriefe“)	
(Andreas Schulze, Uwe Paar, Jan Evers)	39
3 Einleitung	51
3.1 Allgemeine Einführung zum Thema Boden (Uwe Paar, Jan Evers)	51
3.1.1 Bodenbildung	51
3.1.2 Funktionen der Böden	52
3.1.3 Gefährdungen	53
3.2 Geologische und bodenkundliche Verhältnisse in hessischen Wäldern (Uwe Paar, Karl-Josef Sabel, Jan Evers, Thomas Ullrich)	56
3.2.1 Vorherrschende Ausgangssubstrate	56
3.2.2 Prozesse der Oberbodenbildung	63
3.3 Forstliches Umweltmonitoring an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) (Johannes Eichhorn, Uwe Paar, Henning Meeseburg, Jan Evers)	65
3.3.1 Aufgaben	65
3.3.2 Konzept	66
3.4 Wichtige Befunde des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings zur Bewertung und Einordnung der Ergebnisse der BZE (Henning Meeseburg, Uwe Klinck, Birte Scheler, Bernd Ahrends, Uwe Paar)	72
3.4.1 Stoffeintrag – Belastungssituation der Wälder	72
3.4.2 Indikatoren der Azidität von Waldböden	75
3.4.3 Stoffbilanzen ausgewählter hessischer Intensivmonitoringflächen	76
3.4.4 Zusammenfassung der Befunde des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings	79

4	Aufgaben und Ziele der Bodenzustandserhebungen	81
	(Uwe Paar, Jan Evers)	
5	Methoden (Uwe Paar, Jan Evers, Inge Dammann, Marcus Schmidt)	83
5.1	Allgemeine Einführung	83
5.2	Merkmalsgruppen	83
5.3	Untersuchungsdesign und -module am BZE II-Punkt	83
5.3.1	Beprobung und Analyse des Auflagehumus und der Mineralbodenproben	84
5.3.2	Blatt- und Nadelernährung	85
5.3.3	Vegetationsaufnahmen	87
5.3.4	Waldwachstumskundliche Aufnahmen	88
6	Ergebnisse der Bodenuntersuchungen	89
6.1	Repräsentativität des Erhebungsnetzes (Uwe Paar, Jan Evers)	89
6.2	Bodenmorphologische Kenngrößen (Jan Evers, Uwe Paar, Jörg Weymar)	93
6.2.1	Substratgruppen	93
	<i>6.2.1.1 Kalkung und Substratgruppen</i>	<i>96</i>
6.2.2	Substrat-Lagerungstypen	97
6.2.3	Bodentypen	101
	<i>6.2.3.1 Bodentypen nach Substratgruppen</i>	<i>105</i>
6.2.4	Humusformen	105
	<i>6.2.4.1 Veränderung des Auflagehumus</i>	<i>108</i>
6.3	Bodenphysikalische Kenngrößen (Jan Evers, Uwe Paar)	110
6.3.1	Trockenrohdichten des Feinbodens	110
6.3.2	Grobbodenanteil	111
6.3.3	Feinbodenvorrat	112
6.3.4	Nutzbare Feldkapazität	113
6.4	Bodenmorphologische und bodenphysikalische Kenngrößen im Ländervergleich (Jan Evers, Uwe Paar)	116
6.5	Bodenchemische Kenngrößen in Hessen (Jan Evers, Uwe Paar, Egbert Schönfelder)	123
6.5.1	Austauschkapazität	124
	<i>6.5.1.1 Austauschkapazität nach Substratgruppen</i>	<i>128</i>
	<i>6.5.1.2 Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität</i>	<i>144</i>
6.5.2	Basensättigung	146
	<i>6.5.2.1 Basensättigung nach Substratgruppen</i>	<i>149</i>

6.5.3	Austauschbare Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorräte	164
6.5.3.1	<i>Calcium</i>	165
6.5.3.2	<i>Magnesium</i>	170
6.5.3.3	<i>Kalium</i>	177
6.5.4	Austauschbare Ma-Kationen-Vorräte	180
6.5.5	pH-Werte und Pufferbereiche	183
6.5.5.1	<i>pH(H₂O)</i>	185
6.5.5.2	<i>pH(KCl)</i>	191
6.5.6	Kohlenstoff	196
6.5.6.1	<i>Kohlenstoffvorräte nach Substratgruppen</i>	200
6.5.7	Stickstoff	204
6.5.7.1	<i>Stickstoffvorräte nach Substratgruppen</i>	208
6.5.8	C/N-Verhältnisse	211
6.5.8.1	<i>C/N-Verhältnisse nach Substratgruppen</i>	213
6.5.8.2	<i>C/N-Verhältnisse im Auflagehumus nach Bestandestypen</i>	214
7	Waldernährung	
	(Inge Dammann, Egbert Schönfelder, Ulrike Talkner, Jan Evers, Uwe Paar)	217
7.1	Einleitung	217
7.2	Material und Methoden	218
7.3	Ergebnisse	223
7.3.1	Buche	223
7.3.1.1	<i>Kalkungsvergleich</i>	227
7.3.1.2	<i>Zeitliche Veränderungen</i>	230
7.3.2	Fichte	232
7.3.2.1	<i>Kalkungsvergleich</i>	235
7.3.2.2	<i>Vergleich 1. und 3. Nadeljahrgang</i>	237
7.3.2.3	<i>Vergleich BZE II (2007) und Bionetz_z (1982/1983)</i>	238
7.3.3	Kiefer	241
7.3.3.1	<i>Kalkungsvergleich</i>	244
7.3.4	Eiche	246
7.3.4.1	<i>Kalkungsvergleich</i>	249
7.4	Einflussfaktoren auf die Ernährungssituation	251
7.5	Diskussion und Bewertung der Ernährungssituation	254
7.5.1	Buche	254
7.5.2	Fichte	256
7.5.3	Kiefer	258
7.5.4	Eiche	258

7.5.5	Stickstoffeutrophierung und Bodenversauerung	258
7.5.5.1	<i>Stickstoffeutrophierung</i>	258
7.5.5.2	<i>Bodenversauerung</i>	259
7.5.6	Bodenschutzkalkung	262
7.5.7	Vollbaumnutzung	264
8	Vegetation (Marcus Schmidt, Egbert Schönfelder, Uwe Paar, Jan Evers)	267
8.1	Einführung	267
8.2	Methodik	267
8.2.1	Datenerhebung	267
8.2.2	Datenauswertung	268
8.2.3	Darstellung und Anwendung der Ergebnisse	268
8.3	Ergebnisse und Diskussion	271
8.3.1	pH(H ₂ O)	271
8.3.2	Basensättigung	275
8.3.3	C/N-Verhältnis	279
8.3.4	Basische Kationen (Ca, Mg, K)	281
8.3.4.1	<i>Calcium</i>	281
8.3.4.2	<i>Magnesium</i>	285
8.3.4.3	<i>Kalium</i>	287
8.3.5	Ansprache der Nährstoffversorgung mithilfe von Indikatorarten	290
9	Hauptergebnisse, Folgerungen für die Verwaltung und die forstliche Praxis (Uwe Paar, Jan Evers, Johannes Eichhorn, Thomas Ullrich)	293
9.1	Wie repräsentativ sind die Bodenzustandserhebungen? Sind die Ergebnisse auf die gesamte Fläche des Waldes in Hessen übertragbar?	293
9.2	Wie sieht der Waldboden in Hessen aus? Welche Strukturen können unterschieden werden?	293
9.2.1	Geologie, Boden und Bodenentwicklung	293
9.2.2	Substratgruppen und Substrat-Lagerung	294
9.2.3	Bodentypen	295
9.2.4	Trockenrohdichten und Skelettanteile	295
9.3	Sind hessische Waldböden sauer? Versauern sie trotz geringerer luftbürtiger Säurebelastungen weiter?	295
9.3.1	Bewertung	297
9.4	Wie hat sich die Bodenschutzkalkung in Hessen ausgewirkt? Brauchen wir sie auch in Zukunft?	297
9.4.1	Wirkungen der Bodenschutzkalkung auf die Waldernährung	298
9.4.2	Bewertung	299

9.5	Wie ist der Zustand von Humus und organischer Substanz in hessischen Waldböden? Haben hohe Stickstoffeinträge Auswirkungen auf den Stoffhaushalt und auf die Waldernährung?	299
9.5.1	Humusformen	299
9.5.2	Stickstoffvorräte	300
9.6	Tragen Waldböden zum Klimaschutz bei? Stellen hessische Waldböden eine Senke für Kohlendioxid dar?	300
9.7	Auf welchen Standorten ist Trockenstress bei Waldbäumen zu erwarten?	301
9.8	Welche Folgerungen ergeben sich für die Energieholznutzung in hessischen Wäldern?	301
9.9	Welche Folgerungen ergeben sich aus den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung II für die hessische Standortkartierung?	302
9.10	Wer nutzt die Information der Bodenzustandserhebung (BZE als Informationsplattform)? Braucht die forstliche Umweltbeobachtung (Monitoring) eine Bodenzustandserhebung?	302
9.10.1	Informationen aus der Bodenzustandserhebung als Teil des Forstlichen Umweltmonitorings	302
9.10.2	Nationale/Internationale Partner	303
9.10.3	Gesellschaft, Politik und Verwaltung	303
9.10.4	Forstliche Betriebe verschiedener Waldbesitzarten	304
9.10.5	Wissenschaft	304
10	Qualitätssicherung (Nils König)	305
10.1	Probenvorbereitung und -analyse	305
10.2	Methodendokumentation und Qualitätssicherung in den beteiligten Laboren	393
10.2.1	Umweltlabor der Nordwestdeutschen (früher: Niedersächsischen) Forstlichen Versuchsanstalt Göttingen	393
10.2.2	Landesanstalt für Forstplanung Brandenburg, Labor Eberswalde (Frank Gutwasser)	394
10.2.3	Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL), Standort Kassel (und Vorläufer-Einrichtungen) (Rolf Ellinghaus)	394
10.2.4	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover (Levke Godbersen)	395
10.3	Bundesweites BZE II-Qualitätssicherungsprogramm	397
10.4	Bedeutung methodisch bedingter Streuungen und Fehlerquellen	403
10.4.1	Probleme der Probennahme	403
10.4.1.1	<i>Vergleichbarkeit von Beprobungen der Profilgrube und Satelliten-Bohrungen</i>	403
10.4.1.2	<i>Räumliche Variabilität chemischer und physikalischer Kenngrößen</i>	403
10.4.1.3	<i>Nullpunktdefinition</i>	414

10.4.1.4	<i>Verschleppung</i>	416
10.4.1.5	<i>Veränderung der Trockenrobdichte in oberen Bodenschichten („Soufflé-Effekt“)</i>	416
10.4.2	Probleme der Probenanalyse	416
10.4.2.1	<i>Abschätzung der Streuung chemischer Parameter durch kontinuierliches Mitmessen von Kontrollstandards</i>	416
10.4.2.2	<i>Eingeschränkte Repräsentativität von Teilproben</i>	418
11	Aspekte des BZE-Datenmanagements (Andreas Schulze, Jan Evers)	421
11.1	Anforderungen	421
11.1.1	Integration der Merkmalsgruppen	421
11.1.2	Integration der Datenbestände der Bundesländer	422
11.1.3	Integration von BZE I und II	423
11.1.4	Integration von Methodeninformationen	423
11.1.5	Externe Fachinhalte	424
11.2	Umsetzung	425
11.2.1	Identifizierung von Informations-Kategorien	426
11.2.2	Integration der Fach-Arbeitsanleitung	426
11.2.3	Projektübergreifende Listen mit projektspezifischen Kodierungen	427
11.2.4	Differenzierung von Fehlwerten	428
11.2.5	Methodendokumentation der Laboranalytik	428
11.2.6	Anwendungsprogrammierung	429
11.3	Praktische Erfahrungen	432
11.4	Fazit	434
	Literatur	437
	Glossar und Abkürzungen	449
	Danksagung	453
	Autoren	455

Vorwort

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

1966, vor 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 Ökosystemforschung in Deutschland. Aufgrund bodenkundlicher Messungen und Untersuchungen zum Stoffhaushalt lenkte Ulrich bereits 1979 den Blick auf Luftverunreinigungen als wesentliche Ursache für standörtlicher Veränderungen in Waldgebieten. Seine Arbeiten stehen für ein neues Verständnis der gegenwärtigen Wachstumsbedingungen der Wälder.

Die ersten Boden-Probennahmen im Solling erfolgten im Oktober 1966. Mit dem dafür erarbeiteten Konzept der Bodeninventuren wurde der Grundstein gelegt für die Bodenzustandserhebungen (BZE) des Bundes und der Länder wie auch für die im Jahr 2011 veröffentlichte BioSoil-Inventur auf europäischer Ebene.

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

Die Bodenzustandserhebung ist heute ein Kernelement des Forstlichen Umweltmonitorings. Sie erfasst Zustand und Veränderungen von Waldböden. Indem in Hessen auf den gleichen Beobachtungspunkten auch Informationen zu Klima und Wasserhaushalt, zur Waldernährung, zum Baumwachstum, zum Waldzustand und zur Bodenvegetation erhoben werden, ist mit der Bodenzustandserhebung eine wesentliche fachliche Grundlage zur Darstellung von Waldökosystemen entstanden.

Aufgrund der hohen Qualität der Daten und des integrativen Konzepts besteht eine große Nachfrage nach Informationen der Bodenzustandserhebung in Hessen. Die Bodenzustandserhebung wird von der forstlichen Praxis als zahlenmäßige Grundlage für eine nachhaltige Waldwirtschaft, für die forstliche Standortskunde und auch als Basis für Bodenschutzkalkungen genutzt. Wissenschaftlich werden die Daten beispielsweise als Referenz für Untersuchungen zur standortsbezogenen Leistung von Wäldern, zu standortsbezogenen Risiken der Waldentwicklung beziehungsweise als Referenz für Nährstoffmanagementsysteme herangezogen.

Die Hauptergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung in Hessen sind in den Waldzustandsberichten der NW-FVA beginnend mit dem Jahr 2010 und folgende veröffentlicht. Der vorliegende Band beinhaltet Ziele, Ergebnisse und Bewertungen im Detail. Ein besonderes Augenmerk liegt auf Folgerungen für die Verwaltungen, die forstliche Praxis und für alle am Waldboden in Hessen Interessierten.

Längst ist klar, dass sich die Waldböden in Hessen in den nur 15 Jahren seit der ersten Bodenzustandserhebung chemisch grundlegend verändert haben. Zu nennen sind etwa wesentliche Veränderungen des Versauerungszustandes, der Stickstoff- und auch der Kohlenstoffvorräte in den Waldböden. Es ist deshalb wichtig, die Bodenzustandserhebung als ein periodisch zu wiederholendes Konzept zu verstehen und in wenigen Jahren mit der BZE III fortzusetzen.

An der Erarbeitung des Bandes haben Fachleute aus Wissenschaft und Praxis aus verschiedenen Fachbereichen eng zusammengearbeitet. Zu nennen sind beispielsweise die Disziplinen Bodenkunde, Forstwissenschaft, Hydrologie, Klimatologie, Geografie, Standortkunde, Chemie, Vegetationskunde sowie Datenmanagement und IT.

Allen, die an der Erarbeitung des Bandes mitgeholfen haben, sei herzlich gedankt. Ohne die Unterstützung von HessenForst, von weiteren Waldeigentümern, des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie oder des Landeslabors Hessen wäre die Arbeit nicht möglich gewesen.

Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre des Bodenzustandsberichtes II für den Wald des Bundeslandes Hessen.



Prof. Dr. Johannes Eichhorn

Abteilungsleiter Forstliche Umweltkontrolle, NW-FVA

Waldbodenzustandsbericht für Hessen – Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)

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

Zusammenfassung

Als Bestandteil des Naturhaushalts in Wäldern spielen Waldböden aufgrund ihrer chemischen und biologischen Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften eine zentrale Rolle als Speicher- und Transformationsmedium gegenüber Umwelteinflüssen. Bodendaten sind deshalb ein zentrales Element des Umweltmonitorings. Die erste Bodenzustandserhebung (BZE I) wurde in Hessen in der Zeit von Anfang 1992 bis Anfang 1993 durchgeführt. Die Wiederholungsinventur (BZE II) fand schwerpunktmäßig in der Zeit vom 22.02.2006 bis 15.10.2008 statt. Beide Erhebungen basieren auf einem systematischen repräsentativen 8 x 8 km-Rasternetz mit 139 Aufnahmepunkten.

Bei der BZE II wurden folgende Merkmalsgruppen erfasst: Forstliche Daten und allgemeine Angaben (Punkt-, 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 Humusaufgabe), Nadel-/Blatternahrung, 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 aus 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.

Voraussetzung dafür, dass zeitliche Veränderungen ermittelt werden können, ist, dass bei Folgeinventuren grundsätzlich die gleichen Erhebungsprinzipien – hier insbesondere Erhebungsraster, Stichprobenkonzept und Methoden – angewendet werden. Bei der konzeptionellen Ausgestaltung der BZE II wurden daher möglichst viele methodische Vorgaben aus der BZE I übernommen.

Im Hinblick auf länderübergreifende Vergleiche war weiterhin von Bedeutung, unterschiedliche Definitionen der Standortselemente der Partnerländer der NW-FVA zu vereinheitlichen. Durch eine Expertengruppe, bestehend aus Bodenkundlern und erfahrenen Standortskartierern, wurde jedem der BZE-Punkte in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt 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 unterschieden. Von den 14 im hessischen BZE-Kollektiv ausgeschiedenen Substratgruppen ist Buntsandstein mit 28 % die am häufigsten vorkommende Substratgruppe in Hessen.

Die Verteilungen der Trophie- und Geländewasserhaushaltsstufe für die BZE-Punkte nach der digitalen Standortskarte Hessens sowie der Baumartenanteile für die BZE-Punkte entsprechen grundsätzlich den Verteilungen für den Gesamtwald in Hessen nach der digitalen Standortskartierung und Forsteinrichtung. Eine Trophieeinschätzung der BZE-Punkte, vor allem unter Einbeziehung der bodenchemischen Kenngrößen, führt zu einer deutlich feineren Differenzierung der Trophiestufen, als sie sich nach der digitalen Standortskarte ergibt.

Bodenchemie

Die bodenchemischen Parameter zeigen aufgrund der standörtlichen Vielfalt von basenreichen Basalt/Diabas- bis zu nährstoffarmen Granit- oder Quarzit-Standorten weite Spannen. Für die BZE II-Punkte in Hessen insgesamt ergeben sich im Mittel positive Bewertungen für die Ake (effektive Austauschkapazität; mittel-hoher Bewertungsbereich), die Basensättigung (mittel), die Calciumvorräte (hoch) und die Magnesiumvorräte (sehr hoch). Die Kaliumvorräte befinden sich im gering-mittleren Bereich. Die Böden sind überwiegend dem Austauscher-Pufferbereich, teilweise sogar dem Silikat-Pufferbereich zuzuordnen. Für die BZE II-Punkte insgesamt zeigen sich bei der Bodenchemie nur wenig Unterschiede zur BZE I.

Mit der Aufgliederung nach Substratgruppen werden Muster deutlich, die zeigen, wie die bodenchemische Situation je nach Standort variiert. So befinden sich die Böden aus Quarzit, schwach verlehmtem und unverlehmtem Sand und Buntsandstein unterhalb einer Basensättigung von 20 % und damit lediglich im geringen Bewertungsbereich.

Darüber hinaus zeigt die Einteilung nach dem Kalkungsstatus der BZE-Punkte, dass die gebildeten Kollektive sich seit der BZE I unterschiedlich entwickelt haben. Ausgeschieden wurden die Gruppen (1) „entfällt“, zu der die Substratgruppen gehören, die nicht für eine Kalkung vorgesehen sind (Kalk, Basalt/Diabas, Zechstein, Sande) und (2) die Kalkungskulisse, zu der die Substratgruppen gehören, die für eine Kalkung vorgesehen sind. Diese Kalkungskulisse beinhaltet die gekalkten Punkte (an denen vor der Probennahme der BZE II Kalkungen stattgefunden haben) und die ungekalkten Punkte (an denen bis 2007 noch keine Kalkung stattgefunden hat).

Die Auswertungen zu der Wirkung von Bodenschutzkalkungen zeigen, dass Basenverluste, vor allem infolge hoher Säureeinträge, aber auch durch Sulfatausträge, Biomassenentzug und verringerte basische Einträge aus der Luft, durch die Kalkung kompensiert werden. Auf den gekalkten Standorten zeigt sich eine Verbesserung der durchschnittlichen Basensättigung. Positive Effekte der Waldkalkung zeigen sich insbesondere für den Buntsandstein mit deutlichen Verbesserungen der Basensättigung bis in 60 cm Mineralbodentiefe. Die Bodenschutzkalkung hat einen langfristig positiven Einfluss auf den chemischen Bodenzustand und auf die Sicherung und Erhaltung des Nährstoffhaushalts. Die Ergebnisse der BZE II zeigen außerdem deutliche Risiken für schwach nährstoffversorgte Standorte auf, die bislang nicht gekalkt wurden. Diese Waldböden in Hessen verarmen weiter; über alle Tiefenstufen hat die Basensättigung zwischen der BZE I und BZE II deutlich abgenommen. Innerhalb von nur 15 Jahren sind deutliche Calcium- und Magnesiumverluste auf diesen Standorten festzustellen.

Obwohl hessische Wälder ein weites Spektrum an Standorten von reich bis arm abdecken und beim Basenhaushalt eine ungünstige Entwicklung auf nicht gekalkten Standorten der Kalkungskulisse nachzuweisen ist, zeigt sich für den morphologisch ansprechbaren Humuszustand und die bodenbiologische Aktivität ein eher günstiges Bild.

Hessische Waldböden stellen eine wichtige Kohlenstoffsенke dar. Die mit durchschnittlich ca. 80 t pro Hektar gespeicherten Kohlenstoffvorräte in Hessens Waldböden zeugen von dieser langfristigen Nettospeicherung. Im Zeitraum 1992 (BZE I) bis 2007 (BZE II) haben die Kohlenstoffvorräte in hessischen Waldböden insgesamt moderat zugenommen (10 %). Die Ergebnisse geben Hinweise auf einen positiven Einfluss der Kalkung auf den Kohlenstoffhaushalt: Zwar wird durch die Waldkalkung der Kohlenstoffvorratsabbau im Auflagehumus deutlich angeregt, insgesamt werden jedoch diese Kohlenstoffverluste über einen Vorratsaufbau im Mineralbodenhumus im Oberboden mehr als kompensiert. Die Kalkung könnte

somit die Senkenfunktion für Kohlenstoff der hessischen Waldböden verbessert haben.

Bei einem luftgetragenen Eintrag an anorganischem Stickstoff von ca. 16 kg pro Hektar und Jahr (Buche) bzw. ca. 25 kg pro Hektar und Jahr (Fichte) in der Zeit von 1992-2007 haben sich die Stickstoffvorräte auf Profilebene im gleichen Zeitraum insgesamt tendenziell verringert. Die Stoffbilanzierungsergebnisse geben Hinweise, dass in den meisten hessischen Waldökosystemen eine erhöhte Stickstoffaufnahme durch die oberirdische Biomasse stattgefunden hat und Lachgasemissionen (N_2O) aus den Waldböden wahrscheinlich sind.

Waldernährung

Hauptbaumart in Hessen ist die Buche, sie nimmt 31 % der Waldfläche ein. Bei der Buche sind bei der BZE II-Stichprobe besonders häufig Ernährungsdefizite festgestellt worden. Ein Großteil der Buchenbestände weist substratübergreifend einen latenten Phosphormangel auf. Zusätzlich besteht eine angespannte Schwefelernährungssituation und an einem Drittel der BZE II-Buchenpunkte ist die Versorgung mit Kalium und/oder Magnesium unzureichend. Die Stickstoff-Quotienten zeigen, dass disharmonische Elementverhältnisse weit verbreitet sind. Hinzu kommt, dass die Auswertung der Intensivmonitoringflächen für die Buche eine Abnahme aller Hauptnährelemente (Ausnahme: Stickstoff) ergibt.

Für die Fichte, Kiefer und Eiche ist die Ernährungssituation wesentlich entspannter. 33 % der Fichten, 36 % der Kiefern und 41 % der Eichen an BZE II-Punkten sind ohne (latenten) Mangel an Hauptnährelementen und weisen harmonische Stickstoff-Quotienten auf.

Der Vergleich gekalkter und ungekalkter BZE II-Punkte zeigt eine verbesserte Ernährungssituation durch die Bodenschutzkalkung für Calcium (Eiche), Magnesium (Buche und Eiche) sowie Phosphor (Kiefer). Die Schwefelgehalte in Buchenblättern und die Eisengehalte in Fichtennadeln sind dagegen an den gekalkten BZE II-Punkten geringer als an den ungekalkten.

Die hohen Stickstoffgehalte in den Nadeln und Blättern aller vier Hauptbaumarten auf allen Substraten zeigen den 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 ($pH(H_2O)$), der 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 (0-5 cm Bodentiefe). Auf der Grundlage dieser Ergebnisse konnten

Zeigerarten identifiziert werden, die operationale Hilfestellungen für die Trophieabschätzung hessischer Waldstandorte 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, Waldkalkung, Substratgruppen, Waldernährung, Waldvegetation, Kohlenstoff

Abstract

The chemical and biological filter and buffer capacity of forest soils, as well as their role as a medium for the turnover of nutrients, mean that forest soils are vital in reducing the impact of environmental influences. Soil data are, therefore, a central element in environmental monitoring. The first National Forest Soil Inventory (BZE I) in Hesse was carried out in the period from the beginning of 1992 to early 1993. The second National Forest Soil Inventory (BZE II) followed between 22.06.2006 and 15.10.2008. Both inventories were based on a systematic, representative 8 x 8 km raster net with 139 sampling plots.

For the BZE II the following groups of characteristics were recorded: Forestry data and general information (plot data, spatial data, data on the survey situation and information on soil changing events), soil data (separate for humus layer and mineral soil: profile description, soil chemistry, including heavy metals and organics, as well as soil physical properties), foliar nutrient status, stand data, vitality (forest condition survey), and forest floor vegetation. The inventory and sample collection followed the methods described in the national field survey guide for the BZE II (WELLBROCK et al. 2006). The extensive data management was aimed at ensuring the easy integration of the basic information categories (e.g. stand data, soil data, forest floor vegetation, analytical data, temporal aspects such as BZE I vs. BZE II, inter-state considerations, documentation of the sampling and analytical methods) and in the implementation of central, standardised and universal processing and evaluation functions.

In order to be able to determine temporal changes, the repeat inventory has to follow the same basic monitoring principles – especially the same sampling raster,

sampling design and methods should be used. In designing the BZE II, therefore, as many of the methodical specifications as possible were adopted from the BZE I.

With a view to being able to compare results between federal states it was also important to standardise the different site element definitions of the NW-FVA partner states. Through a panel of experts, consisting of soil scientists and experienced site cartographers, each of the BZE plots in Lower Saxony, Hesse and Saxony-Anhalt 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 (bedrock), stratification (substrate stratification), soil texture, soil morphology and soil physical properties. The substrate groups can be viewed as operational regionalising units, i.e. using the results for the substrate groups the findings can be transferred to the site maps and applied to the larger area. In all, 16 substrate groups were distinguished. From the 14 BZE substrate groups that apply in Hesse red sandstone, with 28 %, occurs most frequently.

According to site maps and information from forestry institutions the range of the trophic levels, site water-regime categories and tree species proportions of the BZE-plots corresponds to the range in the Hessian forests as a whole. An estimation of the trophic levels at the BZE-plots, especially when taking soil chemical properties into account, leads to a clear improvement in differentiation of the trophic levels compared to results from digital site maps.

Soil chemistry

Because of the diversity of sites, ranging from basalt/diabas sites rich in nutrients to nutrient poor granite or quartzite sites, soil chemical parameters display a wide range of values. On average across the BZE II plots in Hesse the effective cation exchange capacity (medium to high value range), the base saturation (medium), the calcium stock (high), and the magnesium stock (very high) can be assessed positively. Potassium stocks are, however, in the medium to low range. The soils are predominantly in the exchange-buffer range, in some instances even in the silicate-buffer range. The soil chemistry results from the BZE II-plots show, on the whole, little difference to the BZE I.

With the classification according to substrate groups clear patterns are recognisable, that show how the soil chemistry varies by site. For instance, soils on quartzite, sand, slightly loamy sand and red sandstone have a base saturation of under 20 %, a very low value.

Beyond that, a classification of the BZE-plots into categories according to liming status shows that limed and non-limed sites have developed differently since the BZE I. Two categories were differentiated: (1) "omitted", to which those substrate groups belong, which are not designated to be limed (limestone, basalt/diabas, zechein, sands) and (2) substrate groups that are scheduled to be limed. The latter category contains the limed plots (which had already been limed prior to the BZE II) and the not yet limed plots (where up to 2007 liming had not yet occurred).

An assessment of the effectiveness of soil liming shows that the loss of bases (primarily as a result of high acid input but also through sulfate outputs, biomass removal and reduced atmospheric input of bases) is compensated by liming. There is an improvement in the average base saturation at the limed sites. The positive effects of liming are especially clear at red sandstone sites, where there are clear improvements in the base saturation at up to 60 cm soil depth. The soil liming has had a long term positive influence on the soil chemical status and on securing and maintaining the nutrient balance. The results of the BZE II also show clear risks for those sites with low nutrient supply which have, to date, not been limed. This category of forest soils in Hesse is still degrading. Between the BZE I and BZE II, the base saturation has deteriorated clearly over all depth ranges. Within a 15 year period marked calcium and magnesium losses have been determined at these sites.

Hessian forests cover a wide spectrum of site types, from nutrient rich to very poor. Although those soils on sites which have been designated for liming but where liming has not yet been carried out are developing unfavourably, humus forms and soil biological activity developed more positively.

The forest soils in Hesse are an important carbon sink. An average of ca. 80 t per hectare stored carbon attests to a long term net carbon storage. In the period between 1992 (BZE I) and 2007 (BZE II) the carbon stocks in the Hessian forest soils showed a moderate (10 %) increase. The results indicate that liming has a positive influence on the carbon balance. Although liming clearly increases the decomposition of carbon stocks in the forest floor, these losses are overcompensated by increased carbon storage in the upper mineral soil. Liming has probably improved the carbon sink function of the Hessian forest soils.

Despite an atmospheric inorganic nitrogen input in the period 1992-2007 of ca. 16 kg per hectare and year (beech) or ca. 25 kg per hectare and year (spruce), the nitrogen stock in the soil profile showed a trend towards reduction in that period. The results of a nutrient balance suggest that in most Hessian forest ecosystems there was an increase in the take-up of nitrogen by the above-ground biomass and that the forest soil is probably a nitrous oxide (N₂O) emitter.

Forest nutrition

The main tree species in Hesse is beech which covers 31 % of the forest area. In the BZE II foliar nutrient deficiency was frequently established for beech. A large proportion of the beech stands exhibits, regardless of substrate, a latent phosphorus deficiency. In addition, the foliar sulphur nutrition is critical and for a third of the BZE II-beech plots the supply of potassium and/or magnesium is insufficient. The nitrogen quotients indicate that unfavourable element ratios are widespread. An evaluation of the intensive monitoring plots for beech reveals a reduction of all the main nutrients, with the exception of nitrogen.

The foliar nutrition for spruce, pine and oak is much more balanced. 33 % of spruce, 36 % of pine and 41 % of oak at BZE II-plots are without (latent) deficiency of the main nutrients and have favourable nitrogen quotients.

The comparison of limed and non-limed BZE II-plots shows, that liming improves the foliar nutrition with respect to calcium (oak), magnesium (beech and oak) and phosphorus (pine). The sulphur content of beech leaves and the iron content in spruce needles are, in contrast, lower at the limed BZE II-plots than at the un-limed plots.

The high nitrogen content in the needles and leaves of all four main tree species and on all substrates shows the influence of anthropogenic atmospheric nitrogen input in the forests.

Forest floor vegetation

A direct comparison of the BZE II vegetation data with the sampled soil chemical parameters enables an analysis of the relationship between plant species composition and the soil chemical status in the upper mineral soil layer (0-5 cm). Thus, the effect of the soil status (pH(H₂O)), base saturation and the C/N ratio, as well as the exchangeable stocks of the base cations calcium, magnesium and potassium from the effective cation exchange capacity on the forest floor vegetation can be analysed. On the basis of these results indicator species have been identified which will help in the estimation of the trophic status of forest sites in Hesse.

Site mapping

Soil chemical analyses are especially important for a differentiated site diagnostic. They can make the nutrient estimation in forest site mapping more precise and thus enable a better estimation of the potential of individual forest sites. In this way the planning of forestry measures (e.g. choice of tree species, liming and whole tree harvest) can be better aligned with the site potential and thus be more sustainable.

The topics heavy metals, organics and stand growth will be published separately.

Keywords: Forest Soil Inventory, forest soil liming, substrate groups, forest nutrition, forest floor vegetation, carbon sequestration

1 Überblick: Bewertung und Diskussion der bodenkundlichen Ergebnisse

Uwe Paar, Jan Evers

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).

Hinsichtlich der Veränderungen von Waldböden ist allgemein festzuhalten, dass durch die Bildung von Kohlensäure und organischen Säuren die Böden in Mitteleuropa „von Natur aus“ zur allmählichen Versauerung neigen. Neben dieser natürlichen Entwicklung hat eine sehr rasche Aufeinanderfolge von gravierenden anthropogenen Faktoren erhebliche Einflüsse auf die Waldböden, die weit über die natürliche Versauerung hinausgehen.

1.1.1 Ländlicher Versorgungswald und Waldboden

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. Im Einzelnen kompensierte die Waldweide die nur knappe 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 (HMLWLFN 1994, STUBER u. BÜRGI 2011).

Waldgüter sicherten die Ernährung der Viehbestände in der Übergangszeit vom Winter zum Frühling, wenn der Heuvorrat aufgebraucht und das Gras noch nicht ausgetrieben war (IRNIGER 1993). Die historische Bedeutung der landwirtschaftlichen Nutzungen im ländlichen Versorgungswald kann kaum überschätzt werden.

Gleichwohl entstanden durch diese Waldinanspruchnahme Veränderungen der Standorte und des Stoffhaushalts, die teilweise bis heute nachwirken. Über langjährige Nutzungen der Waldstreu wurden beispielsweise bis zu 2.000 kg N/ha (KREUTZER 1972) entnommen. Derartige Eingriffe lassen sich bis heute in Stickstoffbilanzen nachweisen. Schäden durch Weide im Wald bewirkten für forstliche Böden und Standorte oft lang anhaltende Bodenverdichtungen und Erosionen mit Spätfolgen für den Jungwuchs und den Baumzuwachs (GROSSMANN 1927).

Die große Zahl devastierter Standorte führte nach 1800 zu einem Umdenken in der Landnutzung. An die Stelle von übernutzten und verarmten Standorten des bäuerlichen Versorgungswaldes trat erfolgreich eine systematische Aufforstung und Bewirtschaftung (HMLWLFN 1994). So entstanden große Nadelwälder. Diese Entwicklung wurde durch die forstliche Reinertragslehre und den steigenden Holzbedarf infolge der Industrialisierung und des Bevölkerungswachstums unterstützt. Die neue Waldstruktur veränderte und verbesserte vielerorts die forstlichen Standortseigenschaften des ländlichen Versorgungswaldes. Mit großflächig reinen Nadelbeständen in Altersklassenwäldern entstand ein neuer Waldaufbau, aber auch eine neue Qualität von Risiken. Zu den Risiken zählen insbesondere eine langsame Zersetzung von Nadelstreu, Insektenbefall, Stürme und Bodenfreilagen mit entsprechenden Folgen für Humus, Mineralboden und Standort.

1.1.2 Säureeintrag und Waldboden

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 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 zu Gunsten besserer Luftqualität statt. Die Genfer Luftreinhaltekonvention der Vereinten Nationen UNECE (1979) und die Großfeuerungsanlagen-Verordnung (BIMSCHV 2013) bewirkten den drastischen Rückgang der SO₂-Emissionen. Ein verändertes waldbauliches Grundverständnis im Sinne eines an natürliche Prozesse angenäherten Waldbaus (RÖDIG 2000) in Verbindung mit Bodenschutzkalkungen half den hessischen Wäldern in einer Zeit hoher Säureein-

träge. 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 Minimumfaktor 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. 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

Messdaten hessischer Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für den Zeitraum 1984-2014 zeigen seit 1988 eine gegenüber der Referenzperiode (1961-1990) erhöhte Temperatur. In der Vegetationszeit (Mai bis September) wurde seit 1988 in 25 von 27 Jahren der Durchschnittswert überschritten, in der Nichtvegetationszeit (Oktober bis April) war dies in 24 von 27 Jahren der Fall. Mit deutlichen Abweichungen vom langjährigen Mittel waren die Vegetationsperioden 1992, 1994, 1999, 2003 und 2006 und die Nichtvegetationszeit 2006/2007 die wärmsten. Klimaprojektionen gehen davon aus, dass dieser Trend anhält.

Bei den im Zeitraum 1984-2014 gemessenen Niederschlagswerten bestehen zwischen den einzelnen Jahren zum Teil starke Schwankungen. Bei den über diesem Zeitraum gemessenen Niederschlagswerten in der Vegetationszeit wird keine klare Tendenz deutlich. Allerdings war die Niederschlagsmenge in den letzten 12 Wintern geringer als im langjährigen Mittel. Besonders niederschlagsreich war die Vegetationsperiode 2007, besonders trocken war die Nichtvegetationsperiode 1996/1997.

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. Obwohl die allgemeinen klimatischen Bedingungen der vergangenen Jahrzehnte in Hessen als ausreichend feucht angesehen werden können, trat infolge seltener, extremer Trockenjahre das Wasserangebot als limitierender Faktor für den Zuwachs der Bäume in Erscheinung. Der prognostizierte Klimawandel lässt aus heutiger Sicht für Hessen sowohl eine Zunahme der Lufttemperatur als auch eine Verringerung der Niederschläge während der Vegetationsperiode erwarten, was in Kombination

einen deutlichen Anstieg des Risikos einer unzureichenden Wasserversorgung und eines veränderten Stoffhaushaltes der Waldökosysteme erwarten lässt.

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.

1.2 Repräsentativität der Bodenzustandserhebungen

Die Bodenzustandserhebung ist wie die Waldzustandserhebung (WZE) ein Stichprobenverfahren, das die gesamte Waldfläche des Landes Hessen umfasst. Daneben bestehen mit der Forsteinrichtung und der Forstlichen Standortskunde Inventurverfahren, die Befunde für nahezu sämtliche Flächeneinheiten des Waldes in Hessen beschreiben. Aus dem Vergleich der Ergebnisse der Stichproben mit den Befunden der Vollerhebungen kann auf die Genauigkeit der Stichproben geschlossen werden.

Vergleicht man die Verteilung der aktuellen Trophiestufen für die BZE-Punkte entsprechend der Standortkartierung mit dem flächenhaften Vorkommen der Trophiestufen, so dokumentieren die Ergebnisse eine bemerkenswert hohe Übereinstimmung und damit eine gute Repräsentativität des BZE-Rasternetzes. Nahezu ähnlich positiv sind die Befunde zur Repräsentativität des Geländewasserhaushalts im BZE-Kollektiv. Eine Übertragbarkeit der BZE-Ergebnisse auf die hessische Gesamtwaldfläche ist daher grundsätzlich möglich.

Es hat sich aber auch gezeigt, dass die Einbeziehung der Bodenchemie zu einer deutlich feineren Differenzierung der Trophiestufen an den BZE-Punkten führt und damit die forstlichen Standorte präziser einordnet.

Mit dem Stichprobennetz wird eine Vielfalt von unterschiedlichen Standorten erfasst. Am aussagekräftigsten sind die Ergebnisse für die am häufigsten in Hessen vertretenen Substratgruppen Buntsandstein, Lösslehm, Basalt/Diabas und Ton-schiefer.

Da auf den hessischen BZE-Flächen auch die jährlichen Waldzustandserhebungen durchgeführt werden, sind repräsentative Analysen auch zur Baumartenzusammensetzung von Jahr zu Jahr möglich: Die Ergebnisse zur Baumartenverteilung im WZE-Kollektiv belegen für den Zeitraum 1984-2014 eine relative Zunahme des Buchenanteils von 28 % auf 40 % sowie eine Abnahme des Fichtenanteils von 31 % auf 20 % und somit eine gravierende Veränderung der Hauptbaumartenanteile im hessischen Wald. Diese veränderte Baumartenzusammensetzung ist hinsichtlich der Integration der Ergebnisse zur Entwicklung des Depositionsgeschehens, der Streuzersetzung und der Bioturbation von Waldböden zu berücksichtigen.

1.3 Geologie, Boden und Bodenentwicklung

Die historische Entwicklung der Landnutzung zeigt, dass bessere Böden eher landwirtschaftlich und ärmere Böden waldwirtschaftlich genutzt werden. Dies spiegelt sich in den Befunden der BZE: Mit Ausnahme der Basaltbereiche, der wenigen Diabas- und Kalkgebiete und einiger nur kleinräumig und selten vorkommender Standorte (Hochflutlehm, Oberer Buntsandstein, Schalstein, Zechstein, Ton, Diorit, Gabbro, Melaphyr) stockt der Wald in Hessen auf Böden, deren geologische Ausgangsgesteine im Bereich der eher mittleren bzw. schwachen Nährstoffversorgung einzuordnen sind. Hierzu zählen Buntsandstein, Lösslehm, Tonschiefer, i. d. R. die unverlehmten, schwach verlehmten und verlehmten Sande, Grauwacke, Quarzit und Granit.

Für die Oberbodenbildung in Hessen sind durchweg geologische Prozesse, die vornehmlich im Quartär (die letzten 2,6 Mio. Jahre) stattfanden, verantwortlich. So stehen die von den Flüssen sedimentierten Auen- und Hochflutablagerungen, die durch Wind (äolisch) abgelagerten Flugsande und -stäube (Löss, Sandlöss, Flugsand), die vulkanischen Aschen wie die Laacher-See-Tephra und die durch Frostverwitterung entstandenen Schuttdecken (Soliflukationsdecken, Lagen) im Vordergrund. Sie können als metermächtige, quasi homogene Sedimente oder als Gesteinsgemische, wie die vor allem in den Mittelgebirgen verbreiteten Schuttdecken, in denen sich Beimischungen von z. B. Löss oder Laacher-See-Tephra zumindest noch mineralogisch nachweisen lassen, vorliegen (SABEL 2005).

Für Hessen sind drei Schuttphasen zu unterscheiden. Als ältester Schutt liegt basal ein Gesteinsschutt, der keine äolischen Komponenten hat. Wahrscheinlich gab es zur Zeit der Bildung dieser „Basislage“ keine größeren Staubstürme. Es folgte darüber ein markant lössreicher Schutt, der als „Mittellage“ bezeichnet wird, er ist wegen des Lössanteils sehr abtragungsgefährdet und daher nur noch in geschützten Reliefpositionen erhalten. Die jüngste Schuttbildungsphase erfolgte ganz am Ende der letzten Kaltzeit, deren Weiterentwicklung durch die Wiedererwärmung und das Aufkommen einer dichten Vegetation gestoppt wurde. Wenn kein Abtrag erfolgte, ist diese Schuttdecke als „Hauptlage“ praktisch überall verbreitet (SABEL 2005).

1.4 Substratgruppen

Durch eine Expertengruppe, bestehend aus Bodenkundlern und erfahrenen Standortskartierern, erfolgte für sämtliche 388 BZE-Punkte der Länder Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt eine Zuweisung von Substratgruppen. Die Gruppierung der Waldböden (Substratgruppen) erfolgte nach den Merkmalen Ausgangssubstrat (Ausgangsgestein), Lagerung (Substrat-Lagerung), Bodenart, Bodenmorphologie und Bodenphysik. Dabei prägt das Ausgangsgestein der Bodenbildung die Substratgruppen wesentlich. Die Substratgruppen ermöglichen länderübergreifende Auswertungen. Darüber hinaus können die länderspezifischen Standorteinheiten den generierten Substratgruppen gut zugeordnet werden, sodass eine

operationale Übertragung der Übersichtsergebnisse auf die Fläche gewährleistet ist bzw. erfolgen kann.

In Hessen kommen an 139 BZE-Punkten insgesamt 14 Substratgruppen vor. Für 39 BZE-Punkte (28 %) wurde die Substratgruppe Buntsandstein ausgewiesen. Buntsandstein ist für den Wald in Hessen das häufigste Ausgangsgestein. 20 BZE-Punkte (14 %) wurden als Lösslehm-Standorte identifiziert. Ebenfalls 14 % werden standörtlich von Basalt- und Diabasvorkommen bestimmt. Auf weiteren 16 BZE-Punkten (12 %) findet sich Tonschiefer. Grauwacken-Standorte und Ton(stein)-Standorte kommen jeweils mit einem Anteil von 5 % vor. Das Vorkommen von Sand-Standorten verteilt sich auf acht BZE-Punkte (6 %) mit unverlehmten Sanden, fünf (4 %) mit schwach verlehmten Sanden und einem verlehmtten Sand. Die Substratgruppen Granit, Zechstein/Rotliegendes, Quarzit, Lehm und Kalk sind mit Anteilen von 1-3 % vertreten.

1.5 Substrat-Lagerungstypen

Der Begriff „Substrat-Lagerung“ umfasst die Angaben zur Bodenart (wie Sand, Schluff oder Ton) und den Lagerungsverhältnissen. An ca. 40 % der BZE-Profile findet man bis zu 70 cm mächtige lehmige, schluffige, sandige Decken (Löss-Lehmdecken) über basenarmem Silikatgestein. Auf ca. 12 % der hessischen BZE-Standorte zeigen sich bis zu 70 cm mächtige, feinkbodenreiche Decken über basenreichem Grundgestein (z. B. Basalt, Diabas, Gabbro etc.). Der dritthäufigste Substrat-Lagerungstyp (8 %) ist charakterisiert durch das Vorkommen von sandig-lehmigen Fließerden (30-70 cm) über Ton, auch Bröckeltone. Ebenfalls ca. 8 % der hessischen BZE-Standorte zeigen über 70 cm mächtige Lösslehmdecken über basenarmem Silikatgestein. Zu etwa 6 % sind Standorte mit Lösslehm und verlehmten Fließerden (> 70 cm Mächtigkeit) über Kalk und basenreichem Untergrund vertreten. Ebenfalls knapp 6 % der hessischen BZE-Punkte sind als stark skeletthaltige Böden mit höchstens 40 cm Deckschicht über basenreichem Grundstein einzustufen. Somit können ca. 80 % der hessischen BZE-Standorte durch insgesamt sechs Substrat-Lagerungstypen beschrieben werden.

1.6 Bodentypen

Auf den hessischen Waldstandorten treten vor allem drei Bodentypen auf. 50 % der BZE-Standorte sind durch den Bodentyp Braunerde gekennzeichnet. Auf 31 % sind Parabraunerden zu finden und für 10 % der BZE-Punkte wurde der Bodentyp Pseudogley ausgewiesen. Diese Hauptbodentypen kommen somit insgesamt auf 91 % der hessischen BZE-Punkte vor. Auf den restlichen BZE-Standorten finden sich Gleye, Fahlerden, Kolluvisole, Pararendzinen, Podsole, Ranker, Regosole, Stagnogleye und Terra-Fusca mit Flächenanteilen von jeweils 1-2 %.

1.7 Trockenrohdichten und Skelettanteile

Hinsichtlich bodenphysikalischer Eigenschaften sind Steingehalte (Grobboden) vom Feinboden zu unterscheiden. Insbesondere durch geologische Phasen bedingt, unterscheidet sich die Dichte verschiedener Bodenschichten. Der Unterboden weist in der Regel höhere Trockenrohdichten als der Oberboden auf. Im Vergleich der Substrate finden sich sehr geringe Trockenrohdichten auf Grauwacke-Standorten mit Werten von $0,72 \text{ g/cm}^3$ in 0-5 cm bis $1,25 \text{ g/cm}^3$ in 60-90 cm Bodentiefe. Wesentlich höhere Trockenrohdichten finden sich auf Standorten des Buntsandsteins mit $1,0-1,6 \text{ g/cm}^3$ wie auch bei den schwach verlehmtten Sanden.

Die Profile der Substratgruppe Grauwacke weisen die höchsten Grobbodenanteile (Steingehalte) zwischen 17 % in 0-5 cm und 64 % in 60-90 cm Bodentiefe auf. Es folgen die Substratgruppen Tonschiefer und Basalt/Diabas mit um ca. 10-15 %-Punkten geringeren Grobbodenanteilen.

1.8 Austauschkapazität

Die Fähigkeit von Mineralböden und Humus zum Austausch von Kationen bestimmt wesentlich die Puffereigenschaften, die mittelfristige Speicherung der Nährstoffkationen Calcium, Magnesium und Kalium, aber auch der sauren Kationen Mangan, Protonen, Aluminium und Eisen. Insgesamt liegt die Austauschkapazität in den Waldböden Hessens im Mittel aller BZE II-Punkte mit rund $740 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ im mittel-hohen Bereich. Damit haben die Waldböden in Hessen – bedingt durch die im Mittelgebirge vorherrschenden Böden – im Vergleich der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt die höchsten mittleren Austauschkapazitäten.

Der Anteil günstiger Humusformen und vor allem der Anteil organischer Substanz sind für den Kationenaustausch wichtig. Mit $16 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ trägt der Auflagehumus bedingt durch seine in der Regel geringe Mächtigkeit durchschnittlich nur zu etwa 2 % der gesamten Austauschkapazität bis 90 cm Bodentiefe bei. Die höchste Austauschkapazität (bezogen auf jeweils 5 cm Bodenschicht) mit $50 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ findet sich aufgrund hoher Humusgehalte in den oberen 5 cm des Mineralbodens und in den unteren Bodenschichten zwischen 60-90 cm, hier aufgrund hoher Tonanteile.

Die mittlere Austauschkapazität in hessischen Waldböden ist relativ hoch, doch ist der Mittelwert vor dem Hintergrund der weiten Spanne der vorkommenden Substrate nicht sehr aussagekräftig. Die signifikante (leichte) Zunahme zwischen der BZE I und BZE II ist für den oberen Mineralboden durch die Waldkalkung gut erklärbar. Die Waldkalkung führt zudem zu einer Zunahme der organischen Substanz mit ihrer variablen Ladung im Mineralboden.

Der Einfluss der Waldkalkung auf die Austauschkapazität reicht bis in 30 cm Bodentiefe. Damit werden die Ergebnisse aus Kalkungsversuchen durch die BZE in Hessen bestätigt. Gleichzeitig belegen die Ergebnisse, dass mit dem Verfahren der

BZE trotz standörtlicher Variabilitäten landesweit Bodenzustände abbildbar sind und sich räumliche und zeitliche Veränderungen nachweisen lassen. Dies gilt insbesondere unter Berücksichtigung der Stratifizierungsmerkmale Substrat und Kalkung.

1.9 Status und Veränderung der Bodenversauerung

Durch die Bildung von Kohlensäure und organischen Säuren (Huminsäuren) neigen die Böden in Mitteleuropa zur allmählichen Versauerung. Dazu kommen anthropogene Säureeinträge, deren Säurewirkung seit Jahrzehnten die ökosysteminterne Versauerung übersteigt (SCHELER 2015 mdl. Mittl., HOCKE 1995). Der Eintrag stärkerer Säuren, insbesondere der Schwefelsäureeintrag bewirkt hauptsächlich die Versauerung unter $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 5. Der Eintrag von starken Säuren sowie säurewirksame Stickstoffeinträge haben daher in vielen Waldökosystemen zu gravierenden chemischen Veränderungen geführt (ULRICH 1981, ULRICH 1986). Trotz der erheblichen Verringerung der Säureeinträge seit Mitte der 1980er-Jahre liegt die Gesamtsäuredeposition bis heute über dem natürlichen Puffervermögen der meisten nährstoffarmen hessischen Waldböden.

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

1.9.1 Kationen-Anteile an der Ake

Die Besetzung der Austauschplätze durch unterschiedliche Kationen steuert den Versauerungszustand von Waldböden und die Ernährungsbedingungen für die Waldbäume am Standort. Häufigstes basisch wirkendes Kation ist Calcium mit 12-26 % an der Austauschkapazität. Deutlich niedriger liegen die Anteile von Magnesium mit Anteilen zwischen 7-15 % sowie Kalium und Natrium mit Anteilen bis zu 3 %. Aluminium ist in hessischen Waldböden in jeder Bodentiefe das bestimmende Kation mit Anteilen zwischen 43-69 %. Protonen belegen Anteile zwischen 2-11 %. Die Kationenbelegung hessischer Waldböden wird demnach von sauer wirkenden Kationen, vor allem wurzeltoxischem Aluminium dominiert.

1.9.2 Basensättigung

Die Basensättigung gibt den prozentualen Anteil der basischen Kationen (Mb) bezogen auf die effektive Kationenaustauschkapazität an. Sie ist damit eine der wichtigsten Kenngrößen für die Versauerung von Waldböden. Ihre Veränderung kann Folgen der Bodenversauerung anzeigen.

In Hessen wird das Gesamtkollektiv der BZE nach gekalkt, ungekalkt und entfällt unterschieden. Die zu kalkenden Standorte (kalkungsempfohlene Substrate)

werden auch als Kalkungskulisse bezeichnet. Hierzu zählen die Substratgruppen Buntsandstein, Grauwacke, Tonschiefer, Quarzit etc., also Böden aus saurem Ausgangsgestein, die vor allem im Hauptwurzelraum stark versauert sind. Die als entfällt bezeichneten Substratgruppen umfassen insbesondere die nicht als kalkungsnotwendig bewerteten Standorte Basalt, Diabas, Zechstein, Kalk sowie Sand. Bis auf den Sand sind dies also die besonders nährstoffreichen Substratgruppen.

Die Gruppe der kalkungsempfohlenen, aber bislang noch ungekalkten Standorte kann am ehesten zur Beantwortung der Frage herangezogen werden, ob die Säureinträge auch heute noch das Puffervermögen von Waldstandorten überfordern. Tatsächlich sind in dieser Gruppe die Waldböden zwischen BZE I und BZE II (1992 und 2007) weiter versauert, über alle Tiefenstufen hat die Basensättigung zwischen BZE I und BZE II deutlich abgenommen. Die weiteren Basenabnahmen sind allerdings aufgrund Variabilität und Stichprobengröße nur für Buntsandstein (Tiefe: 5-60 cm) signifikant. Im ungekalkten Kollektiv erreicht die Basensättigung über alle Böden für die Tiefenstufen 5-10 cm und 10-30 cm mit Werten von unter 15 % einen kritischen Bereich.

Für den ungekalkten Buntsandstein wurde im Mineralboden bis 90 cm Tiefe nahezu durchgängig eine Basensättigung unter 20 % festgestellt, in den Tiefen 5-60 cm wird annäherungsweise sogar die Stufe sehr gering (< 7 %) erreicht.

Auch für Grauwacke-Standorte in Hessen gilt, dass die Tiefenstufen 5-60 cm bei der BZE II durchgängig unter 20 % Basensättigung liegen. Auch hier ist zwischen den beiden Bodenzustandserhebungen die Tendenz einer weiteren Abnahme der Basensättigung festzustellen.

Ungünstige bis sehr kritische Werte weisen auch die unverlehmten Sande mit rund 15 % durchschnittlicher Basensättigung sowie die Quarzite und Granite mit durchschnittlich 8 % bzw. 9 % bis 90 cm Bodentiefe auf.

Bodenchemisch abgeleitet und in Versuchen nachgewiesen, tritt unter einer Basensättigung von etwa 20 % Aluminium als dominierendes Kation in der Bodenlösung auf und wirkt auf Waldökosysteme destabilisierend. Zugleich weisen diese Böden nur noch sehr geringe Anteile an den wichtigen Nährstoffen Calcium und Magnesium auf. 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 (WENZEL u. ULRICH 1988).

Nach dem derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand und den Grundsätzen einer verantwortungsbewussten, ökologischen und nachhaltigen Waldbewirtschaftung ist eine Kompensationskalkung auf den 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 (HESSEN-FORST 2014).

1.9.3 Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorrat

Zur umfassenden ökologischen Bewertung chemischer Kenndaten 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.

Geringe Calciumvorräte bestehen bei Standorten mit Quarzit und unverlehmtem Sand. Besonders niedrige Magnesium-Vorräte sind für Standorte mit unverlehmtem Sand festzustellen. Schwach (gering) mit Kalium versorgt sind Kalk, unverlehmter Sand, schwach verlehmter Sand, sandiger Buntsandstein sowie Grauwacke und Tonschiefer. Hohe Vorräte an basischen Kationen finden sich dagegen beim Kalk, Basalt/Diabas, Ton(stein) und Lösslehm.

Zwischen der BZE I und der BZE II haben die Calciumvorräte auf den für eine Bodenschutzkalkung vorgesehenen, aber noch ungekalkten BZE-Punkten bis 60 cm Bodentiefe deutlich abgenommen, bei den gekalkten BZE-Punkten jedoch leicht zugenommen. Besonders hoch waren die Abnahmen von Calcium in der Substratgruppe des ungekalkten Buntsandsteins. Ähnliche Tendenzen zeigen sich bei Magnesium. Die Ergebnisse belegen eine weitere Calcium- und Magnesiumverarmung der ungekalkten Standorte im Mineralboden bis 60 cm Bodentiefe innerhalb von nur 15 Jahren. Die Kaliumvorräte haben sich dagegen auf den ungekalkten sowie gekalkten Standorten wenig verändert, insgesamt gab es leichte Zunahmen im Unterboden.

1.9.4 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 H_3O^+ -Ionen in der Bodenlösung und somit für den Versauerungszustand der Böden. Die in wässrigen Bodensuspensionen gemessenen $pH(H_2O)$ -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 Säure-

einträgen und geben eine Zuordnung zu Resilienzeigenschaften und zur Ernährungssituation von Waldböden. Eine wesentliche Grenze stellt der Übergang vom Austauscherpufferbereich zum wurzeltoxischen Aluminium-Pufferbereich dar. Im Aluminium-Pufferbereich verändern sich die Nährstoffbedingungen, ihre Wechselwirkungen und damit auch die Bodeneigenschaften und -funktionen.

Bei durchschnittlichen Werten zwischen 4,2 und 5,3 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ befinden sich zum Zeitpunkt der BZE II die meisten Böden in Hessen überwiegend im Austauscher- und teilweise sogar im günstigeren Silikatpuffer-Bereich. Die Mittelwerte je Tiefenstufe und auch die Streuungswerte bleiben stets oberhalb der Grenze zum „wurzeltxischen“ Aluminium-Pufferbereich.

Grundsätzlich steigen die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte mit zunehmender Bodentiefe des Mineralbodens in den unteren Tiefenstufen 10-30, 30-60 und 60-90 cm kontinuierlich an, ein deutliches Zeichen besserer Nährstoffbedingungen (zunehmende Säureneutralisierungskapazität) in tieferen Bodenschichten.

Im Auflagehumus ist eine Abnahme der pH -Werte (H_2O und KCl) und somit ein Anstieg der Versauerung festzustellen: Die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Auflagehumus sind von durchschnittlich 4,9 bei der BZE I auf 4,7 bei der BZE II leicht gesunken. Für diese Veränderung könnten die Abnahme des Auflagehumus und die damit verbundene verringerte Kapazität der Puffersubstanzen verantwortlich sein. In den obersten und untersten Mineralbodenschichten ist dagegen ein Anstieg der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte festzustellen. Auch in den weiteren Tiefenstufen besteht eine ansteigende Tendenz. Diese Entwicklung zeigt sich sowohl auf gekalkten als auch auf ungekalkten BZE-Punkten. Sie ist ein Hinweis auf deutlich verminderte atmosphärische Säureeinträge.

Durch die Erhöhung der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in der Bodenlösung stellt sich aber im Mineralboden eine Auflösung von Aluminiumsalzen bzw. die Ablösung von Sulfat am Austauscher ein (KHANNA et al. 1987, SÜSSER u. SCHWERTMANN 1991). Die damit verbundene Protonenproduktion und eine anschließende Bindung von H^+ -Ionen am Austauscher könnten erklären, dass die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte sowohl auf ungekalkten als auch auf gekalkten Flächen gesunken sind. Die Zunahme der Protonen am Austauscher könnte mit dem Abbau von Sulfat im Boden im Zusammenhang stehen. Sie ist ein Hinweis, dass Versauerungsprozesse in hessischen Wäldern weiterhin abgelaufen sind. Mit dem Sulfataustrag werden zugleich Calcium, Magnesium und Kalium ausgewaschen. Sulfat im Boden ist als Altlast des „Sauren Regens“ anzusehen. Durch die Ausbringung von Calcium-Magnesiumcarbonat konnten auf den gekalkten BZE-Punkten diese Calciumverluste mit dem Sickerwasser mehr als kompensiert werden.

Zwischen Höhe oder Zusammensetzung der Ake besteht weder inhaltlich noch statistisch eine straffe Beziehung zum pH -Wert (HOCKE 1995). Deshalb sind die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Veränderungen nicht als Widerspruch zur Entwicklung indikativer Versauerungskenngrößen, wie Basensättigung bzw. -vorräte, zu bewerten, die eine

weitere Nährstoffverarmung ungekalkter Standorte der Kalkungskulisse nachweisen.

1.9.5 Hinweise auf Prozesse und Bewertung

Die Hauptergebnisse zum Stoffeintrag belegen den deutlichen Rückgang des Gesamtsäureeintrages in hessische Wälder für den Zeitraum der letzten zwei bis drei Jahrzehnte. Lagen die Säureeinträge auf hessischen Intensivmessflächen Ende der 1980er-Jahre noch bei 1,4 kmol_c je Hektar und Jahr (Buche) bzw. 3 kmol_c je Hektar und Jahr (Fichte), verringerte sie sich für den Zeitraum 1991 bis 2007 auf 1,1 kmol_c je Hektar und Jahr (Buche) bzw. 2 kmol_c je Hektar und Jahr (Fichte) (SCHELER 2015, mdl. Mittl.). Trotz des Rückgangs übersteigt aber auch aktuell der Säureeintrag das nachhaltige Puffervermögen basenarmer Waldböden durch Verwitterung, insbesondere unter Fichte.

Die Versauerung betrifft vor allem den Mineralboden der Tiefenstufe von 5 cm bis 60 cm. Versauerungsprozesse im obersten Mineralboden sind vermutlich durch Humusumsetzungen überlagert. Die Versauerung zeigt sich als Abnahme der Basensättigung bis 60 cm Mineralbodentiefe und Abnahme von Nährstoffkationen aus dem Oberboden, insbesondere von Magnesium und Calcium. Die Abnahmen erreichen bei Magnesium ein Drittel der Vorräte in 0-30 cm Bodentiefe, bei Calcium ein Viertel der Vorräte.

Die weitere Nährstoffverarmung von ungekalkten Waldflächen in Hessen ist zum einen eine Folge der überhöhten Säureeinträge, zum anderen aber auch mit den Umsetzungsprozessen von teilweise erheblichen Schwefelakkumulationen im Boden („Sulfatdynamik“) verbunden. Die Schwefelanreicherung im Boden kann als ein Memory-Effekt für jahrzehntelange hohe Schwefeleinträge angesehen werden. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass auf hessischen Intensivmessflächen die Einträge von Calcium von 12 kg pro Hektar und Jahr (Buche) bzw. 15 kg pro Hektar und Jahr (Fichte) in den 1980er-Jahren auf durchschnittlich 8,5 kg pro Hektar und Jahr (Buche) bzw. 12 kg pro Hektar und Jahr (Fichte) für den Zeitraum von 1992 bis 2006 zurückgegangen sind (SCHELER 2015, mdl. Mittl.). Des Weiteren zeigen Stoffbilanzen für nicht gekalkte Intensivflächen des Forstlichen Umweltmonitorings, dass auf bestimmten Standorten bereits gewöhnliche Derbholznutzungen zu negativen Nährstoffbilanzen, insbesondere für Calcium, führen können (KLINCK et al. 2012).

Die Ergebnisse belegen insgesamt, dass das Thema Bodenversauerung auch heute noch aktuell ist.

1.10 Wirkungen der Bodenschutzkalkung auf den Waldbodenzustand

Bodenschutzkalkungen dienen der Kompensation von Säureeinträgen und der Verbesserung der Puffereigenschaften von Waldböden. Die Chancen und Risiken

von Bodenschutzkalkungen, aber auch das Verfahren und die Beschränkungen sind in einem Merkblatt sowie im Detail in einer Geschäftsanweisung beschrieben (HESSEN-FORST 2014).

1.10.1 Umfang durchgeführter Bodenschutzkalkungen

Umfangreiche und intensive Nachforschungen haben ergeben, dass bis zum Zeitpunkt der BZE II 44 % der BZE II-Punkte in Hessen mindestens einmal gekalkt wurden, also knapp die Hälfte des Waldes. 53 % der Punkte waren nicht gekalkt. Nur bei wenigen Flächen blieb der Status unklar. Rund zwei Drittel der in Hessen gekalkten BZE-Punkte sind Buntsandstein- bzw. Tonschiefer-Standorte, wobei 69 % der BZE-Punkte auf Buntsandstein und 88 % der BZE-Punkte auf Tonschiefer gekalkt wurden. Den ungekalkten Flächen dieser Substratgruppen sind in Zukunft prioritär Kalkungsmaßnahmen zuzuordnen. Deutlich mehr als die Hälfte der wenigen Tonstein-, Grauwacke- und Quarzit-Punkte waren gekalkt. Lösslehm-Standorte wurden zu 60 % bislang nicht gekalkt. Lösslehm-Standorte sind vielfach im oberen Hauptwurzelraum versauert, weisen in tieferen Schichten aber bessere Nährstoffbedingungen auf. Wie vorgegeben und daher erwartet, waren Basalt- und Diabas-Standorte nahezu vollständig von Kalkungsmaßnahmen ausgeschlossen.

1.10.2 Vergleichende Bewertung gekalkter und ungekalkter BZE-Punkte

Innerhalb der Kulisse der kalkungsbedürftigen Standorte erfolgt in Hessen die Auswahl der zu kalkenden Standorte in der Weise, dass die am stärksten versauerten Standorte prioritär gekalkt werden sollen. Die Befunde der BZE II spiegeln dies wider: Der Vergleich zwischen gekalkten und ungekalkten BZE II-Punkten beschränkt sich dabei auf die in der Kalkungskulisse enthaltenen Substratgruppen (Buntsandstein, Grauwacke, Tonschiefer, Lösslehm etc.). Die ungekalkten BZE II-Punkte dieser Substratgruppen weisen mit durchschnittlich 800 kmol_c/ha eine deutlich höhere Austauschkapazität auf als die gekalkten BZE II-Punkte mit 550 kmol_c/ha (BZE I) und 615 kmol_c/ha (BZE II). Die Ergebnisse belegen, dass innerhalb der zu kalkenden Standorte die Bodenschutzkalkung zunächst auf den relativ ärmsten Standorten vollzogen wurde. Die Daten sind ein Indiz für eine zielgerichtete Auswahl der zu kalkenden Standorte.

Die Austauschkapazität bei den gekalkten BZE II-Punkten hat sich seit der BZE I signifikant erhöht, und zwar in den Tiefenstufen 0-5, 5-10 und 10-30 cm. Auf Profilebene ergibt sich für das gekalkte Kollektiv eine signifikante Zunahme von 33 kmol_c/ha. Die Bodenschutzkalkung bewirkt eine Zunahme des pH-Wertes und damit eine Erhöhung der variablen Ladung sowie eine Zunahme an organischer Substanz im Oberboden und verbessert somit die Bodeneigenschaften. Die Fähigkeit Nährstoffkationen zu speichern wird verbessert und das Wasserhaltevermögen gesteigert.

Hinsichtlich der Belegung der Austauschcher mit Kationen zeigt sich, dass sich in dem kurzen Zeitraum zwischen BZE I und BZE II (15 Jahre) im gekalkten Kollektiv die Basensättigung bis 10 cm Bodentiefe deutlich verbesserte (+17 %-Punkte in 0-5 cm und +8 %-Punkte in 5-10 cm), während im ungekalkten Kollektiv die Basensättigung tendenziell abnahm, signifikant in der Tiefenstufe 10-30 cm. Positive Effekte der Waldkalkung zeigen sich insbesondere für den Buntsandstein (deutliche Verbesserungen der Basensättigung bis in 60 cm Mineralbodentiefe), für den Lösslehm (0-10 cm), Tonschiefer (0-10 cm) und Grauwacke (0-10 cm). Auch für Rheinland-Pfalz ist dieser signifikante Anstieg der Basensättigung in den obersten Tiefenstufen infolge der Kalkung belegt (BLOCK u. GAUER 2012).

Mit der Kompensationskalkung werden den Böden u. a. die Kationen Calcium und Magnesium zugeführt. Dadurch verändern sich die Calciumvorräte im Auflagehumus und im Mineralboden und gleichen Verluste früherer Versauerungsphasen aus. Allerdings unterscheiden sich die Calciumvorräte nach einer Bodenschutzkalkung in verschiedenen Bodenschichten. Im gekalkten Kollektiv findet im Auflagehumus eine signifikante Abnahme und im Mineralboden bis in 90 cm Bodentiefe eine weitgehend signifikante Zunahme der Calciumvorräte statt. Bezogen auf das Gesamtprofil erhöhen sich die Calciumvorräte nach einer Bodenschutzkalkung um etwa 160 kg/ha. Im ungekalkten Kollektiv kommt es ebenfalls zu einer signifikanten Abnahme im Auflagehumus, die allerdings mit rund 80 kg/ha Calcium deutlich geringer ist als im gekalkten Kollektiv (-211 kg/ha Calcium). Im Gegensatz zum gekalkten Kollektiv nehmen die Calciumvorräte im ungekalkten Kollektiv jedoch bis in 60 cm Bodentiefe weiter ab, insgesamt um rund 500 kg/ha bis 60 cm Bodentiefe. Die Abnahme um 500 kg Calcium pro Hektar begründet die Größenordnung einer üblichen Bodenschutzkalkung mit Dolomit in Höhe von drei Tonnen je Hektar (ca. 650 kg/ha Calcium).

Die Ergebnisse für Magnesium sind weitgehend ähnlich zu denen des Calciums. Im gekalkten Kollektiv gehen die Magnesiumvorräte im Auflagehumus signifikant zurück, dagegen stehen signifikante Zunahmen im Mineralboden bis in 60 cm Bodentiefe, die sich als Trend bis in 90 cm Tiefe fortsetzen. Im ungekalkten Kollektiv dagegen gibt es keine signifikanten Veränderungen.

Auch die umfangreichen Auswertungen für Experimentalflächen der Forstlichen Umweltkontrolle an der NW-FVA von GUCKLAND et al. (2012) belegen für gekalkte Flächen im Vergleich zu Kontrollflächen eine Verbesserung der Calcium- und Magnesiumvorräte sowie der Basensättigung bis in eine Mineralbodentiefe von 60 cm.

Mit der Bodenschutzkalkung wird den Böden kein zusätzliches Kalium zugeführt. Kalium zählt zu den Hauptnährelementen, weicht aber in seinen Eigenschaften im Ökosystem wie auch in seiner physiologischen Bedeutung für Bäume deutlich von anderen Elementen ab (TRIPLER et al. 2006). Im Oberboden unterscheiden sich gekalkte und nicht gekalkte BZE II-Punkte nicht. Auch in Rheinland-

Pfalz zeigen sich im Rahmen der BZE-Auswertungen keine signifikanten Veränderungen der austauschbaren Kaliumvorräte (BLOCK u. GAUER 2012).

1.10.3 Bewertung

Auf den gekalkten Standorten (Buntsandstein, Grauwacke etc.) zeigt sich eine Verbesserung der durchschnittlichen Basensättigung bis 60 cm Mineralbodentiefe. Bereits eingetretene Nährstoffverluste infolge hoher Säureinträge, Sulfatausträge, Biomasseentzug und verringerter basischer Einträge aus der Luft werden ausgeglichen. Eine Bodenschutzkalkung hat somit einen langfristig positiven Einfluss auf den chemischen Bodenzustand und auf die Stabilisierung des Nährstoffhaushaltes. Die Ergebnisse der BZE II zeigen darüber hinaus die Risiken für schwach nährstoffversorgte Standorte auf, die bislang nicht gekalkt wurden. Für das Kollektiv der ungekalkten – aber kalkungsempfohlenen – Standorte und insbesondere für die Basensättigung in der Substratgruppe Buntsandstein zeigt sich sehr deutlich, dass sich der schon jetzt kritische bodenchemische Zustand im Hauptwurzelraum bis 90 cm Bodentiefe ohne eine Bodenschutzkalkung weiter verschlechtert. Von besonderer Dringlichkeit erscheint deshalb die Kalkung genau dieser Standorte. Die Ergebnisse der BZE II belegen, dass die Versauerung und Nährstoffverarmung dieser Standorte seit der BZE I weiter vorangeschritten ist.

Insgesamt ist festzustellen, dass sich das bisherige Konzept der Bodenschutzkalkung bewährt hat. Es sollte standorts- und bedarfsangepasst mit fachlicher Sorgfalt weitergeführt werden.

Aus Forschungsgründen sind kalkungswürdige, aber bis heute nicht gekalkte Referenzflächen (außerhalb der Rasterflächen der Übersichtserhebung) für die Zukunft zu sichern.

1.11 Hauptergebnisse zur Bodenchemie für die Substratgruppen

Waldregionen werden standörtlich weitgehend durch ihre Ausgangsgesteine und die dazugehörigen Substratgruppen geprägt. Zu nennen sind etwa der durch Basalt geprägte Vogelsberg oder der im Reinhardswald häufig vorkommende Buntsandstein. Im Interesse einer Anwendbarkeit der Ergebnisse der Bodenzustandserhebung für konkrete forstliche Fragestellungen auf überregionaler, regionaler oder lokaler Ebene sind Befunde für konkrete Substratgruppen von Bedeutung.

1.11.1 Buntsandstein (28 % der Waldfläche in Hessen)

Die Buntsandsteine gehören zu den ärmeren Standorten in Hessen.

Mit einer Austauschkapazität von rund 400 kmol_c/ha – summiert bis 90 cm Bodentiefe – liegen die BZE II-Punkte der Substratgruppe Buntsandstein im mittleren Bewertungsbereich.

Die durchschnittliche Basensättigung von knapp 20 % auf Profilebene liegt an der Grenze des geringen zum gering-mittleren Bewertungsbereich. Der Calciumvorrat beträgt 1.000 kg/ha und ist damit als mittel einzustufen, der Magnesiumvorrat als mittel (370 kg/ha) und der Kaliumvorrat (480 kg/ha) als gering-mittel. Die effektive Austauschkapazität, die Basensättigung und die Nährstoffvorräte sind damit nur etwa halb so hoch wie im Mittel für Hessen insgesamt.

Die oberen 10 cm des Mineralbodens liegen zum Teil im Aluminium-Pufferbereich, die tieferen Bodenschichten im Austauscher-Pufferbereich. Im Vergleich zur BZE I sind die pH(H₂O)-Werte im Auflagehumus zurückgegangen, in den Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm hingegen gestiegen. Für die tieferen Bodenschichten ergab sich keine Veränderung. Die pH(KCl)-Werte haben in fast allen Tiefenstufen (Ausnahme 0-5 cm) seit der BZE I abgenommen.

Durch die Bodenschutzkalkung haben sich einige bodenchemische Kennwerte verändert. In den gekalkten BZE II-Profilen ist die Basensättigung seit der BZE I um 9 %-Punkte auf 24 % angestiegen. Bei den ungekalkten Profilen gab es in diesem Zeitraum eine Abnahme der Basensättigung um 7 %-Punkte auf 10 %, diese erreichen damit nur den Bewertungsbereich gering. In den einzelnen Tiefenstufen ist der Einfluss der Waldkalkung bis in 60 cm Bodentiefe mit signifikant höheren Werten der Basensättigung bei der BZE II im Vergleich zur BZE I feststellbar. In der Tiefenstufe 0-5 cm stieg die Basensättigung um 20 %-Punkte auf 44 % an und liegt damit im unkritischen mittleren Bewertungsbereich. Der Anstieg verringert sich mit zunehmender Tiefe, ist aber bis 60 cm signifikant.

Im ungekalkten Kollektiv der Substratgruppe Buntsandstein nehmen die durchschnittlichen Werte der Basensättigung ab. Die Basensättigung für sämtliche Mineralbodentiefen (unterhalb von 5 cm) erreichen mit durchschnittlich 7-13 % sehr kritische Werte. Damit zeigt sich für die Substratgruppe Buntsandstein bereits sehr deutlich, dass sich ohne eine Bodenschutzkalkung der schon kritische bodenchemische Zustand im Hauptwurzelraum bis 90 cm Bodentiefe weiter verschlechtert hat.

Die Calciumvorräte an den gekalkten Buntsandsteinpunkten veränderten sich seit der BZE I nicht signifikant. Im Gegensatz dazu verringerten sich die Calciumvorräte im Mittel der ungekalkten Buntsandsteinpunkte deutlich: Bei der BZE I lagen die mittleren Vorräte dieses Kollektivs bei knapp 1.000 kg/ha Calcium, zum Zeitpunkt der BZE II waren nur noch knapp 500 kg/ha vorhanden. Diese hohen mittleren Calciumvorratsverluste zwischen den BZE-Erhebungen sind vor dem Hintergrund der ebenfalls sehr geringen Werte für die Basensättigung bedenklich. Diese Einschätzung bezieht sich sowohl auf den Status als auch auf die Dynamik, die in einem für Waldökosysteme recht kurzen Zeitraum von 15 Jahren stattgefunden hat. Der Magnesiumvorrat (Auflage und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe) nimmt an den gekalkten Punkten zwischen der BZE I und der BZE II um 74 kg/ha (+19 %) zu und bei den ungekalkten dagegen um 64 kg/ha ab (-18 %). Für die Kaliumvorräte konnte keine Veränderung festgestellt werden.

Die Substratgruppe Buntsandstein kann in eine mehr sandige und in eine tonige Fraktion unterteilt werden. Die tonige Variante des Buntsandsteins erreicht deutlich höhere Werte bei der Austauschkapazität und den Nährstoffvorräten als die sandige Variante. Die Basensättigung unterscheidet sich kaum. In der sandigen Fraktion ist die Austauschkapazität mit durchschnittlich rund 300 kmol_c/ha bis 90 cm Bodentiefe nur knapp halb so hoch wie in der tonigen Fraktion mit 560 kmol_c/ha. Die Calcium- und Magnesiumvorräte sind auf dem sandigen Buntsandstein gering bis mittel, auf dem tonigen Buntsandstein dagegen mittel. Bei den Kaliumvorräten sind die Unterschiede besonders groß: die sandige Variante hat geringe, die tonige Variante mittlere Kaliumvorräte.

Im sandigen Kollektiv gab es signifikante Zunahmen der Austauschkapazität durch die Erhöhung des organischen C-Vorrates bis in eine Bodentiefe von 10 cm von insgesamt 17 kmol_c/ha (+23 %), die auf die Waldkalkung zurückgeführt werden können. Die Basensättigung stieg an den gekalkten Punkten seit der BZE I auf den sandigen Buntsandsteinen im Mittel um 7 %-Punkte und auf den tonigen Buntsandsteinen um 10 %-Punkte an.

Die Kohlenstoffvorräte sowohl beim sandigen als auch beim tonigen Buntsandstein fallen in den geringen Bewertungsbereich, die Vorräte sind im tonigen Buntsandstein etwas höher als in der sandigen Ausprägung. Beim sandig ausgeprägten Buntsandstein blieben die Vorräte relativ unverändert, beim tonigen Buntsandstein haben sie leicht abgenommen.

Als einzige Gruppe sind die Buntsandsteine der sandigen Ausprägung bei den Stickstoffvorräten überwiegend als gering einzustufen, während alle anderen Substrate mit Ausnahme von Einzelprofilen in den mittleren Bereich fallen. Entsprechend des landesweiten Trends sind auch bei den sandigen und tonigen Buntsandsteinen die Stickstoffvorräte seit der BZE I gesunken, in beiden Fällen signifikant.

Aufgrund der Entwicklung der ungekalkten Buntsandsteine seit der BZE I hin zu einer niedrigeren Basensättigung und den erheblichen Calciumvorratsverlusten sind die Buntsandstein-Standorte bei der Kalkungsplanung mit Priorität zu berücksichtigen.

1.11.2 Lösslehm (14 % der Waldfläche in Hessen)

Die Substratgruppe Lösslehm zeigt insgesamt eine große Spannweite der bodenchemischen Parameter.

Mit rund 950 kmol_c/ha Austauschkapazität summiert bis 90 cm Bodentiefe liegen die BZE II-Punkte der Substratgruppe Lösslehm im mittel bis hohen Bewertungsbereich und damit über dem Durchschnitt für Hessen insgesamt. Die durchschnittliche Basensättigung (41 %) liegt im mittel bis hohen Bewertungsbereich und entspricht dem Landesmittel. Die Nährstoffversorgung ist gut. Dies liegt vor allem an den hohen Basenvorräten in den Bodentiefen 30-60 cm und besonders 60-90 cm.

In der zuletzt genannten Tiefe liegt die durchschnittliche Basensättigung bei fast 70 %. Mit einer Basensättigung von 15 % weisen die Tiefenstufen 5-10 cm und 10-30 cm trotz relativ hoher Austauschkapazitäten eher geringe Werte auf. Die Calciumvorräte umfassen bei der Mehrzahl der Lösslehme die Spanne mittel-hoch bis hoch, bei den Magnesiumvorräten mittel-hoch bis sehr hoch. Vergleichbare Vorräte an Calcium und Magnesium finden sich auch für die Substratgruppen Lehm, Zechstein, Basalt/Diabas, Ton(stein) und Kalk. Allerdings können bei den Lösslehmen auch mit Magnesium gering-mittel bis gering versorgte Standorte vorkommen. Nach der Substratgruppe Ton(stein) weisen die Lösslehm-Standorte die zweithöchsten Kaliumvorräte unter den Substratgruppen auf (mittel und mittelhoher Bewertungsbereich). Veränderungen seit der BZE I gab es bezüglich Kalium für die Gesamtheit der Lösslehme nicht.

Die Lösslehme (bis 60 cm Tiefe) befinden sich im Austauscher-Pufferbereich, der Unterboden (60-90 cm) im Silikat-Pufferbereich. Im Auflagehumus hat der pH(H₂O)-Wert seit der BZE I abgenommen, in allen Mineralbodentiefenstufen ist er angestiegen. Die pH(KCl)-Werte haben in allen Tiefenstufen (einschließlich Auflagehumus) abgenommen.

Die Kohlenstoffvorräte liegen zum Zeitpunkt der BZE II im geringen Bewertungsbereich, die Stickstoffvorräte im mittleren Bewertungsbereich. Die Kohlenstoffvorräte haben leicht zugenommen, die Stickstoffvorräte sind relativ konstant geblieben.

Die Waldkalkung führte tendenziell zu höheren Austauschkapazitäten durch höhere C-org-Gehalte in den einzelnen Tiefenstufen. Dies ist jedoch nur für die Tiefenstufe 5-10 cm signifikant. Signifikante Änderungen zeigten sich auch für die gekalkten Lösslehmepunkte in den Tiefenstufen 0-30 cm und 60-90 cm mit einem Anstieg der Magnesiumvorräte.

Die ausgeprägte Heterogenität der Lösslehme und die Potentiale im Unterboden (Basensättigung, Nährstoffe) sind bei der Kalkungsplanung für die Lösslehme zu berücksichtigen.

1.11.3 Basalt/Diabas (14 % der Waldfläche in Hessen)

Die Substratgruppe Basalt/Diabas gehört in Hessen zu den am besten mit Nährstoffen versorgten Standorten.

Mit Werten um 1300 kmol./ha Austauschkapazität bis 90 cm Bodentiefe zählen die Basalte/Diabase zu den Standorten mit den höchsten Austauschkapazitäten in Hessen. Die Austauschkapazität hat im gesamten Profil ein ähnliches Niveau.

Auf Profilebene liegt die durchschnittliche Basensättigung bei 83 % und damit im hohen Bewertungsbereich. Hohe durchschnittliche Basensättigungen bis 90 cm Bodentiefe zeigen auch die Substratgruppen Ton(stein), Kalk und Zechstein. Auch die durchschnittlichen Calcium- und Magnesiumvorräte bis 90 cm Bodentiefe liegen

im hohen bis sehr hohen Bewertungsbereich. Lediglich die Kaliumvorräte sind nur durchschnittlich (gering bis mittel). Wesentliche Veränderungen gegenüber der BZE I haben nicht stattgefunden. Die Basalt/Diabas-Standorte befinden sich im Austauscher- bis Carbonat-Pufferbereich. Seit der BZE I sind die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte angestiegen. Die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte sind gesunken (Ausnahme: Auflagehumus).

Die Kohlenstoffvorräte liegen im geringen, die Stickstoffvorräte im mittleren Bewertungsbereich. Die Kohlenstoffvorräte nahmen seit der BZE I leicht zu, die Stickstoffvorräte dagegen leicht ab.

Die Basalt/Diabas-Standorte sind nicht für eine Kalkung vorgesehen.

1.11.4 Tonschiefer (12 % der Waldfläche in Hessen)

Auf den Tonschiefer-Standorten in der hessischen BZE-Stichprobe sind mittlere chemische Verhältnisse vorherrschend. Die BZE-Punkte dieser Substratgruppe sind bis auf zwei Ausnahmen gekalkt worden.

Der Tonschiefer liegt mit einem Median von $310 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ im mittleren Bewertungsbereich der Austauschkapazität. Für die Tiefenstufen 0-5, 5-10 und 10-30 cm zeigen sich im Vergleich zur BZE I signifikante Zunahmen von summiert rund $30 \text{ kmol}_c/\text{ha}$.

Die Basensättigung liegt bei der BZE II auf Profilebene bei knapp 30 % und fällt damit in den gering bis mittleren Bewertungsbereich. Die Calciumvorräte liegen überwiegend im gering-mittel bis mittleren Bewertungsbereich, die Magnesiumvorräte im mittel bis mittel-hohen Bereich. Die Kaliumvorräte sind gering.

Alle Tiefenstufen des Tonschiefers liegen im Austauscher-Pufferbereich. Bis 5 cm Mineralbodentiefe haben die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte seit der BZE I zugenommen, in den anderen Tiefenstufen sind sie konstant geblieben oder haben abgenommen. Entgegen dem sonstigen Trend zunehmender $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte sind beim Tonschiefer und beim Quarzit die Werte in 30-90 cm Tiefe zurückgegangen. Die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte sind ebenfalls gesunken.

Die Waldkalkung kann als plausible Erklärung für die signifikante Zunahme der Basensättigung um 17 %-Punkte in der Tiefenstufe 0-5 cm angesehen werden.

Die Kohlenstoffvorräte liegen im geringen, die Stickstoffvorräte im mittleren Bewertungsbereich. Die Kohlenstoffvorräte nahmen leicht zu, die Stickstoffvorräte dagegen leicht ab.

Die Tonschiefer-Standorte gehören zur Kalkungskulisse.

1.11.5 Sande (10 % der Waldfläche in Hessen)

1.11.5.1 Unverlehmte Sande

Die untersuchten Bodenparameter weisen für die Standorte der unverlehmten Sande weit unterdurchschnittliche chemische Verhältnisse aus. Die Wertespannen sind gering.

Die unverlehmten Sande im BZE II-Kollektiv liegen mit einer Austauschkapazität zwischen 160 und 350 kmol_c/ha (Mittel: 220 kmol_c/ha) an der Grenze der gering-mittleren und mittleren Bewertungsbereiche. Sie zählen mit rund 15 % durchschnittlicher Basensättigung bis 90 cm Bodentiefe zu den Standorten mit den geringsten Werten in Hessen und fallen in den geringen Bewertungsbereich. Auch die Calciumvorräte (unter 400 kg/ha) bis 90 cm Bodentiefe, die Magnesiumvorräte (durchschnittlich 74 kg/ha) und die Kaliumvorräte sind als gering einzustufen. Signifikante Veränderungen seit der BZE I sind in dieser Substratgruppe nicht aufgetreten.

Die unverlehmten Sande decken je nach Bodentiefe unterschiedliche Pufferbereiche ab. Der Mineralboden in 0-60 cm Tiefe befindet sich im Austauscherpufferbereich, der Unterboden (60-90 cm) im Silikat-Pufferbereich. Im Auflagehumus ist der pH(H₂O)-Wert seit der BZE I gesunken, in den Mineralbodenhorizonten gleichgeblieben oder angestiegen. Die pH(KCl)-Werte sind sowohl im Auflagehumus als auch in allen Mineralboden-Tiefenstufen gesunken.

Die unverlehmten Sande und die Kalk-Standorte weichen bei den Kohlenstoffvorräten von den anderen Substratgruppen (alle in der Bewertungsstufe gering) ab. Hier liegen die Kohlenstoffvorräte ebenso wie die Stickstoffvorräte im mittleren Bereich. Sowohl die Kohlenstoff- als auch die Stickstoffvorräte haben bei den unverlehmten Sanden seit der BZE I leicht zugenommen.

1.11.5.2 Schwach verlehnte Sande

Die Mittelwerte für die schwach verlehnten Sande zeigen deutlich bessere Bodenverhältnisse an als die der unverlehmten Sande, sie bleiben aber im Vergleich zum Mittel in Hessen insgesamt ebenfalls unterdurchschnittlich.

Die Austauschkapazität der schwach verlehnten Sande liegt mit rund 400 kmol_c/ha bis 90 cm Bodentiefe im Mittel fast doppelt so hoch wie die der unverlehmten Sande, aber nur halb so hoch wie der Mittelwert der BZE II-Profile in Hessen. Die Basensättigung bis 90 cm Bodentiefe beträgt 32 % (mittlerer Bewertungsbereich). Die Calcium- und Magnesiumvorräte sind gering bis mittel, die Kaliumvorräte gering. Wie bei den unverlehmten Sanden sind auch für die schwach verlehnten Sande in Hessen keine Veränderungen gegenüber der BZE I festgestellt worden.

Die schwach verlehmtten Sande befinden sich im Austauscher-Pufferbereich. Veränderungen der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte gegenüber der BZE I gab es nur im Auflagehumus, hier sind die Werte gesunken. Die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte sind im Wesentlichen unverändert.

Die Kohlenstoffvorräte liegen im geringen, die Stickstoffvorräte im mittleren Bewertungsbereich. Sowohl die Kohlenstoff- als auch die Stickstoffvorräte haben zugenommen, allerdings nicht signifikant.

Nur einem BZE II-Punkt in Hessen wurde die Substratgruppe verlehmtter Sand zugewiesen. Dieser Standort weist $300 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ Austauschkapazität auf (mittel) und liegt mit 48 % Basensättigung im oberen mittleren Bewertungsbereich.

Die Sande gehören in Hessen nicht zur Kalkungskulisse.

1.11.6 Grauwacke (5 % der Waldfläche in Hessen)

Die Grauwacke-Standorte weisen überwiegend geringe bis mittlere Verhältnisse auf.

Mit 160 und $440 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ (Mittel: $300 \text{ kmol}_c/\text{ha}$) liegt die Austauschkapazität noch im mittleren Versorgungsbereich. Die Basensättigung beträgt 33 % (mittlerer Bewertungsbereich). Im mittleren Versorgungsbereich befinden sich auch die Calcium- und Magnesiumvorräte. Grauwacke-Standorte weisen geringe Kaliumvorräte auf. Signifikante Veränderungen zur BZE I konnten nicht nachgewiesen werden. Die Grauwacke befindet sich im Austauscher-Pufferbereich. Der Unterboden (60-90 cm) liegt im Silikat-Pufferbereich. Die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte sind überwiegend gleich geblieben, im Auflagehumus wurde eine Abnahme festgestellt. Die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte sind über die gesamte Profiltiefe abgesunken.

Die Kohlenstoffvorräte liegen zum Zeitpunkt der BZE II im geringen Bewertungsbereich, die Stickstoffvorräte im mittleren Bewertungsbereich. Sowohl die Kohlenstoff- (+16 %, signifikant) als auch die Stickstoffvorräte (+9 %, nicht signifikant) haben zugenommen.

Vier der sieben Grauwacke-Standorte bei der BZE II-Stichprobe sind gekalkt worden. Für die gekalkten Punkte stieg die Austauschkapazität bis 30 cm Bodentiefe an. Das gekalkte Kollektiv zeigt tendenziell höhere Basensättigungen in den oberen beiden Tiefenstufen und einen leicht erhöhten Durchschnitt auf Profilebene.

Die Grauwacke-Standorte gehören zur Kalkungskulisse.

1.11.7 Ton(stein) (5 % der Waldfläche in Hessen)

Die Substratgruppe Ton(stein) setzt sich in Gesamt-Hessen vorrangig aus Standorten mit tertiären Tonen zusammen. In dieser Substratgruppe befinden sich die untersuchten Bodenkennwerte meist im hohen Bewertungsbereich und übersteigen die Mittelwerte für Gesamt-Hessen.

Die Austauschkapazität liegt bei rund 1600 kmol_c/ha und damit im hohen Bewertungsbereich. Die Werte der Basensättigung zeigen eine weite Spanne von mittel-hoch bis sehr hoch. Der Mittelwert liegt bei 65 %.

Die BZE II-Punkte der Substratgruppe Ton(stein) sind auch hinsichtlich der Calcium- und Magnesiumvorräte als überwiegend hoch bis sehr hoch zu bewerten. Als einzige Substratgruppe sind beim Ton(stein) auch die Kaliumvorräte mittel-hoch bis sehr hoch. Veränderungen seit der BZE I wurden nicht festgestellt.

Die Ton(steine) befinden sich bis 60 cm Bodentiefe im Austauscher-Pufferbereich, der Unterboden (60-90 cm) im Silikat-Pufferbereich. Im Auflagehumus und bis 30 cm Bodentiefe gab es Abnahmen der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte, in 30-90 cm Tiefe Zunahmen. Die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte sind über die gesamte Profiltiefe gesunken, am stärksten im Auflagehumus und im Unterboden (60-90 cm).

Vier der sieben BZE II-Punkte auf Ton(stein) wurden gekalkt. Signifikante Kalkungseffekte gab es nicht.

Die Kohlenstoffvorräte liegen zum Zeitpunkt der BZE II im geringen Bewertungsbereich, die Stickstoffvorräte eher im mittleren Bewertungsbereich. Die Kohlenstoffvorräte haben zugenommen, die Stickstoffvorräte dagegen abgenommen, in beiden Fällen jedoch nicht signifikant.

Die Ton(steine) gehören nicht zur Kalkungskulisse.

1.11.8 Kalk-Standorte (3 % der Waldfläche in Hessen)

Waldböden auf Kalkstein zeigen überdurchschnittliche Werte bei den untersuchten Bodenparametern.

Hinsichtlich der Austauschkapazität bis in 90 cm Bodentiefe liegen die Kalk-Standorte in Hessen mit 930 kmol_c/ha im mittel-hohen Bereich. Mit annähernd 100 % Basensättigung über alle Tiefenstufen hinweg haben die Kalke die höchsten Werte im BZE II-Kollektiv.

Die Calciumvorräte sind sehr hoch. Eine größere Bandbreite weisen die Magnesiumvorräte mit einer Spanne von mittel bis sehr hoch auf. Die Kaliumvorräte sind die niedrigsten im BZE-Kollektiv. Sie entsprechen dem sehr geringen bis geringen Bewertungsbereich. Signifikante Änderungen von der BZE I zur BZE II wurden nicht festgestellt.

Alle Mineralbodentiefenstufen befinden sich im Carbonat-Pufferbereich. Im gesamten Profil wurde eine Zunahme der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte ermittelt. Neben der Substratgruppe Lehm sind die Kalk-Standorte die einzige Substratgruppe, bei der die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte seit der BZE I zugenommen haben.

Die Kalk-Standorte sind neben den unverlehmten Sanden die einzige Substratgruppe, in der die Kohlenstoffvorräte in den mittleren Bewertungsbereich fallen. Die Stickstoffvorräte liegen ebenfalls im mittleren Bewertungsbereich. Sowohl die

Kohlenstoff- als auch die Stickstoffvorräte haben zugenommen, allerdings nicht signifikant.

Die Kalk-Standorte gehören nicht zur Kalkungskulisse.

1.11.9 Lehm, Quarzlit, Zechstein/Rotliegendes, Granit

Diese Substratgruppen sind bei der BZE II-Stichprobe nur in geringer Anzahl vertreten. Die folgenden Angaben haben daher nur Beispielcharakter.

1.11.9.1 Lehm (3 % der Waldfläche in Hessen)

Auf den Lehm-Standorten befinden sich die bodenchemischen Kennwerte mindestens im mittleren Bereich. Die Ergebnisse dieser Substratgruppe sind aufgrund deren Heterogenität und der dadurch bewirkten weiten Wertespannen nur eingeschränkt auf andere Lehme in Hessen übertragbar.

Mit 950 kmol_c/ha Austauschkapazität umfassen die Lehme den mittel-hohen bis hohen Bewertungsbereich. Die Basensättigung reicht vom mittleren bis in den mittel-hohen Bereich (Mittel: 46 % Basensättigung).

Der Calciumvorrat liegt im mittleren bis sehr hohen Bereich, die Magnesiumvorräte im mittel-hohen bis hohen Bereich und die Kaliumvorräte im gering-mittleren bis mittel-hohen Bereich. Veränderungen gegenüber der BZE I wurden nicht festgestellt.

Die Lehme befinden sich im Austauscher-Pufferbereich (30-60 cm Bodentiefe) und im Silikat-Pufferbereich (0-10 cm). Die pH(H₂O)-Werte haben seit der BZE I im Mineralboden zugenommen. Abweichend vom allgemeinen Trend abnehmender pH(KCl)-Werte haben die Werte in dieser Substratgruppe im Auflagehumus und bis 5 cm Bodentiefe zugenommen.

Zwei der vier BZE II-Punkte auf Lehm sind gekalkt worden. Signifikante Kalkungseffekte wurden nicht festgestellt.

Die Kohlenstoffvorräte sind im geringen Bewertungsbereich. Seit der BZE I haben sie abgenommen, während auf Landesebene eher eine Zunahme der Kohlenstoffvorräte stattgefunden hat. Die Stickstoffvorräte liegen überwiegend im mittleren Bewertungsbereich, sie haben seit der BZE I ebenfalls abgenommen.

Für die Lehme gibt es keine pauschale Kalkungsempfehlung. Für diese Substratgruppe ist stets im Einzelfall zu prüfen, ob es sich um eine reichere oder ärmere Ausprägung handelt.

1.11.9.2 Quarzlit (3 % der Waldfläche in Hessen)

Die Quarzite gehören zu den Standorten mit unterdurchschnittlichen Bodenkennwerten in Hessen.

Mit 300-600 kmol_c/ha (Mittel: 420 kmol_c/ha) liegen die von Quarzit geprägten BZE II-Punkte hinsichtlich der Austauschkapazität bis 90 cm Bodentiefe im mittleren Bewertungsbereich. Die i. d. R. durchgängige durchschnittliche Basensättigung von 8 % bis 90 cm Bodentiefe fällt in den geringen Bewertungsbereich.

Die Quarzite haben die niedrigste Basensättigung im BZE II-Kollektiv und auch die niedrigsten Calciumvorräte (Bewertungsbereich gering). Die Magnesium- und Kaliumvorräte befinden sich im gering-mittleren Bewertungsbereich.

Die oberen 5 cm des Mineralbodens befinden sich im Aluminium-Pufferbereich, die übrigen Tiefen im Austauscher-Pufferbereich. Von 5-90 cm Bodentiefe haben die pH(H₂O)-Werte abgenommen, die pH(KCl)-Werte haben auf der gesamten Profiltiefe ebenfalls abgenommen.

Trotz erfolgter Waldkalkung konnten an drei der vier Quarzit-Punkte keine chemischen Veränderungen festgestellt werden.

Die Kohlenstoffvorräte im Quarzit liegen an der unteren Grenze zum mittleren Bewertungsbereich, die Stickstoffvorräte im mittleren Bewertungsbereich. Die Kohlenstoffvorräte haben sich kaum geändert, die Stickstoffvorräte sind gesunken, allerdings nicht signifikant.

Die Quarzite gehören zur Kalkungskulisse und sind aufgrund ihrer geringen Ausstattung an Calcium und Magnesium auch zukünftig in die Kalkungsplanung einzubeziehen.

1.11.9.3 Zechstein/Rotliegendes (2 % der Waldfläche in Hessen)

Die Zechstein-Standorte gehören zu den reicheren Standorten in Hessen.

Die Austauschkapazität der drei BZE II-Punkte auf Zechstein variieren stark. Sie liegen aufsummiert bis 90 cm Bodentiefe bei 400, 760 und 1740 kmol_c/ha und entsprechen dem mittleren bis hohen Bewertungsbereich. Die Basensättigung übersteigt mit 68 % das Mittel für Hessen sehr deutlich. Die Calciumvorräte fallen in die Bewertungsbereiche hoch bis sehr hoch, die Magnesiumvorräte umfassen den Bereich mittel bis mittel-hoch, die Kaliumvorräte sind gering bis mittel-hoch. Die Kohlenstoffvorräte liegen im geringen Bereich, die Stickstoffvorräte im mittleren Bewertungsbereich.

Signifikante Veränderungen gab es zwischen der BZE I und II nicht.

Die Zechsteine gehören nicht zur Kalkungskulisse.

1.11.9.4 Granit (1 % der Waldfläche in Hessen)

Der Granit gehört zu den ärmeren Standorten in Hessen.

Die Substratgruppe Granit kommt bei der BZE II nur mit einem Profil vor. Mit 560 kmol_c/ha liegt hier die Austauschkapazität bis 90 cm im mittel-hohen Bereich.

Die Basensättigung ist gering (9 %). Sowohl die Calcium- als auch die Magnesiumvorräte liegen im gering-mittleren Bewertungsbereich. Der Kaliumvorrat ist mittel.

Die Granite gehören auch künftig zur Kalkungskulisse.

1.12 Humusformen

Insgesamt 43 % der hessischen BZE II-Punkte zeigen die Humusform Mull, wobei der typische Mull nur auf zwei Inventurpunkten vorkommt; weit überwiegend wurde F-Mull kartiert. Der Anteil von BZE II-Punkten mit der Humusform Mullartiger Moder liegt bei 13 %. Dies belegt, dass für mehr als die Hälfte der hessischen Standorte relativ günstige Mineralisierungsbedingungen vorliegen. Typische Moderstandorte haben insgesamt einen Anteil von 26 % (feinhumusarm: 14 %, feinhumusreich: 12 %). Rohhumusartige Humusformen sind auf 17 % der Inventurpunkte festzustellen. Schlechteste Humusformen (typischer Rohhumus und feinhumusreicher Rohhumus) sind auf nur fünf hessischen BZE-Punkten ausgeprägt.

Die durchschnittliche Trockenmasse im Auflagehumus jeweils als Mittel für alle BZE-Punkte in Hessen hat sich von 43,4 t/ha bei der BZE I auf 37,9 t/ha in der BZE II verringert. Im Kollektiv der Schnittmenge beider Inventuren (Auflagehumus in BZE I und BZE II vorhanden) ergibt sich eine Abnahme um 5,7 t/ha.

Im gekalkten Kollektiv finden sich vor allem die Buntsandstein-, Tonschiefer-, Lösslehm- und Grauwacke-Standorte. Hier zeigt sich ein recht hoher und signifikanter Rückgang der Humus-Trockenmasse von 50 auf unter 40 t/ha.

Mit zunehmendem Anteil von Nadelholz steigt die Trockenmasse im Auflagehumus. In den von Laubholz bestimmten Bestandestypen Eiche, sonstiges Laubholz, Buche und Laubmischwald (bis 30 % Nadelholzanteil möglich) liegen die Trockenmassen überwiegend zwischen 10 und 40 t/ha, in den von Nadelholz bestimmten Bestandestypen zwischen 30 und 70 t/ha. Geringe Auflagen mit bis zu 35 t/ha finden sich auf den besser versorgten Standorten des Basalt/Diabas, Zechstein und Lehm, aber auch auf Granit und Grauwacke. Mittlere Trockenmassen zwischen 10-60 t/ha und Mediane um 20 t/ha treten bei den Substratgruppen Tonschiefer, Kalk, Ton(stein) und Lösslehm auf. Die höchsten Werte zwischen 25-85 t/ha finden sich auf den Sanden, Buntsandstein und Quarzit, also den ärmeren Waldstandorten, auf denen die Nadelholzanteile in der Regel höher sind.

Insgesamt zeigt sich ein eher günstiges Bild des morphologischen Humuszustandes. Mit Mull und Mullartigem Moder sind über die Hälfte der Waldböden im hessischen Wald durch relativ gute Mineralisierungsbedingungen und eine gute Bodenbiologie geprägt, die einen Stoffaustausch im Bodenprofil gewährleistet. Neben der großflächigen Bodenschutzkalkung könnten langjährig hohe Stickstoffeinträge, mehr Wärme und die Erhöhung des Laubholzanteils eine Förderung der bodenbiologischen Aktivität bewirkt haben. Auch für Bayern wird im Rahmen der BZE-Auswertungen eine tendenzielle Verbesserung der Humusformen festgestellt (SCHUBERT et al. 2015). In Rheinland-Pfalz dagegen, wo auch viele Waldstandorte

gekalkt wurden, fand zwischen der BZE I und der BZE II nur eine Verschiebung innerhalb der Moderhumusformen statt (BLOCK u. GAUER 2012).

1.13 Status und Veränderung der Kohlenstoffspeicherung in den Waldböden

Kohlenstoff hat für Böden eine Vielzahl wichtiger Funktionen, zu nennen sind die Wasserspeicherkapazität, der Luft- und Wärmehaushalt, die Nährstoffspeicherkapazität, das Puffervermögen und die biologische Aktivität. Darüber hinaus erlangt der Waldboden als Speicher für Kohlendioxid aus der Atmosphäre eine neue 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 CO₂-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 hessischen Daten der BZE I und II in den Nationalen Inventarbericht (National Inventory Report (UBA 2014)) eingegangen.

Die Quantifizierung des Kohlenstoffvorrates in Waldböden ist jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet. Hohe kleinräumige Variabilitäten erschweren eine abgesicherte Quantifizierung. Zudem kann die Vorratsbestimmung durch unterschiedliche Ableitungen der Trockenrohdichten bzw. Skelettgehalte der Böden erheblich beeinflusst werden.

Für das hessische BZE-Kollektiv mit 139 Stichprobenpunkten ergeben sich entsprechend der bundesweiten methodischen Vorgaben zur Durchführung der BZE mittlere Kohlenstoffvorräte von ca. 80 t/ha (Auflagehumus und Mineralboden) zum Zeitpunkt der BZE II. Die Kohlenstoffvorräte sind als gering einzustufen. Trotzdem belegen sie eine langfristige Nettospeicherung. Hessische Waldböden stellen somit eine wichtige Kohlenstoffsенke dar.

MOLDENHAUER (2005) und das HLU (2008) leiteten aus hessischen Bodendauerbeobachtungs- und Naturwaldreservatsflächen Kohlenstoffvorräte für Hessens Waldböden bis 1 m Bodentiefe von rund 160 bzw. 176 t/ha ab. In diesen Studien wurde die Kohlenstoffkonzentration über Tiefenfunktionen aus Bodenprofilen auf diesen Flächen und die Trockenrohdichte aus den Daten der BZE I abgeleitet. Die bei der BZE II für Hessen gemessenen Kohlenstoffkonzentrationen im Mineralboden lagen jedoch deutlich unter den Schätzwerten dieser Studien, vor allem in den Bodenschichten 30-60 und 60-90 cm. Ebenso wurden geringere Trockenrohdichten bei der BZE II als bei der BZE I gemessen, da hier die exaktere

Trockenrohddichte des Feinbodens (statt die des Gesamtbodens) für die Vorratsermittlung Verwendung fand. Darüber hinaus wurde in den genannten Studien der Skelettgehalt des Mineralbodens nicht mit einbezogen, der bei der BZE II ebenfalls als Messwert einging. Würde die BZE II ohne Berücksichtigung des Skelettgehaltes und der Kohlenstoffkonzentrationen aus der Tiefenfunktion mit den Trockenrohddichten aus der BZE I gerechnet, würden sich ebenfalls Kohlenstoffvorräte um 180 t C/ha ergeben. Die Überschätzung der Kohlenstoffkonzentration und der Trockenrohddichte sowie die Nichtberücksichtigung des Skelettgehaltes haben damit zu einer Überschätzung des Kohlenstoffvorrates in Hessens Waldböden um mehr als das Doppelte geführt.

Für Waldböden ist neben der insgesamt im Boden festgelegten Kohlenstoffmenge vor allem die zeitliche Rate der Kohlenstoffspeicherung oder Freisetzung von Interesse. Im Zeitraum 1992 (BZE I) bis 2007 (BZE II) haben die Kohlenstoffvorräte in hessischen Waldböden insgesamt moderat zugenommen. Im Vergleich zur BZE I erhöhten sie sich bis 90 cm Bodentiefe um ca. 4,8 t/ha (6 %), was einer jährlichen Speicherrate in Waldböden von rund 300 kg/ha entspricht.

Über den Zeitraum von nur 15 Jahren ist eine Kohlenstoffverlagerung vom Auflagehumus in den oberen Mineralboden zu beobachten. Der Kohlenstoffvorrat im Auflagehumus hat um 3 t/ha abgenommen. Dies wird aber kompensiert durch Zunahmen im Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe. Unter anderem wird auch für Mecklenburg-Vorpommern bestätigt, dass die Festlegung von Kohlenstoff vor allem in den oberen Tiefenstufen des Mineralbodens (0-30 cm) erfolgt (RUSS et al. 2011).

Sowohl im ungekalkten als auch im gekalkten Kollektiv der hessischen BZE-Punkte verringerten sich die Kohlenstoffvorräte in der Auflage. Auf den gekalkten Flächen zeigte sich dieser Befund deutlicher. Der Abbau von Trockenmasse im Auflagehumus war auf den gekalkten Flächen deutlich größer als auf ungekalkten. Während sich auf ungekalkten Standorten die Kohlenstoffvorräte im Oberboden nicht signifikant verändert haben, sind für das gekalkte Kollektiv bis 30 cm Tiefe deutliche Kohlenstoffanreicherungen festzustellen. Es ist anzunehmen, dass die infolge der Kalkung verbesserte Streuzersetzung bzw. Bioturbation zur Kohlenstoffanreicherung im oberen Mineralboden geführt hat.

Unterhalb von 30 cm gab es keine Unterschiede zwischen dem gekalkten und ungekalkten Kollektiv. Bezogen auf das Gesamtprofil kam es im ungekalkten Kollektiv zu einer geringen Abnahme, im gekalkten Kollektiv jedoch zu einer 10-prozentigen Zunahme der C-Vorräte.

Für Buchenbestände in Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Hessen und Rheinland-Pfalz zeigen auch EVERS et al. (2008) einen durch Kalkung induzierten Auflagehumusabbau, der nicht mit einem Kohlenstoffverlust verbunden ist, da sich der Kohlenstoff im Mineralboden anreichert.

Ein deutlicher Anstieg der Kohlenstoffvorräte im Boden wurde im Rahmen der BZE-Auswertungen auch für Mecklenburg-Vorpommern nachgewiesen, wobei hier der Kohlenstoffvorrat in der Auflage konstant blieb (RUSS et al. 2011). Die Bodenzustandserhebungen in Rheinland-Pfalz belegen eine Abnahme der Kohlenstoffgehalte in der Humusaufgabe bei tendenzieller Kohlenstoffzunahme in den obersten Mineralbodentiefen. Allerdings wurden hier keine signifikanten Abweichungen im Wurzelraum für Kohlenstoff festgestellt (BLOCK u. GAUER 2012). Auch für Bayern konnte im Rahmen der BZE-Auswertungen keine Veränderung des Kohlenstoffvorrats im Mineralboden festgestellt werden (BROSINGER 2010).

Die Ergebnisse von FORTMANN et al. (2012) zur Entwicklung der Bodenvorräte an organischem Kohlenstoff auf den Intensiv-Monitoringflächen 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.

Zusammenfassend geben die bisherigen BZE II-Ergebnisse für Hessen Hinweise auf einen positiven Einfluss der Kalkung auf den Kohlenstoffhaushalt: Zwar wird durch die Waldkalkung der Kohlenstoffabbau im Auflagehumus deutlich angeregt, insgesamt werden jedoch diese Kohlenstoffverluste über Vorratsaufbau im oberen Mineralboden mehr als kompensiert. Die Waldkalkung verbessert demnach die Senkenfunktion für Kohlenstoff in hessischen Waldböden. Sie dient zudem der Stabilisierung der Waldböden.

1.14 Stickstoffvorräte

Stickstoff gilt als ein Schlüsselement in der Biosphäre und ist die quantitativ wichtigste Komponente der Pflanzenernährung (EVERS 1964, MARSCHNER 1986, EICHORN 1995). Vor Beginn des Industriezeitalters 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). In den letzten Jahrzehnten ist jedoch infolge anthropogener Einträge mancherorts eine deutliche Sättigung der Wälder mit Stickstoff erkennbar (ABER et al. 1989). Stickstoff ist somit in zahlreichen Waldökosystemen zu einem wesentlichen Standortfaktor geworden. 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). 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 Nitratbelastung des Grundwassers beitragen und durch vermehrte Lachgasbildung die Ozonschicht schädigen und den Klimawandel antreiben.

Die Stickstoffvorräte im Auflagehumus und bis 90 cm Bodentiefe liegen in den Waldböden Hessens mit durchschnittlich rund 5,9 t/ha (1,7 t/ha bis 12 t/ha) Stickstoff an der unteren Grenze des mittleren Bewertungsbereichs. Der Auflagehumus hat mit 0,6 t/ha Stickstoff dabei einen Anteil von 10 %. Im Vergleich zu den Bundesländern Niedersachsen und Sachsen-Anhalt liegen die Stickstoffvorräte in Hessen etwas niedriger, was, wie beim Kohlenstoff, auf die geringeren Auflage- und Feinbodenvorräte zurückgeführt werden kann.

Der Stickstoffvorrat verringerte sich auf Profilebene zwischen der BZE I und der BZE II um rund 400 kg/ha (7 %). Im Auflagehumus und in den Tiefenstufen 30-60 und 60-90 cm waren die Veränderungen signifikant. Im Auflagehumus verringerte er sich zwischen BZE I und II um 14 %. Damit zeigt sich wie bei den Kohlenstoffvorräten die Tendenz einer Verlagerung der Stickstoffvorräte aus der Humusaufgabe und dem obersten Mineralboden (0-5 cm) in den tieferen Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe. Hierbei gleichen sich die Abnahmen und Zunahmen bis 30 cm Bodentiefe rechnerisch aus. In den tieferen Bodenschichten (30-60 cm) hat der Stickstoffvorrat allerdings ebenfalls abgenommen, sodass die Stickstoffvorräte auf Profilebene seit der BZE I abgenommen haben.

Die Waldkalkung bewirkt im gekalkten Kollektiv eine deutlich stärkere Abnahme der Stickstoffvorräte im Auflagehumus als im ungekalkten Kollektiv. Im Mineralboden sind jedoch die Abnahmen des Stickstoffvorrats an den ungekalkten BZE II-Punkten höher, sodass auf Profilebene die Stickstoffverluste im ungekalkten Kollektiv höher sind als im gekalkten.

Trotz des luftbürtigen Eintrages von anorganischem Stickstoff von ca. 16 kg pro Hektar und Jahr (Buche) bzw. ca. 25 kg pro Hektar und Jahr (Fichte) in der Zeit von 1992-2006 (SCHELER 2015, mdl. Mittl.) haben sich die Stickstoffvorräte auf Profilebene in diesem Zeitraum insgesamt tendenziell verringert. Demgegenüber ergeben modellierte Austragsraten für Stickstoff auf der Basis von Messdaten des Intensiven Monitorings in Hessen Austräge mit dem Sickerwasser von durchschnittlich ca. 12 kg pro Hektar und Jahr für den Zeitraum 1997-2010, wobei die Austragsraten stark variieren. So zeigen sich unter Buche – mit Ausnahme der stickstoffgesättigten Fläche Zierenberg (durchschnittlicher Stickstoffaustrag: ca. 14 kg pro Hektar und Jahr) – nahezu keine Nitratausträge mit dem Sickerwasser. Auf den Fichtenflächen liegen die Stickstoffausträge dagegen zwischen 1,5 kg und 48 kg pro Hektar und Jahr, im Durchschnitt bei 21 kg (KLINCK 2015, mdl. Mittl.). Diese Bilanzierungsansätze sind von großen Unsicherheiten und Variabilitäten beeinflusst. Sie geben aber Hinweise, dass in den meisten hessischen Waldökosystemen eine erhöhte Stickstoffaufnahme durch die oberirdische Biomasse stattfindet bzw. Lachgasemissionen

(N₂O) aus den Waldböden wahrscheinlich sind. In diesem Zusammenhang belegen u. a. Auswertungen für die Stickstoff-Fallstudie Zierenberg, dass im Durchschnitt starker Fruktifikationsjahre (1992 und 1995) auffallend hohe Stickstoffmengen (124 kg/ha) mit der Streu auf Buchenflächen deponiert werden können. Davon waren in diesen Jahren über 40 % in den Bucheckern gebunden (ca. 52 kg/ha Stickstoff) (PAAR u. EICHHORN 2007, unveröffentlicht). Den jährlichen Output mit dem Zuwachs für dieses stickstoffgesättigte Buchenwaldökosystem beziffert EICHHORN (1995) auf ca. 22 kg pro Hektar und Jahr. BLOCK u. MEIWES (2013) berechnen Stickstoffentzüge für Buche und Fichte auf Standorten des Mittleren Buntsandsteins in Rheinland-Pfalz von 12 bzw. 15 kg pro Hektar und Jahr bei Vollbaumnutzung.

Andererseits belegen hohe Stickstoffausträge mit dem Bodensickerwasser, dass in Teilbereichen, insbesondere unter Fichte, Stickstoff nicht mehr vollständig im System gespeichert, sondern in Form von Nitrat ausgewaschen wird. Die Nitratauswaschung ist begleitet vom Austrag basischer Kationen wie Calcium, Magnesium und Kalium und führt damit zur Versauerung der Böden. 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. EICHHORN (1995) unterscheidet vier Phasen der Ökosystementwicklung zunehmend stickstoffgesättigter Buchenwaldökosysteme. In der letzten Phase (ausgeprägte Stickstoffsättigung) sind ganzjährige Nitratpools im Sickerwasser feststellbar.

1.15 C/N-Verhältnis

Die C/N-Verhältnisse verringerten sich zwischen der BZE I und der BZE II im Auflagehumus, in den Tiefenstufen bis 60 cm des Mineralbodens verbesserten sie sich, sodass insgesamt auf Profilebene mit einem C/N-Verhältnis von 14 der mäßige Bewertungsbereich erreicht wird.

Die C/N-Verhältnisse variieren in den Substratgruppen kaum. Sie sind in Laubholzbeständen etwas enger als in Nadelholzbeständen. Unterschiede zwischen gekalkten und ungekalkten BZE II-Punkten bestehen zwar in einzelnen Tiefenstufen, aber nicht auf Profilebene.

2 Kurzportraits der BZE-Punkte („Steckbriefe“)

Andreas Schulze, Uwe Paar, Jan Evers

Mit dem forstökologischen Datenbanksystem ECO der NW-FVA (SCHULZE u. EVERS 2013) lassen sich für jeden BZE-Punkt Kurzportraits automatisiert generieren. Diese „Steckbriefe“ beinhalten aggregierte 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 Unterlegungen stützen sich auf folgende im Bericht verwendeten 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 18 (S. 219) und 19 (S. 220) im Kapitel 7 „Waldernährung“ in diesem Band aufgeführt.

Die Kenngrößen und Grenzwerte für die Einstufung des Auflagehumus und Mineralbodens nach der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) sind in Tabelle 16, Seite 123 im Kapitel 6.5 „Bodenchemische Kenngrößen in Hessen“ zusammenfassend dargestellt (Boden-Analytik I~II in den Kurzportraits). Die Einstufung des Mineralbodens nach Pufferbereichen findet sich in Tabelle 17 auf Seite 184.

Die farbliche Hinterlegung der Vegetations-Trennarten bezüglich des pH(H₂O) richtet sich nach den Ergebnissen des Kapitels 8 „Vegetation“ in diesem Band auf Seite 267.

Nachfolgend wird für die drei am häufigsten vorkommenden Substratgruppen (Buntsandstein, Lösslehm, Basalt/Diabas) jeweils ein Portrait eines BZE-Punktes exemplarisch vorgestellt.

HE10706 SüdwestlicherBuntsandsteinOdenwald, Odenwald

GK 3492000 / 5492000 Bund = 60007, Land_I = 7, Land_II = 10706, EU = -

Landkreis Odenwald, FoA Beerfelden, TK6419, Privatwald

400m NN, Nordost-Exposition, Neigung 12 gon, Klimastufe: obereBuMischWZ

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,3°C | 1113mm (VZ=14,7°C | 434mm), 1980-2010: 8,9°C | 1102mm (VZ=15,6°C | 429mm)

Kalkung: nein, keine

Stammzahl/ha: 220, Grundfläche: 42.6m²/ha

Flächenanteil Verjüngung: 35%, Pflanzenarten: 19

Plot-Info: BofaNr. 128 Störung II: nichtErhoben

Info I: - Info II: -



Bestockung I - II

	I (22.09.1992)	II (13.02.2007)
Bestockungstyp	NadelMisch<30Lb	sonstNadel>70
Bestandesstruktur	einstufig	einstufig
Kronenschluss	geschlossen	locker
Mischungsform	gruppenweise	stammweise_einzeln

Ertragskundliche Aufnahme II

Baumart	Anteil*	Alter*	BHD*	KrAnsatz*	Höhe*	ErKlasse**	HBonität**
	%	2007	cm	m	m	-	-
Rotbuche n=4	18.2	111.0	39.3	17.7 (n=3)	31.6 (n=3)	1,9	28,9
Weißtanne n=17	77.3	111.0	50.1	16.7 (n=3)	31.9 (n=3)	1,3	
Rotfichte n=1	4.5	111.0	61.5	18.2 (n=1)	33.5 (n=1)	1,8	32

erlaubte Probekreis-Entfernungen berücksichtigt

* = Oberschicht, ** = Oberschicht

Blatt-Gehalte II *

Baumart	Ca	Mg	K	P	C	N	C/N	BIMasse
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	-	g
Rotbuche Blatt	2.4874	0.5614	9.3436	1.2153	505.9200	24.4400	20.7	14.3



1sch WTa-Bu-Mb, 111j, WTa mittl-st Bh, mäßig diff, langkronig; mit stw RBU, mittl Bau mh, tw MZW u. SA, vereinz beulig; tw Rbu-Ust (aus Diff), mit Klebästen; im NW vereinz Fi, 111j, stark Bh; dominant, langkronig

* Bewertungsrahmen (Göttlein 2015)	unter Symptongrenze	unter Normalbereich	im Normalbereich	über Normalbereich
------------------------------------	---------------------	---------------------	------------------	--------------------

erzeugt mit ECO-RAST-Aman V1.114 am 04.07.2016 15:29:19, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

Abbildung 1: Kurzportrait des BZE-Punktes 10706 im Odenwald (Substratgruppe Buntsandstein mit sehr geringer Basensättigung, ungekalkt), angelesen aus dem ECO-Datenbanksystem der NW-FVA

(Fortsetzung Abbildung 1)

HE10706 SüdwestlicherBuntsandsteinOdenwald, Odenwald

GK 3492000 / 5492000 Bund = 60007, Land_I = 7, Land_II = 10706, EU = -

Landkreis Odenwald, FoA Beerfelden, TK6419, Privatwald

400m NN, Nordost-Exposition, Neigung 12 gon, Klimastufe: obereBuMischWZ

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,3°C | 1113mm (VZ=14,7°C | 434mm), 1980-2010: 8,9°C | 1102mm (VZ=15,6°C | 429mm)

Kalkung: nein, keine

Standortstyp: Polygon = 4 6 1 3 Punkt = 4 6 1 3

Wasserhaushalt: frisch (Mittelhang, Haupthang)

Trophie: oligotroph - Substrat/Lagerung**: B2.2 (Typ 26, Klasse 12)

Substratgruppe: Buntsandstein (Ton(stein))



Profil-Morphologie I - II

	I (22.09.1992)	II (20.05.2008)
Streuart	Blatt-NadelStreugemisch	Blatt-NadelStreugemisch
Humusform	typischerModer_feinhumusreich	rohhumusartigerModer_feinhumusarm
Humusmenge/-horiz.	60.6t/ha [3.0cm], L-1.0, Of-1.0, Oh-2.0cm	60.6t/ha [5.4cm], L-0.5, Of-2.0, Oh-2.9cm
Bodentyp	Podsol-Braunerde ()	Pseudogley-Braunerde (pseudovergleyt,mäßig_podsol..
forstl. Bearbeitung	keine	nichtErhoben

Boden-Analytik I ~ II

Tiefe	TRD(Fb)	GrobB	nFK	BasSättg	AustKap	AK Ca	AK Mg	AK K	Corg	C/N	pH(H2O)	pH(KCl)
cm	g/cm³	Vol%	(KA5mm)	%	kmol(c)/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	t/ha	-	(DIN-pH)	(DIN-pH)
Auflage	-	-	-	-20.3	~17.9	~34.9	~7.9	~44.0	25.1-23.3	21.6-24.8	3.96-3.81	3.27-2.71
0 - 5	1.12-1.12	1.4-1.4	-11.4	6.6-4.2	32.9-30.1	26.6-7.0	4.4-3.1	11.1-11.6	17.1-13.8	19.4-25.0	3.56-3.77	3.16-3.00
5 - 10	1.22-1.22	2.2-2.2	-11.3	4.7-2.6	33.9-38.0	11.9-4.0	4.8-2.4	11.9-7.8	11.3-9.5	17.3-26.7	3.76-4.02	3.26-3.08
10 - 30	1.20-1.21	12.7-12.8	-40.6	7.7-3.5	81.3-96.7	50.1-14.1	16.7-5.1	50.1-31.7	16.7-23.5	16.0-23.3	4.46-4.29	3.86-3.54
30 - 60	1.35-1.35	13.6-13.6	-57.0	4.9-5.3	171-130	56.0-23.4	14.0-8.5	126-108	17.5-14.0	10.0-13.3	4.26-4.37	3.86-3.92
60 - 90	1.80-1.65	36.6-36.2	-31.6	11.0-5.9	97.4-106	95.8-20.4	27.4-7.4	95.8-103	2.3-5.9	5.0-9.8	4.46-4.38	4.06-3.86
0 - 90	1.45-1.40	19.8-19.6	-151.9	7.0-4.7	416-401	240-68.9	67.3-26.5	295-261	65.0-66.8	13.6-18.7	4.20-4.26	3.76-3.60

AustauschKap wird ggf. aus AKI und AKe kombiniert! - * = AKI zumindest anteilig eingegangen.

Analytik II Gehalte: Prof01_00_05 | Prof01_05_10 | Prof01_100_135 | Prof01_10_28 | Prof01_28_70 | Prof01_70_100 | Sats_L_Sats_Of | Sats_Oh

Analytik II Physik: Prof01_00_05 | Prof01_05_10 | Prof01_10_28 | Prof01_28_70 |

Horizont-Ansprache I

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	LagDichte	GrobB %
001_Aeh (I)	Us	mittel	sehr_gering	5
002_Ae (I)	Su2	mittel	sehr_gering	5
015_Bh (I)	SI2	mittel	gering	7
046_BvSw (I)	SI2	schwach	mitteldicht	10
098_CvSw (II)	SI4	sehr_schwach	dicht	60
143_CvSd (II)	Ts3	keineAngabe	sehr_dicht	40

Horizont-Ansprache II (akt. GwStand: cm)

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	Hauptsubstrat	Stratigraphie
001_Ahe (I)	Su2	stark	Zersatz	Weichsel-Kaltzeit
010_Bhv (I)	SI2	mittel	Zersatz	Weichsel-Kaltzeit
028_Bv (I)	SI2	mittel	Zersatz	Weichsel-Kaltzeit
070_Sd-Cv (II)	SI4	mittel	Zersatz	Pleistozän
100_Cv (III)	SI3	sehr_schwach	Sandstein	Pleistozän
135_Cv (IV)	TI	sehr_schwach	Zersatz	Mittlerer_Buntsandste.



** B2.2: basenärmeresSilikatgestein_lehmig-sandigeDecken

Typ 26: lehmig/schluffig sandige Decken (<=70cm) über basenarmem Silikatgestein

Klasse 12: basenarm und feindbodenreicher

Info Profil II: Pseudogley-Braunerde, podsolig, aus flachem lössarmem, schutführendem Sand

Bewertung (nur BZE II-Wert)	extr gering	sehr gering	gering	mäßig	mittel	mäßig hoch	hoch	sehr hoch	extrem hoch
-----------------------------	-------------	-------------	--------	-------	--------	------------	------	-----------	-------------

erzeugt mit ECO-RASTAmn V1.114 am 04.07.2016 15:29:19, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald-u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 1)

HE10706 SüdwestlicherBuntsandsteinOdenwald, Odenwald

GK 3492000 / 5492000 Bund = 60007, Land_I = 7, Land_II = 10706, EU = -

Landkreis Odenwald, FoA Beerfelden, TK6419, Privatwald

400m NN, Nordost-Exposition, Neigung 12 gon, Klimastufe: obereBumischWZ

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,3°C | 1113mm (VZ=14,7°C | 434mm), 1980-2010: 8,9°C | 1102mm (VZ=15,6°C | 429mm)

Kalkung: nein, keine

Pflanzenarten: 19 (Lage Vegetations-Parzelle abweichend)

**Bodenvegetation II**

Aufnahme: 09.08.2006	Artenzahl	Gesamtdeckung	Summe Deckung
Oberschicht	3	35	35.5
Unterstand	1	60	60.0
Strauch	5	3	4.5
Kraut (h=50cm)	9	1	4.5
Moos	4	2	nicht erhoben
30m-Kreis	3	nicht erhoben	nicht erhoben

Pflanzenliste II: Deckungsgrade nach Vegetationsschichten

(1/1)

German Standard List	Flora Europ.	ökol. Agr.	Oberschicht	Unterstand	Strauch	Kraut	Moos	30m-Kreis
Abies alba	26.001.006		15.0		1.0	0.5		
Fagus sylvatica	36.001.001		20.0	60.0	0.5	0.5		
Picea abies	26.004.001		0.5		2.0			
Pseudotsuga menziesii	26.002.001				0.5			
Pinus strobus	26.007.018				0.5			
Carex pilulifera	199.012.124	II.2a				0.5		
Dryopteris carthusiana	19.003.017	III.2				0.5		
Luzula luzuloides	189.002.022	II.2c				0.5		
Sorbus aucuparia	80.028.002					0.5		
Vaccinium myrtillus	132.018.006	II.1				0.5		
Deschampsia flexuosa	193.074.005	II.2a				0.5		
Quercus spec.	36.004.999					0.5		
Dicranum montanum							x	
Dicranum scoparium	334.011.017	II.1					x	
Plagiothecium laetum v. curvifolium	-FeAl						x	
Polytrichum formosum	385.005.002	II.2a					x	
Calamagrostis arundinacea	193.091.011	II.3a,[e]H2.b]						x
Dryopteris dilatata	19.003.009	III.3						x
Quercus rubra	36.004.001							x

Trennarten bzgl. pH in 0-5cm

Fe	Fe-Al	Al	Al-AT	AT	AT-Si	Si	Si-Ca	Ca
----	-------	----	-------	----	-------	----	-------	----

erzeugt mit ECO-RASTMan V1.114 am 04.07.2016 15:29:20, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Boderzustand

HE26202 Reinhardswald, MitteldeutschesTriasBerg-Hügelland

GK 3540000 / 5716000 Bund = 60091, Land_I = 91, Land_II = 26202, EU = -

Landkreis Kassel, FoA Reinhardshagen, TK4423, Landeswald

260m NN, Südost-Exposition, Neigung 20 gon, Klimastufe: untereBulMischWZ

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,3°C | 771mm (VZ=14,7°C | 333mm), 1980-2010: 8,9°C | 819mm (VZ=15,3°C | 358mm)

Kalkung: ja, 1: Details unbekannt

Stammzahl/ha: 90, Grundfläche: 18.4m²/ha

Flächenanteil Verjüngung: 30%, Pflanzenarten: 19

Plot-Info: BofaNr. 60 Störung II: nichtErhoben

Info I: - Info II: -



Bestockung I - II

	I (18.12.1992)	II (20.11.2006)
Bestockungstyp	Buche>70	Buche>70
Bestandesstruktur	einstufig	einstufig
Kronenschluss	locker	lückig
Mischungsform	Reinbestand	Reinbestand

Ertragskundliche Aufnahme II

Baumart	Anteil [°]	Alter [°]	BHD [°]	KrAnsatz [°]	Höhe [°]	ErKlasse ^{°*}	HBonität ^{**}
	%	2007	cm	m	m	-	-
Rotbuche n=9	100.0	160.0	50.1	24.3 (n=3)	41.9 (n=3)	0,5	34,4

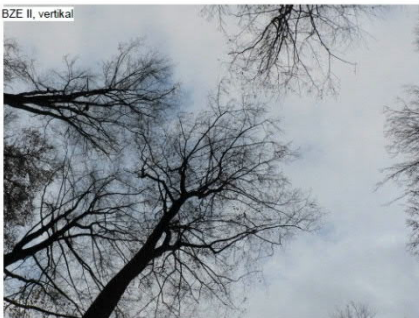
erlaubte Probekreis-Entfernungen berücksichtigt

* = Oberschicht, ** = Oberschicht

Blatt-Gehalte II *

Baumart	Ca	Mg	K	P	C	N	C/N	BIMasse
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	-	g
Rotbuche Blatt	5.1692	0.9740	7.1230	1.0956	537.8000	22.7900	23.6	13.3

BZE II, vertikal



BZE II, nach Nord



1sch RBu-Reinbest, 160j, mittl-st Bh, nach Höhe maß, nach Dm deutl diff, tw Mittel- o d Hochziesel, tw (bo) od gerade, ve alte Krbr bzw Krtr od Schlagschäden sowie KlÄ; i m UST ve RBu aus Diff, ger Bh; klebastig; keine eigene Schicht bildend

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

erzeugt mit ECO-RASTAm V1.114 am 12.07.2016 13:57:50, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald-u. Bodenzustand

Abbildung 2: Kurzportrait des BZE-Punktes 26202 im Reinhardswald (Substratgruppe Lösslehm, gekalkt), ausgelesen aus dem ECO-Datenbanksystem der NW-FVA

(Fortsetzung Abbildung 2)

HE26202 Reinhardswald, Mitteldeutsches Triasberg-Hügelland

GK 3540000 / 5716000 Bund = 60091, Land_I = 91, Land_II = 26202, EU = -

Landkreis Kassel, FoA Reinhardshagen, TK4423, Landeswald

260m NN, Südost-Exposition, Neigung 20 gon, Klimastufe: untereBulmischWZ

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,3°C | 771mm (VZ=14,7°C | 333mm), 1980-2010: 8,9°C | 819mm (VZ=15,3°C | 358mm)

Kalkung: ja, 1: Details unbekannt

Standortstyp: Polygon = 3 4 2 2, 3 4 1 2 Punkt = 3 4 2 2

Wasserhaushalt: betont_frisch (Mittelhang, Hauptang)

Trophie: mesotroph - Substrat/Lagerung**: B3.2 (Typ 27, Klasse 13)

Substratgruppe: Lößlehm (Buntsandstein)



Profil-Morphologie I - II

	I (18.12.1992)	II (02.05.2007)
Streuart	Blattstreu	Blattstreu
Humusform	F-Mull	F-Mull
Humusmenge/-horiz.	13.0t/ha [1.0cm], L~3.0, Of~1.0, Oh~0.0cm	25.7t/ha [4.3cm], L~1.4, Of~2.9, Oh~0.0cm
Bodentyp	Pseudogley-Parabraunerde (I)	Pseudogley-Parabraunerde (vergleyt;nicht_podsolig)
forstl. Bearbeitung	keine	nichtErhoben

Boden-Analytik I - II

Tiefe	TRD(Fb)	GrobB	nFK	BasSättg	AustKap	AK Ca	AK Mg	AK K	Corg	C/N	pH(H2O)	pH(KCl)
cm	g/cm³	Vol%	(KA5)mm	%	kmol(c)/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	t/ha	-	(DIN-pH)	(DIN-pH)
Auflage	-	-	-	-76.0	-7.3	-81.4	-11.1	-19.1	4.4-7.6	25.1-19.0	5.57-4.70	4.85-3.90
0 - 5	0.89-0.89	2.4-2.4	-14.7	31.2-28.2	36.7-32.0	156-114	31.2-23.6	39.9-44.2	19.1-20.8	15.2-16.6	3.96-5.20	3.46-3.93
5 - 10	0.98-0.98	3.2-3.2	-14.0	9.1-7.6	28.2-30.9	24.8-20.7	7.6-5.9	24.8-20.3	7.6-10.9	14.5-19.2	4.26-4.66	3.76-3.42
10 - 30	1.03-1.03	12.9-12.9	-50.8	6.7-4.9	78.5-80.3	35.8-27.1	14.3-4.4	64.5-40.2	17.9-16.1	14.3-18.0	4.56-4.92	4.06-3.82
30 - 60	1.33-1.28	4.7-4.7	-68.4	5.1-6.8	171-135	45.7-45.0	15.2-14.1	152-131	15.2-13.7	8.0-11.5	4.56-4.93	3.96-3.84
60 - 90	1.40-1.40	6.0-6.0	-59.2	4.9-7.4	164-161	47.4-52.9	15.8-29.3	142-164	7.9-7.9	6.7-6.7	4.56-4.80	3.96-3.76
0 - 90	1.24-1.23	6.8-6.8	-207.1	7.5-8.3	478-439	310-259	84.2-77.3	424-399	67.7-69.5	11.1-13.6	4.47-4.87	3.92-3.78

Austauschkap wird ggf. aus AKI und AKe kombiniert! - * = AKI zumindest anteilig eingegangen.

Analytik II Gehalte: Prof01_00_05 | Prof01_05_10 | Prof01_10_35 | Prof01_35_60 | Prof01_60_115 | Sats_L_Sats_Of

Analytik II Physik: Prof01_00_05 | Prof01_05_10 | Prof01_10_35 | Prof01_35_60 |

Horizont-Ansprache I

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	LagDichte	GrobB %
001_Ah (I)	Ut3	stark	mitteldicht	5
035_SAI (I)	Ut4	sehr_stark	dicht	15
065_Bt (II)	Lu	mittel	sehr_dicht	30
090_Cv (III)	Lu	keineAngabe	keineAngabe	60

Horizont-Ansprache II (akt. GwStand: cm)

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	Hauptsubstrat	Stratigraphie
003_Ah (I)	Ut2	stark	Lößlehm	Weichsel-Kaltzeit
035_Sw-AI (I)	Ut2	stark	Lößlehm	Weichsel-Kaltzeit
115_Swd-Bt (II)	Ut4	schwach	Lößlehm	Pleistozän
120_Cv (III)	Stu	keineAngabe	Zersatz	Mittlerer_Buntsandste.

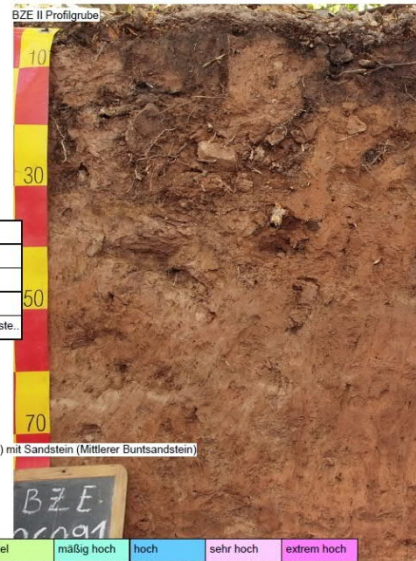
** B3.2: typischerLößlehm_mächtigt

Typ 27: Lößlehm, auch vermisch (>=70cm) über basenarmem Silikatgestein Klasse 13: Löß und Löß(misch)lehme (>70cm)

Info Profil II: (Hang)Pseudogley-Parabraunerde aus lössreichem, grusführendem Schluff (Haupt)

tage) über lössreichem, schufführendem Schluff (Mittellage) über tiefem Schuttlehme (Basislage) mit Sandstein (Mittlerer Buntsandstein)

Info Humus II: Humus=HLUG



Bewertung (nur BZE II-Wert) extr. gering sehr gering gering mäßig mittel mäßig hoch hoch sehr hoch extrem hoch

erzeugt mit ECO-RAST Aman V1.114 am 12.07.2016 13:57:50, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 2)

HE26202 Reinhardswald, Mitteldeutsches Triasberg-Hügelland

GK 3540000 / 5716000 Bund = 60091, Land_I = 91, Land_II = 26202, EU = -

Landkreis Kassel, FoA Reinhardshagen, TK4423, Landeswald

260m NN, Südost-Exposition, Neigung 20 gon, Klimastufe: untereBulmischWZ

Klima-Mittel: 1960-1990: 8,3°C | 771mm (VZ=14,7°C | 333mm), 1980-2010: 8,9°C | 819mm (VZ=15,3°C | 358mm)

Kalkung: ja, 1: Details unbekannt

Pflanzenarten: 19 (Lage Vegetations-Parzelle normal)



Bodenvegetation II

Aufnahme: 01.06.2006	Artenzahl	Gesamtdeckung	Summe Deckung
Oberschicht	1	65	65.0
Unterstand			
Strauch	1	10	10.0
Kraut (h=40cm)	12	20	27.0
Moos	4	1	nicht erhoben
30m-Kreis	3	nicht erhoben	nicht erhoben

Pflanzenliste II: Deckungsgrade nach Vegetationsschichten

(1/1)

German Standard List	Flora Europ.	ökol. Agr.	Oberschicht	Unterstand	Strauch	Kraut	Moos	30m-Kreis
<i>Fagus sylvatica</i>	36.001.001		65.0		10.0	10.0		
<i>Athyrium filix-femina</i>	18.001.001	III.3				0.5		
<i>Calamagrostis epigejos</i>	193.091.001	II.3a,IV.2-3				0.5		
<i>Carex pilulifera</i>	199.012.124	II.2a				0.5		
<i>Dryopteris dilatata</i>	19.003.009	III.3				0.5		
<i>Impatiens noli-tangere</i>	98.001.001	III.4a				0.5		
<i>Juncus effusus</i>	189.001.012	IV.2-3				0.5		
<i>Luzula luzuloides</i>	189.002.022	II.2c				12.0		
<i>Oxalis acetosella</i>	82.001.006	III.2				0.5		
<i>Poa nemoralis</i>	193.016.027	II.3a				0.5		
<i>Rubus fruticosus</i> ag.	080.009.076 DL	.				0.5		
<i>Deschampsia flexuosa</i>	193.074.005	II.2a				0.5		
<i>Atrichum undulatum</i>	385.001.004	II.3b					x	
<i>Dicranella heteromalla</i>	334.008.004	II.1 (II.2a)					x	
<i>Mnium hornum</i>	374.003.004	II.2c					x	
<i>Plagiothecium spec.</i>	383.003.999						x	
<i>Picea abies</i>	26.004.001							x
<i>Rubus idaeus</i>	80.009.007	02,II.3a						x
<i>Salix caprea</i>	31.001.041							x

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

erzeugt mit ECO-RASTMan V1.114 am 12.07.2016 13:57:50, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Boderzustand

HE23301 Knüllgebirge, Mitteldeutsches Triasberg-Hügelland

GK 3524000 / 5644000 Bund = 60069, Land_I = 69, Land_II = 23301, EU = 413

Landkreis SchwalmEder, FoA Neukirchen, TK5022, Landeswald

370m NN, Ost-Exposition, Neigung 9 gon, Klimastufe: obereBuMischWZ

Klima-Mittel: 1960-1990: 7,4°C | 682mm (VZ=13,8°C | 307mm), 1980-2010: 8,0°C | 730mm (VZ=14,7°C | 334mm)

Kalkung: nein, keine

Stammzahl/ha: 110, Grundfläche: 23,0m²/ha

Flächenanteil Verjüngung: 90%, Pflanzenarten: 67

Plot-Info: BofaNr. 88 Störung II: nicht Erhoben

Info I: - Info II: -



Bestockung I - II

	I (01.04.1993)	II (20.12.2006)
Bestockungstyp	Buche>70	Buche>70
Bestandesstruktur	zweistufig	zweistufig
Kronenschluss	licht	räumdig
Mischungsform	truppweise	Reinbestand

Ertragskundliche Aufnahme II

Baumart	Anteil ^a	Alter ^a	BHD ^a	KrAnsatz ^a	Höhe ^a	ErKlasse ^{a*}	HBonität ^{a**}
	%	2007	cm	m	m	-	-
Rotbuche n=11	100.0	141.0	51.0	21.2 (n=5)	38.4 (n=5)	0,8	33,2

erlaubte Probekreis-Entfernungen berücksichtigt

* = Oberschicht, ** = Oberschicht

Blatt-Gehalte II *

Baumart	Ca	Mg	K	P	C	N	C/N	BIMasse
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	-	g
Rotbuche Blatt	9.1826	1.4192	7.4246	1.2204	501.7600	20.6600	24.3	17.6



Zsch Bu-Rb, 141j, st-mittl Bh, maß diff, gerade-(bo), tw langs; tw alte Schtsch, ve StA o Hzr; Kro ve ger o einseit; Ust aus Es sowie tw Bu (zT aus Diff), SWei u ve Vbe, Kir(SW) u BAh(SO), 15-35j, Sth, ve ger (-mittl/Bu) Bh, deutl diff, Es zT m R-Nekr



* Bewertungsrahmen (Göttlein 2015)	unter Symptongrenze	unter Normalbereich	im Normalbereich	über Normalbereich
------------------------------------	---------------------	---------------------	------------------	--------------------

erzeugt mit ECO-RAST-Aman V1.114 am 12.07.2016 13:57:48, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

Abbildung 3: Kurzportrait des BZE-Punktes 23301 im Knüll (Substratgruppe Basalt/ Diabas), ausgelesen aus dem ECO-Datenbanksystem der NW-FVA

(Fortsetzung Abbildung 3)

HE23301 Knüllgebirge, Mitteldeutsches Trias Berg-Hügelland

GK 3524000 / 5644000 Bund = 60069, Land_I = 69, Land_II = 23301, EU = 413

Landkreis SchwalmEder, FoA Neukirchen, TK5022, Landeswald

370m NN, Ost-Exposition, Neigung 9 gon, Klimastufe: obereBuMischWZ

Klima-Mittel: 1960-1990: 7,4°C | 682mm (VZ=13,8°C | 307mm), 1980-2010: 8,0°C | 730mm (VZ=14,7°C | 334mm)

Kalkung: nein, keine

Standortstyp: Polygon = 4 3 3 1, 4 3 1 1 Punkt = 4 3 1 1

Wasserhaushalt: frisch (Oberhang, Haupthang)

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

Substratgruppe: Basalt/Diabas (-)



Profil-Morphologie I - II

	I (01.04.1993)	II (25.07.2007)
Streuart	Blatt-GrasStreugemisch	Blatt-GrasStreugemisch
Humusform	F-Mull	F-Mull
Humusmenge/-horiz.	0.0t/ha [0.0cm], L~2.0, Of~2.0, Oh~0.0cm	20.9t/ha [3.0cm], L~0.6, Of~2.4, Oh~0.0cm
Bodentyp	Braunerde ()	Braunerde (nicht_podsolig)
forstl. Bearbeitung	keine	nichtErhoben

Boden-Analytik I ~ II

Tiefe	TRD(Fb)	GrobB	nFK	BasSättg	AustKap	AK Ca	AK Mg	AK K	Corg	C/N	pH(H2O)	pH(KCl)
cm	g/cm³	Vol%	(KA5mm)	%	kmol(c)/ha	kg/ha	kg/ha	kg/ha	t/ha	-	(DIN-pH)	(DIN-pH)
Auflage	-	-	-	-96.3	~15.2	~227.5	~32.0	~23.2	~7.4	~20.1	~5.71	~5.35
0 - 5	0.96-0.96	3.7-3.7	~14.5	61.4-82.0	44.1-58.3	395-690	66.8-130	65.0-93.5	11.6-21.3	13.2-13.9	4.76-5.43	4.16-4.34
5 - 10	1.05-1.05	1.4-1.4	~13.3	52.0-51.4	42.0-43.6	323-311	56.0-66.3	31.1-42.7	6.2-11.9	12.0-12.8	4.76-5.16	4.16-4.09
10 - 30	1.08-1.08	4.1-4.1	~51.8	90.4-68.8	195-162	2459-1546	613-367	82.8-80.9	12.4-20.7	8.6-10.0	5.26-5.37	4.66-4.09
30 - 60	1.12-1.12	38.9-38.9	~37.6	99.8-86.6	720-608	7699-6984*	3923-29..	362-279*	6.2-9.6	6.0-7.8	6.06-6.18	5.46-4.75
60 - 90	1.30-1.30	41.0-41.0	~26.6	99.7-83.0	831-950	9029-11303*	4446-45..	341-467*	6.9-6.9	7.5-7.5	6.06-6.46	5.36-4.86
0 - 90	1.16-1.16	27.8-27.8	~143.8	96.7-82.4	1832-18..	19906-208..	9105-80..	881-964*	43.3-70.5	9.0-10.5	5.43-5.73	4.82-4.45

AustauschKap wird ggf. aus AKI und AKe kombiniert! -- = AKI zumindest anteilig eingegangen.

Analytik II Gehalte: Prof01_00_05 | Prof01_05_10 | Prof01_10_30 | Prof01_30_40 | Prof01_40_60 | Prof01_60_90 | Sats_I_Sats_OfSats_Oh

Analytik II Physik: Prof01_00_05 | Prof01_05_10 | Prof01_10_30 | Prof01_30_40, Prof01_40_60 |

Horizont-Ansprache I

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	LagDichte	GrobB %
006_Ah (I)	Lu	sehr_stark	gering	5
042_Bv (II)	Lt2	mittel	mitteldicht	15
120_Cv (II)	Tl	sehr_schwach	sehr_dicht	80

Horizont-Ansprache II (akt. GwStand: cm)

Horizont (Schicht)	FbArt	Dwurz(fein)	Hauptsubstrat	Stratigraphie
005_Ah (I)	Ut2	Wurzefilz	Lößlehm	Weichsel-Kaltzeit
040_Bv (I)	Ut3	sehr_stark	Lößlehm	Weichsel-Kaltzeit
060_Bv-Cv (II)	Lt3	stark	Residualton	Pleistozän
120_Cv (III)	Tl	mittel	Residualton	Tertiär

** B6.3: basenreicheSilikalgesteine_mit schluff-/lehmigen-tonigen(Verwitterungs-)Decken
Typ 36: feimbodenreiche Decken (<=70cm) über basenreichem Grundgestein (C3max)
Klasse 15: basenreich und feimbodenreicher

Info Profil II: Braunerde aus lössreichem, grusführendem Schluff (Hauptlage) über grusführendem Ton über Schuttton (Basislage) mit Zersetzung sowie vulkanischem Gestein (Tertiär)
Info Humus II: Humus=Beisecker



Bewertung (nur BZE II-Wert) **ext. gering** **sehr gering** **gering** **mäßig** **mittel** **mäßig hoch** **hoch** **sehr hoch** **extrem hoch**

erzeugt mit ECO-RASTAm V1.114 am 04.07.2016 15:35:49, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 3)

HE23301 Knüllgebirge, Mitteldeutsches Trias Berg-Hügelland

GK 3524000 / 5644000 Bund = 60069, Land_I = 69, Land_II = 23301, EU = 413

Landkreis Schwalm-Eder, FoA Neukirchen, TK5022, Landeswald

370m NN, Ost-Exposition, Neigung 9 gon, Klimastufe: obere BuMischWZ

Klima-Mittel: 1960-1990: 7,4°C | 682mm (VZ=13,8°C | 307mm), 1980-2010: 8,0°C | 730mm (VZ=14,7°C | 334mm)

Kalkung: nein, keine

Pflanzenarten: 67 (Lage Vegetations-Parzelle normal)

**Bodenvegetation II**

Aufnahme: 24.05.2006	Artenzahl	Gesamtdeckung	Summe Deckung
Oberschicht	1	30	30.0
Unterstand	3	20	20.5
Strauch	9	25	27.5
Kraut (h=35cm)	38	60	73.0
Moos			
30m-Kreis	27	nicht erhoben	nicht erhoben

Pflanzenliste II: Deckungsgrade nach Vegetationsschichten

German Standard List	Flora Europ.	ökol. AGr.	Oberschicht	Unterstand	Strauch	Kraut	Moos	30m-Kreis
Fagus sylvatica	36.001.001		30.0	10.0	15.0	1.0		
Fraxinus excelsior	139.004.003			10.0	4.0	0.5		
Sorbus aucuparia	80.028.002	.		0.5	0.5	0.5		
Acer pseudoplatanus	95.001.005				0.5	0.5		
Lonicera periclymenum	164.006.017	II.2b			2.0	8.0		
Prunus avium	80.035.014				0.5	0.5		
Rubus idaeus	80.009.007	02.II.3a			4.0	0.5		
Sambucus nigra	164.001.002	1			0.5			
Sambucus racemosa	164.001.003	1			0.5			
Ajuga reptans	151.001.004	III.4a				0.5		
Alliaria petiolata	68.006.001	1				0.5		
Anemone nemorosa	61.014.001	II.3a				1.0		
Carex sylvatica	199.012.064	II.3b				0.5		
Carex umbrosa	199.012.112	II.3b				0.5		
Circaea lutetiana	123.002.001	III.4a				0.5		
Convallaria majalis	183.042.001	I.3				1.0		
Deschampsia cespitosa	193.074.001	IV.2-3				0.5		
Dryopteris carthusiana	19.003.017	III.2				0.5		
Epiobium angustifolium	123.005.001	01.II.2c				0.5		
Festuca gigantea	193.004.008	III.4a				0.5		
Galium aparine	144.005.132	1				0.5		
Galium odoratum	144.005.010	II.3b				8.0		
Geranium robertianum	83.001.037	2				0.5		
Hypericum hirsutum	109.001.014					0.5		
Impatiens noli-tangere	98.001.001	III.4a				0.5		
Luzula luzuloides	189.002.022	II.2c				3.0		
Melica uniflora	193.040.003	II.3b				5.0		
Milium effusum	193.102.001	II.3a				4.0		
Poa chaixii	193.016.015	ell.2b				6.0		
Poa nemoralis	193.016.027	II.3a				20.0		
Rumex sanguineus	47.008.033	.				0.5		
Scrophularia nodosa	154.008.018	II.3b				0.5		

Trennarten bzgl. pH in 0-5cm

erzeugt mit ECO-RAST Aman V1.114 am 04.07.2016 15:35:49, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, Abt. Umweltkontrolle, SG Wald- u. Bodenzustand

(Fortsetzung Abbildung 3)

HE23301 Knüllgebirge, Mitteldeutsches Trias-Berg-Hügelland

GK 3524000 / 5644000 Bund = 60069, Land_I = 69, Land_II = 23301, EU = 413

Landkreis Schwalm-Eder, FoA Neukirchen, TK5022, Landeswald

370m NN, Ost-Exposition, Neigung 9 gon, Klimastufe: obereBulmischWZ

Klima-Mittel: 1960-1990: 7,4°C | 682mm (VZ=13,8°C | 307mm), 1980-2010: 8,0°C | 730mm (VZ=14,7°C | 334mm)

Kalkung: nein, keine

Pflanzenarten: 67 (Lage Vegetations-Parzelle normal)



Bodenvegetation II

Aufnahme: 24.05.2006	Artenzahl	Gesamtdeckung	Summe Deckung
Oberschicht	1	30	30.0
Unterstand	3	20	20.5
Strauch	9	25	27.5
Kraut (h=35cm)	38	60	73.0
Moos			
30m-Kreis	27	nicht erhoben	nicht erhoben

Pflanzenliste II: Deckungsgrade nach Vegetationsschichten

German Standard List	Flora Europ.	ökol. AGr.	Oberschicht	Unterstand	Strauch	Kraut	Moos	30m-Kreis
<i>Senecio nemorosensis</i> ag.	169.096.017	.				0.5		
<i>Stachys sylvatica</i>	151.016.024	III.4a				0.5		
<i>Stellaria holostea</i>	57.006.006	II.3c				2.0		
<i>Urtica dioica</i>	40.001.006	e01				1.0		
<i>Vicia sepium</i>	81.049.042	eII.4				0.5		
<i>Cardamine bulbifera</i>	68.040.001	eII.4				0.5		
<i>Lamium galeobdolon</i> ag.	151.012.001					0.5		
<i>Quercus spec.</i>	36.004.999					0.5		
<i>Brachypodium sylvaticum</i>	193.045.001	II.4						x
<i>Cardamine impatiens</i>	68.040.028	eIII.4a						x
<i>Carex muricata</i> ag.	199.012.010							x
<i>Carpinus betulus</i>	35.001.001							x
<i>Cerastium holosteoides</i>	057.009.061 DL							x
<i>Cirsium arvense</i>	169.118.060							x
<i>Dactylis glomerata</i>	193.026.001							x
<i>Equisetum sylvaticum</i>	5.001.007	IV.3-4a						x
<i>Frangula alnus</i>	103.004.001	IV.1-2a						x
<i>Geum urbanum</i>	80.017.009	II.4.[e02]						x
<i>Heracleum sphondylium</i>	129.092.005							x
<i>Hypericum perforatum</i>	109.001.054							x
<i>Lapsana communis</i>	169.177.001	.						x
<i>Lathyrus pratensis</i>	81.051.020							x
<i>Oxalis acetosella</i>	82.001.006	III.2						x
<i>Plantago major</i>	163.001.001							x
<i>Poa annua</i>	193.016.001							x
<i>Primula elatior</i>	135.001.002	III.4b						x
<i>Prunella vulgaris</i>	151.021.003							x
<i>Ranunculus repens</i>	61.019.006							x
<i>Salix caprea</i>	31.001.041							x
<i>Stellaria alpine</i>	57.005.007							x
<i>Trifolium pratense</i>	81.057.063							x
<i>Viola reichenbachiana</i>	110.001.015	II.3b						x

Trennarten bzgl. pH in 0-5cm: Fe, Fe-Al, Al, Al-AT, AT, AT-Si, Si, Si-Ca, Ca
 erzeugt mit ECO-RASTaman V1.114 am 04.07.2016 15:35:49, 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 dieser Erde könnte die Menschheit nicht ernährt werden. Dieser vielfältig und mehrschichtig 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 4: 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 Hohlräumssystem, 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 von Wasser, Vegetation, Tier und Mensch zu verschiedenen Bodentypen. Diese Faktoren sind durch Stofftransporte integrativ 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 oft um das Doppelte (FAO 2006). Kohlenstoff kann dabei im Boden in carbonatisch 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 verestigten Wasserversorgung der Waldbestände. In Abhängigkeit von Bodenart und -gefüge können die Folgen von Trockenperioden abgepuffert, Hochwasserspitzen gemildert und die Nachlieferung von Grundwasser ermöglicht werden. Hohe Speicherwirkungen erzielen Böden mit hohen Lehm- und Schluffgehalten, während grobe Sande und Tone deutlich geringere Wassermengen speichern. Auch hohe Stein-(Skelett-)Gehalte vermindern die pflanzenverfügbare Wassermenge. Informationen zur mengenmäßigen Erfassung und Verknüpfung von Niederschlag, Speicherwirkung und Transpiration gibt der Wasserhaushalt eines Gebietes (KÖLLING u. FALK 2010).

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

Besonders in den letzten Jahrzehnten wirkte eine Vielzahl von unterschiedlichen Umweltfaktoren (z. B. Stickstoff-, Säure- und Schwermetalleinträge) auf die Böden ein. Viele Jahrhunderte liefen eher langsame natürliche Prozesse ab, deren Dynamik Flora und Fauna durch Anpassung folgen konnten; dagegen sind die Böden in den letzten Jahrzehnten einer derart schnellen Veränderung ausgesetzt, welche die Anpassungsmöglichkeiten vieler Arten und Standorte potentiell übersteigen kann. Aufgrund der langen Verweildauer von Schadstoffen in Böden und deren Akkumulation können so plötzliche 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 Kontamination 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 als Pflanzennährstoffe zur Verfügung. Die Basensättigung bezeichnet dabei den Anteil der Kationenbelegung der oben aufgezählten basischen Nährelemente an den Austauscherplätzen. 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 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 Produkte von fossilen Energieträgern tragen als Säurebildner durch Pufferreaktionen zur Bodenversauerung bei und können ebenfalls zu einer Auswaschung von basischen Nährelementen führen. Auch der luftbürtige Eintrag von Ammoniak, vor allem aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung, 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. 2010, PAAR 1994). Überhöhte Stickstoffeinträge können zur erhöhten Freisetzung des klimawirksamen und am Ozonabbau beteiligten Spurengases Distickstoffmonoxid (N_2O , Lachgas) führen (HAIDER 1996).

Bei den *Schwermetallen* muss zwischen essentiellen Schwermetallen wie Mangan (Mn), Kupfer (Cu) oder Zink (Zn), die erst in hohen Konzentrationen giftig sind, und toxischen 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 die Verfügbarkeit von Bedeutung, welche 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 sie 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 durch die 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).

Infolge der *Klimaveränderungen* sind Auswirkungen auf den Kohlenstoff-, Stickstoff- und damit den gesamten Nährstoffhaushalt der Wälder wahrscheinlich. Dies betrifft sowohl den unbelebten wie auch den belebten Boden. Die vorhergesagte Erwärmung 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 Gefährdungspotentiale aufzeigen. Auf der Basis dieser Untersuchungen und Ergebnisse sind Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung der Bodenfunktionen ableitbar.

3.2 Geologische und bodenkundliche Verhältnisse in hessischen Wäldern

Uwe Paar, Karl-Josef Sabel, Jan Evers, Thomas Ullrich

3.2.1 Vorherrschende Ausgangssubstrate

In Tabelle 1 ist die Verteilung der Hauptgrundgesteine des hessischen Staats-, Kommunal- und Gemeinschaftswaldes nach GRUNDMANN (2012) dargestellt.

Tabelle 1: Flächenanteile der Hauptgrundgesteine im hessischen Staats-, Kommunal- und Gemeinschaftswald (nach GRUNDMANN 2012)

Grundgestein	Anteil [%]
Unterer u. Mittlerer Buntsandstein	36
Basalt/Diabas	15
Karbonische Grauwacke/Tonschiefer	11
Tonschiefer	10
Sand	7
Quarzit	4
Löss	4
Muschelkalk	3

Betrachtet man für die Hauptaussgangssubstrate (Hauptgrundgesteine) in hessischen Wäldern die lokale Verteilung auf Basis der geologischen Karte Hessens (s. Abb. 5) und der Beschreibung der Wuchsgebiete und Wuchsbezirke nach GAUER u. ALDINGER (2005) (s. Abb. 6 und Tab. 2), so ergibt sich folgender Überblick:

Auf großen Teilen der hessischen Waldfläche finden sich die Ausgangssubstrate des Unteren und Mittleren Buntsandsteins. Schwerpunktmäßig liegt das große osthessische Buntsandsteinvorkommen im mitteldeutschen Trias-Berg- und -Hügelland (Reinhardswald, Kaufunger Wald, Sandsteingebiet Hersfeld/Niederaula), am Ostrand des Vogelsberges (Fulda-/Haune-Bergland), in der Rhön und im Spessart. Das südlichste Buntsandsteingebiet findet sich im Odenwald (Ostteil und zentraler Odenwald). Größere nordwestlich vorkommende Buntsandsteinplatten sind im Burgwald und im Waldeck-Wolfhagener Berg- und Hügelland ausgeprägt (Schwerpunkt Ostteil des Landkreises Waldeck-Frankenberg). Die Bodentypen Braunerden, podsolige Braunerden und basenarme Podsole sind im Bereich der Buntsandstein-Standorte vorherrschend. Als natürliche Waldgesellschaften finden sich hier typische Hainsimsen-Buchenwälder und deren Subtypen. Die Trophie der Buntsandstein-Standorte reicht von oligotroph bis mesotroph.

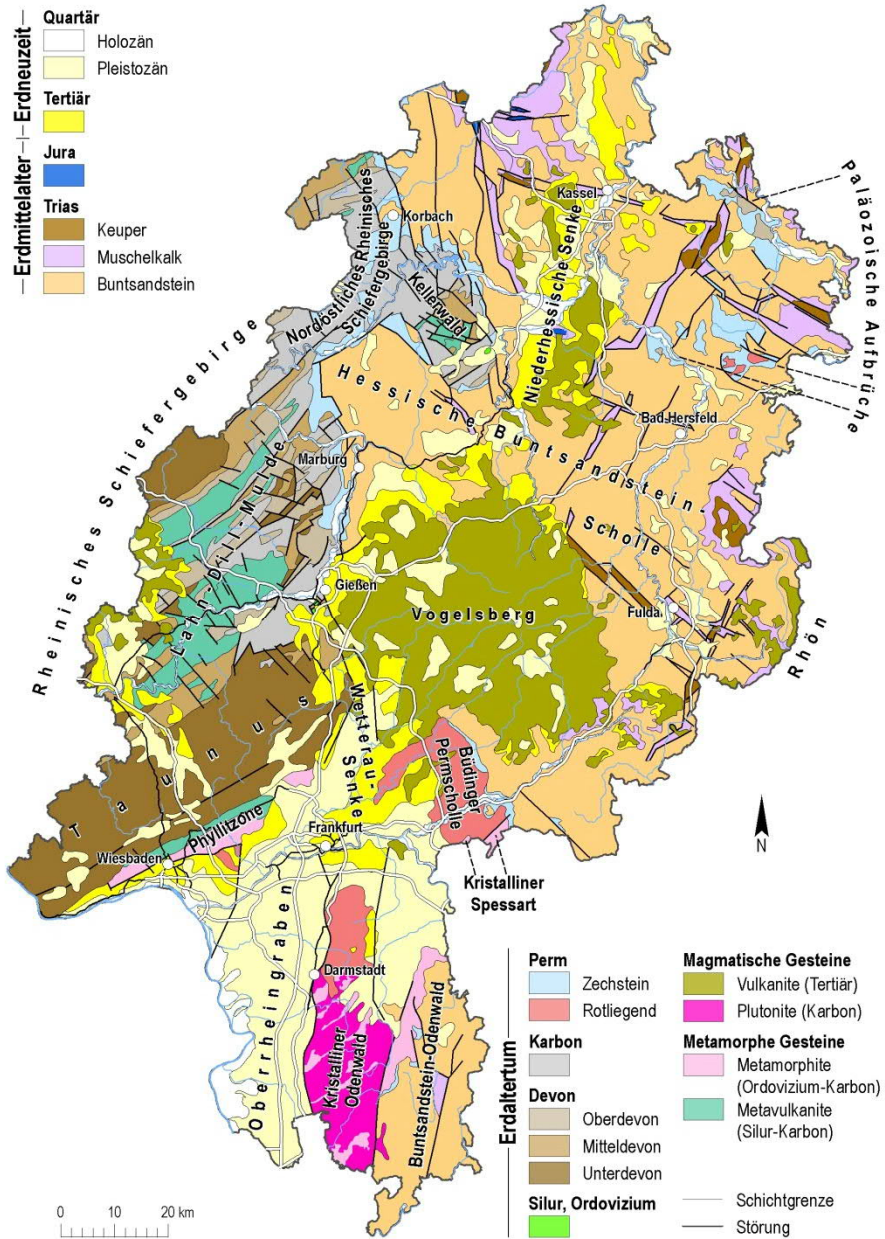


Abbildung 5: Geologische Übersichtskarte von Hessen (1:2 Mio.) (HLUG 2014)

Forstliche Wuchsgebiete

- 37 Mitteldeutsches Trias-Berg- und Hügelland
- 38 Nordwesthessisches Bergland
- 39 Nördliches hessisches Schiefergebirge
- 40 Sauerland
- 46 Mittelrheintal
- 47 Westerwald
- 48 Taunus
- 49 Wetterau und Gießener Becken
- 50 Vogelsberg und östlich angrenzende Sandsteingebirge
- 51 Rhön
- 63 Spessart
- 64 Odenwald
- 65 Oberrheinisches Tiefland und Rhein-Main-Ebene

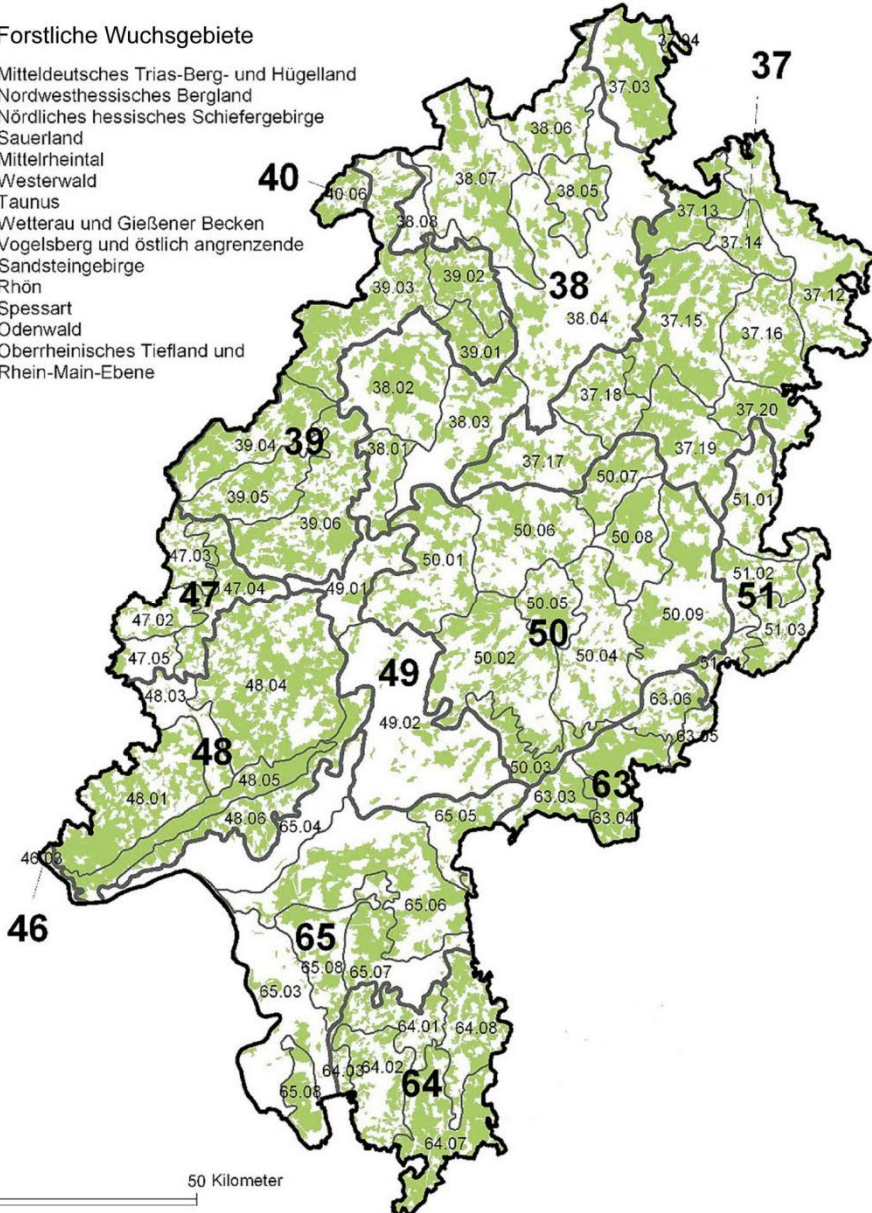


Abbildung 6: Waldökologische Naturräume Hessens – Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke (aus GAUER u. ALDINGER 2005, bearbeitet; ausführliche Legende: s. Tab. 2)

Tabelle 2: Kennziffern Forstlicher Wuchsgebiete und -bezirke in Hessen (s. Abb. 6)

Zahl	Wuchsgebiet	Code	Wuchsbezirk
37	Mitteldeutsches Trias-Berg-und Hügelland	37.03	Reinhardswald
		37.04	Bramwald-Brackenberg
		37.12	Ringgau und angrenzendes Werragebiet
		37.13	Kaufunger Wald
		37.14	Meißner und Vorland
		37.15	Rotenburger und Melsunger Vorland
		37.16	Richelsdorfer Gebirge
		37.17	Schwalm-Bergland
		37.18	Knüllgebirge
		37.19	Sandsteingebiet um Hersfeld/Niederaula
		37.20	Seulingswald
		37.21	Waltershäuser Vorberge
		37.22	Werra-Bergland
37.23	Hainich-Dün		
38	Nordwesthessisches Bergland	38.01	Marburger Lahn-Bergland
		38.02	Burgwald
		38.03	Amöneburg-Neustädter Gebiet
		38.04	Niederhessische Senke
		38.05	Habichtswald
		38.06	Diemelplatten
		38.07	Waldeck-Wolfhagener Berg- und Hügelland
		38.08	Korbacher Kalkgebiet
39	Nördliches hessisches Schiefergebirge	39.01	Kellerwald
		39.02	Wildunger Bergland
		39.03	Östlicher Rothaargebirgs-Ausläufer
		39.04	Südlicher Rothaargebirgs-Ausläufer
		39.05	Westliches Lahn-Dill-Bergland
		39.06	Östliches Lahn-Dill-Bergland
40	Sauerland	40.06	Rothaargebirge/Hochsauerland
46	Mittelrheintal	46.03	Oberes Mittelrheintal
47	Westerwald	47.02	Oberwesterwald
		47.03	Hoher Westerwald
		47.04	Östliches Westerwald-Vorland
		47.05	Nördliches Limburger Becken
48	Taunus	48.01	Westlicher Hinter-Taunus
		48.03	Idsteiner Senke und südl. Limburger Becken
		48.04	Östlicher Hinter-Taunus
		48.05	Hoch-Taunus
		48.06	Südlicher Taunus
49	Wetterau und Gießener Becken	49.01	Gießener Becken und Gießener Schwelle
		49.02	Wetterau und angrenzendes Hügellgebiet

(Fortsetzung Tabelle 2)

Zahl	Wuchsgebiet	Code	Wuchsbezirk
50	Vogelsberg u. östl. angrenz. Sandsteingebiete	50.01	Vorderer Vogelsberg
		50.02	Südwestlicher Vogelsberg
		50.03	Büdingen Wald
		50.04	Hochfläche des östlichen Vogelsberges
		50.05	Oberwald
		50.06	Hochfläche des nördlichen Vogelsberges
		50.07	Östlicher Vogelsberg
		50.08	Schlitzer Bergland
		50.09	Fulda-Haune-Bergland
51	Rhön	51.01	Kuppige Rhön
		51.02	Fuldaer-Rhön-Vorland
		51.03	Hohe Rhön
		51.04	Südrhön
		51.05	Vorrhön
63	Spessart	63.03	Nordwestlicher Spessart
		63.04	Zentraler Hessischer Spessart
		63.05	Hessischer Sinn-Talbereich
		63.06	Oberes Kinzig-Gebiet
64	Odenwald	64.01	Nordwestlicher Odenwald
		64.02	Höhere Lage des kristallinen Odenwaldes
		64.03	Bergstraße
		64.07	Südwestlicher Buntsandstein-Odenwald
		64.08	Nördlicher Sandstein-Odenwald
65	Oberrheinisches Tiefland u. Rhein-Main-Ebene	65.03	Hessische Rheinniederung
		65.04	Main-Taunus-Vorland
		65.05	Hanau-Seligenstädter Senke
		65.06	Untermainebene
		65.07	Nördliches Odenwald-Vorland
		65.08	Hessische Rheinebene

Basaltkuppen in Hessen zeugen von einem lebhaften Vulkanismus im Jungtertiär. Das größte zusammenhängende Basaltgebiet des europäischen Festlandes stellt der Vogelsberg dar. Hier werden Mächtigkeiten der vulkanischen Gesteine von mehr als 300 m festgestellt. Über dem Basalt finden sich quartäre Decken aus Lösslehm, Basaltverwitterungsmaterial und Bims. Weitere nennenswerte Basaltvorkommen finden sich im Westerwald, in der Rhön, im Knüllgebirge, im Habichtswald und im oberen Kinzig-Gebiet. Die Bodentypen dieser Basalt-Standorte sind zumeist nährstoffreiche Parabraunerden und Braunerden. Als Waldgesellschaften finden sich auf diesen Standorten Hainsimsen-Waldmeister-Buchenwälder, Waldmeister-Buchenwälder und Waldgersten-Buchenwälder. Die Trophiestufen dieser Standorte liegen im eutrophen Bereich.

Die Hauptvorkommen der Diabasgesteine liegen zum einen im westlichen Lahn-Dill-Bergland sowie im Norden des Wuchsbezirks Östlicher Hintertaunus. Zumeist finden sich auf diesen Standorten basenreiche Braunerden. Wie auf Basalt sind auch die Diabasflächen durch das Vorkommen von Hainsimsen-Waldmeister-Buchenwäldern, Waldmeister-Buchenwäldern und Waldgersten-Buchenwäldern gekennzeichnet. Die Trophiestufen dieser Standorte liegen im eutrophen Bereich.

Das Hauptvorkommen karbonischer Grauwacken-Standorte liegt im nördlichen hessischen Schiefergebirge und hier insbesondere in den Bereichen Östlicher Rothaargebirgsausläufer (Raum Frankenberg), Wildunger Bergland (Nationalpark Kellerwald-Edersee) und östliches Lahn-Dill-Bergland. Auf diesen Standorten finden sich vor allem Braunerden und podsolige Braunerden. Als natürliche Waldgesellschaft dominiert der Hainsimsen-Buchenwald. Die Standorte sind vorwiegend als mesotroph bis schwach mesotroph zu charakterisieren.

Größere Tonschiefervorkommen in hessischen Wäldern finden sich im Taunus und in den Wuchsbezirken Südlicher Rothaargebirgsausläufer sowie im Rothaargebirge Hochsauerland (Waldecker Upland). Auf den Tonschiefer-Standorten sind zumeist Parabraunerden und Braunerden ausgeprägt. Als natürliche Waldgesellschaften finden sich auf diesen Standorten Hainsimsen-Buchenwälder und Flattergras-Buchenwälder, in geringer Ausprägung sogar Hainsimsen-Waldmeister-Buchenwälder. Die Trophie der Tonschiefer-Standorte kann von schwach mesotroph bis schwach eutroph reichen. Eine Vielzahl der Standorte zeigt mesotrophe Verhältnisse.

Nährstoffarme Terrassen- und Flugsande (i. d. R. unverlehnte bzw. schwach verlehnte Sande) finden sich im Maingebiet und im südlichen Hessischen Ried. Hier sind vorwiegend sandige Bänder-Braunerden ausgeprägt. Natürlich kämen in diesen Standortsbereichen artenarme Buchen- und Eichenwälder vor. Auf den armen Sandböden ist auch ein natürlicher Kiefernanteil im Dünenbereich nicht auszuschließen. Die Standorte werden, wenn nicht kalkhaltig beeinflusst, als mesotroph oder schwach mesotroph eingestuft. In den lehmigeren Hochgestaden haben als standörtliche Besonderheit Ausfällungen von kalkhaltigem Grundwasser Kalkanreicherungshorizonte gebildet, die nährstoffreich sind und als Rheinweiß bezeichnet werden.

Quarzite, gekennzeichnet durch eine große Nährstoffarmut, finden sich u. a. im Taunus, im Kellerwald und im Lahn-Dill-Gebiet. Diese Standorte sind durch podsolige Braunerden bzw. Braunerde-Podsole gekennzeichnet. Als natürliche Waldgesellschaften finden sich auf diesen Standorten Hainsimsen-Buchenwälder bis hin zu Heidelbeer-Traubeneichen/Buchenwälder. Die Trophie kann zwischen schwach mesotroph und oligotroph eingestuft werden.

Nahezu flächendeckend – mit geringer bis mittlerer Ausprägung – überziehen Lösslehmdecken die hessischen Waldstandorte. Nur in Teilbereichen – vornehmlich im Tiefland des hessischen Waldes – finden sich dagegen größere zusammenhängende Einheiten mit mächtigeren Lösslehmdecken, z. B. in der Wetterau, in der

Niederhessischen Senke, im Limburger oder Kasseler Becken, aber auch an der Fulda. Diese Landschaften sind zugleich die bevorzugten Agrargebiete, was ganz wesentlich mit der vergleichsweise hohen Leistungsfähigkeit der Böden aus Löss zusammenhängt. Charakteristische Bodentypen dieser Lösslehm-Standorte sind Parabraunerden und Pseudogleye. Als natürliche Waldgesellschaften sind vorrangig Flattergras-Buchenwälder und Hainsimsen-Waldmeister-Buchenwälder vorkommend. Die Trophie-Einstufungen liegen i. d. R. zwischen gut mesotroph und schwach eutroph.

Die wenigen hessischen Muschelkalk-Standorte finden sich schwerpunktmäßig im Bereich der Diemelplatten, im Ringgau und in der Kuppigen Rhön. Als Bodentypen sind auf diesen Muschelkalken vorwiegend Rendzinen ausgeprägt. Als natürliche Waldgesellschaft kommen in diesen Standortsbereichen Waldgersten-Buchenwälder vor, wobei die Subtypen von der Bärlauch-Variante bis hin zu Seggen- und Blaugras-Buchenwäldern reichen. Die Trophie dieser Standorte ist als carbonat-eutroph einzustufen.

Darüber hinaus kommen im hessischen Wald, wenn auch relativ selten, noch folgende Ausgangssubstrate vor: Rotliegendes (u. a. Nördliches Odenwald-Vorland, Spremlinger Horst, Dreieichenhainer Scholle, Ronneburger Hügelland, Südliche Wetterau), Granit (Kristalliner Odenwald), Hochflutlehm (entlang von Flüssen), Oberer Buntsandstein (u. a. Habichtswald, Rhön, Raum Schlüchtern), Schalestein (Lahn-Dill-Bergland, Lahnmulde, Östlicher Hintertaunus), Kieselschiefer (herzynisches Schiefergebirge), Zechstein (u. a. Werragebiet, Richelsdorfer Gebirge, vom Gladenbacher Bergland Richtung Norden bis in die Gegend von Frankenberg, Nord-Süd- und Ostrand des Kellerwaldes, Raum Korbach nach Norden bis an die Diemel), Ton (tertiäre Tone u. a. Niederhessische Senke, Ostrand des Vogelsberges), Schotter, Diorit (Kristalliner Odenwald), Glimmersandstein, Gabbro (Kristalliner Odenwald), Hornfels, Massenkalk (Lahn-Dill-Gebiet), Melaphyr, Grünschiefer (Taunus), Moor, Phonolith (Rhön), Gneis (Kristalliner Odenwald), Keuper (u. a. Vorderrhön, Ringgau, Wuchsbezirk Meißner und Vorland) und Trachyt (Vogelsberg) (GRUNDMANN 2012).

Die Angaben verdeutlichen, dass mit Ausnahme der Basaltbereiche, der wenigen Diabas- und Kalkgebiete und einiger nur kleinräumig und selten vorkommender Standorte (Hochflutlehm, Oberer Buntsandstein, Schalestein, Zechstein, Ton, Diorit, Gabbro, Melaphyr, Massenkalk) der Wald in Hessen auf Böden stockt, deren geologische Ausgangsgesteine im Bereich der mittleren bzw. schwachen Nährstoffversorgung einzuordnen sind.

3.2.2 Prozesse der Oberbodenbildung

Für die Oberbodenbildung in Hessen sind geologische Prozesse verantwortlich, die vornehmlich im Quartär (die letzten 2,6 Mio. Jahre) stattfanden. So stehen die von den Flüssen sedimentierten Auen- und Hochflutablagerungen, die durch Wind (äolisch) abgelagerten Flugsande und -stäube (Löss, Sandlöss, Flugsand), die vulkanischen Aschen wie die Laacher-See-Tephra und die durch Frostverwitterung entstandenen Schuttdecken (Solifluktsdecken, Lagen) im Vordergrund. Sie können als metermächtige, quasi homogene Sedimente oder als Gesteinsgemische vorliegen, wie die vor allem in den Mittelgebirgen verbreiteten Schuttdecken, in denen sich Beimischungen von z. B. Löss oder Laacher-See-Tephra zumindest noch mineralogisch nachweisen lassen.

Das Quartär umfasst einen Zeitraum der wiederholten Wechsel von Warm- und Kaltzeiten. Gerade während der *Eiszeiten* präsentierte sich Hessen in einem völlig anderen Habitus. Zwar gab es in diesen Zeiten keine Gletscher oder verbreitete Eisdecken, doch ähnelte die Landschaft wegen der niedrigen Temperaturen der heutigen Arktis in Sibirien oder Nordkanada. Der Untergrund war tief gefroren und als Vegetationsform eine Tundra verbreitet. Alljährlich zur Schneeschmelze führten die Flüsse kurzfristig gewaltige Wassermengen, die dann große Gesteinsmassen bewegten, sie zu Blöcken und Kies rundeten und in den heutigen Auen weite Kiesbetten aufbauten. Die anhaltende sommerliche Trockenheit und die stürmischen Winde nahmen den Sand und Staub auf und wehten die Sedimente in die Landschaft. So entstanden flussnah Sanddünenlandschaften wie am Oberrhein, am Odenwaldrand und am Untermain. Der leichtere Staub wurde wesentlich weiter in die Landschaft hineingetragen und zu teilweise metermächtigen Lössdecken angehäuft. Die Mannigfaltigkeit der Flusskiese spiegelt sich auch im Mineralgehalt der Lössen wider, die in der derzeitigen Warmzeit zu nährstoffreichen, tiefgründigen Böden mit vorzüglicher, für die Pflanzen nutzbarer Wasserbevorratung verwitterten. Die ungleich gröberen Flugsande dagegen besitzen nur eine sehr geringe Wasserspeicherfähigkeit und neigen wegen ihres hohen Quarzgehaltes zur mangelnden Tonmineralbildung und zur Versauerung. Sie sind typische Standorte für die tief wurzelnde Kiefer.

In der Osteifel gab es während des Quartärs immer wieder aktiven *Vulkanismus*, aber keiner der Ausbrüche war so intensiv und bedeutsam wie die Explosion, die zur Entstehung des Laacher Sees führte. Er stellt das Maar eines Ausbruchsschlotes einer gewaltigen vulkanischen Explosion vor 12.880 Jahren dar. Riesige Mengen an Bims wurden in der Eifel abgelagert, die leichten Aschen dagegen europaweit verweht. Diese Aschen wurden aber ähnlich wie der Löss zum Großteil wieder abgespült. Vornehmlich im Westerwald und in Mittelhessen, aber auch lokal in den Hochlagen der hessischen Mittelgebirge sind größere Reste erhalten geblieben und bilden ganz eigene Böden. Sie sind sauer, nährstoffarm und werden daher nicht agrarisch genutzt. Die Böden sind jedoch sehr gut wasserversorgt und stellen daher gute Waldstandorte dar.

In den Mittelgebirgen setzt sich das oberflächennahe Gestein bis auf Felsdurchragungen für gewöhnlich aus einem *Gemisch mehrerer Gesteinskomponenten* wie dem Untergrundgestein und den durch den Wind eingetragenen Sedimenten wie Löss und Vulkanasche zusammen. Flugsand wurde kaum in die Bergwelt hineingeweht, Löss allerdings in großen Mengen. Die jährlichen Schneeschmelzen und die Steilheit der Hänge ließen nur eine sehr begrenzte Erhaltung der Flugstäube und Aschen im Gebirge zu. Das anstehende Gestein wurde oberflächennah vom Wechsel von Frost und Tauen zerstört, da ein Teil des Tauwassers in die Risse und Klüfte des Festgesteins eindrang und später wieder gefror (Frostkeilbildung). Mit der Volumenzunahme des Eises wurde das Gestein gesprengt und durch den wiederholten täglichen und jahreszeitlichen Wechsel nach und nach zerrüttet. Bis zur alljährlichen Auftautiefe bildete sich allmählich eine Decke aus Gesteinsschutt über dem unzerstörten Festgestein aus. Das sommerliche Auftauwasser konnte aber nicht in den gefrorenen Untergrund versickern, sondern durchfeuchtete den Schutt, der sich dann ganz langsam hangabwärts bewegte. Parallel dazu konnten auch die vom Wind eingetragenen Löss- oder Aschen, die nicht abgespült wurden, in den Gesteinsbrei eingearbeitet werden. Dieser Prozess ist für die Standortseigenschaft des Bodens von entscheidender Bedeutung. Die vornehmlich groben Gesteinsbruchstücke tragen wenig zur Nährstoffversorgung und Wasserspeicherung bei, der feinkörnige Löss und die Aschen ganz erheblich. Vereinfacht ausgedrückt gilt die Regel: je höher die äolische Komponente, desto ertragreicher der Standort.

Dieser Prozess der *Schuttdeckenbildung* wurde wiederholt durch Klimaveränderungen innerhalb der Kaltzeiten unterbrochen. Vor allem unter feuchteren klimatischen Bedingungen konnte die Schuttdecke abgetragen werden, bevor nach einer erneuten Wandlung des Klimas sich eine neue Schuttdecke ausbildete. Die konkaven Unterhänge waren von der Erosionsgefährdung weniger betroffen, sodass die Schuttdecken der einzelnen Phasen hier übereinander geschichtet erhalten blieben. Je steiler und konvexer die Hänge, desto gravierender der Abtrag des Feinmaterials, aber auch der Schuttdecken selbst.

Wir können in Hessen drei Schuttphasen unterscheiden. Als ältester Schutt liegt basal ein Gesteinsschutt, der keine äolischen Komponenten hat. Offenbar gab es zur Zeit der Bildung dieser *Basislage* keine größeren Staubstürme. Es folgt darüber ein markant lössreicher Schutt, der als *Mittellage* bezeichnet wird, wegen des Lössanteils sehr abtragungsgefährdet ist und daher nur noch in geschützten Reliefpositionen erhalten ist. Die jüngste Schuttbildungsphase erfolgte ganz am Ende der letzten Kaltzeit, deren Weiterentwicklung durch die Wiedererwärmung und das Aufkommen einer dichten Vegetation gestoppt wurde. Wenn kein Abtrag erfolgte, ist diese Schuttdecke als *Hauptlage* praktisch überall verbreitet. Sie enthält Löss, aber auch in Teilbereichen die Aschenreste des Laacher-See-Vulkans, sodass die Bildung der Schuttdecke genau in die kurze Kältephase nach dem Ausbruch, in die *Jüngere Tundrenzeit*, zu datieren ist. Ihre Mächtigkeit beträgt 30-60 cm, was der durchschnittlichen Auftautiefe der damaligen Zeit entsprochen haben muss.

Diese jüngste Lage ist ubiquitär, d. h. in der Regel überall vorhanden und bildet den klassischen Wurzelraum der Vegetation. An Standorten mit noch erhaltener unterlagernder Mittellage sind die Wuchsleistungen in aller Regel aufgrund des vergrößerten Wurzelraums und der verbesserten Wasserspeicherung noch günstiger.

Sehr lokal tritt eine weitere Lage auf, die als *Oberlage* oft durch menschliche Eingriffe in den Naturhaushalt entstanden ist, also nicht unbedingt unter kaltzeitlichem Klima entstand. Sie ist ohne äolische Anreicherung und gerade über quarzreichen Gesteinen wie dem Sandstein extrem versauert und nährstoffarm.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die hessischen Wälder zumeist auf Böden stocken, die sich weniger gut für die landwirtschaftliche Nutzung eignen. Siedlungsgeschichtlich bedingt blieb Wald im Allgemeinen an stärkeren Hanglagen, in Gebieten mit geringmächtigen Schluffdecken im submontanen Bereich und in montanen Lagen, gekennzeichnet durch zunehmende Niederschläge und Fehlen oder Reduzierung von Lösslehmdecken, erhalten (HOCKE 1992).

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

Johannes Eichborn, Uwe Paar, Henning Meesenburg, Jan Evers

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 langfristige 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 Forstliche Umweltkontrolle geht ursprünglich von den Fragestellungen der Genfer Luftreinhaltekonvention (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE 1979)) aus. In deren Mittelpunkt stehen Belastungen der Gesellschaft und des Waldes durch Umweltveränderungen in Folge einer Nutzung fossiler Energieträger, insbesondere im Hinblick auf die damit verursachten Säureeinträge. Das Handwerkszeug zur Erfassung der Säurebelastung geht dabei im Wesentlichen auf die Arbeit von Prof. Dr. 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 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.

- 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* 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 den Waldboden wesentlich vor anthropogenen Säureeinträgen schützt und zum Nährstoffhaushalt der Wälder positiv beiträgt. Das Intensive Monitoring ermöglicht einen viel 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 dem Handbuch Forstliche Analytik (GAFA 2005, 2014) zur Verfügung. Qualitätssichernde und -prüfende Maßnahmen sind danach verbindlich vorgeschrieben. Sie bestätigen die Qualität und die Nutzbarkeit der Ergebnisse.

Das Untersuchungsdesign der Forstlichen Umweltkontrolle in der NW-FVA für die Bereiche Level I, Intensives Monitoring und Experimentalflächen für die Länder Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Bremen und Schleswig-Holstein zeigen die Abbildungen 7 bis 9.

In Hessen umfasst das Level I-Netz 139 Inventurpunkte, das Intensive Forstliche Umweltmonitoring 11 Monitoringflächen und 27 Experimentalflächen. Das hessische Bodendauerbeobachtungsprogramm fällt in die Zuständigkeit des HLNUG (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie); die hessischen Bodendauerbeobachtungsflächen sind daher nicht in der Abbildung 8 dargestellt.

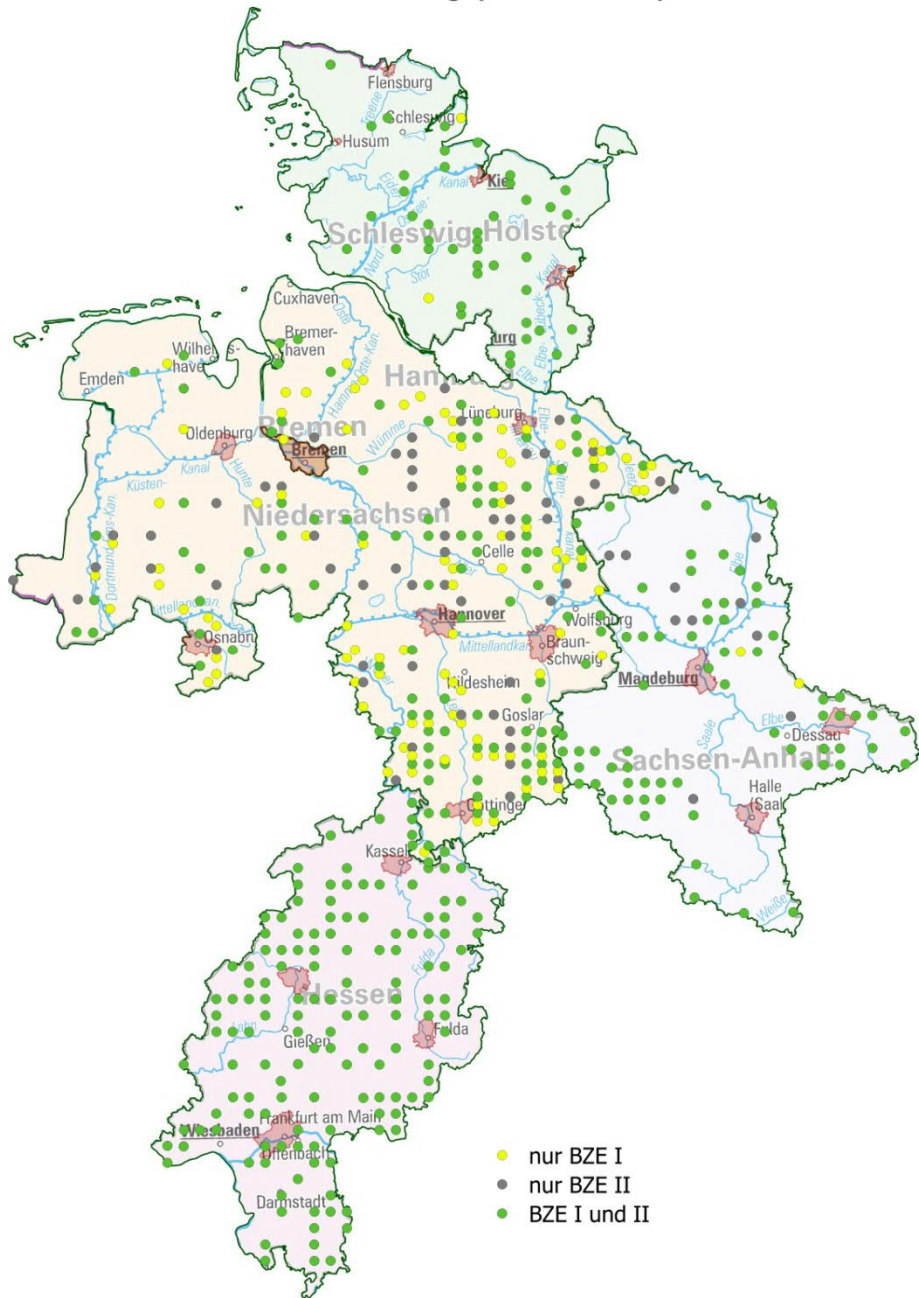


Abbildung 7: Lage der BZE-Punkte in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Bremen und Schleswig-Holstein



Abbildung 8: Lage der Flächen für das Intensive Monitoring in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein



Abbildung 9: Lage der Experimentalflächen in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein

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

Henning Meesenburg, Uwe Klinck, Birte Scheler, Bernd Abrends, Uwe Paar

3.4.1 Stoffeintrag – Belastungssituation der Wälder

Nachfolgend werden einige wesentliche Ergebnisse des Forstlichen Umweltmonitorings hinsichtlich der Entwicklung der Stoffeinträge, chemischer Bodenveränderungen und Stoffbilanzen am Beispiel von Fallstudien dargestellt. Diese Befunde sind von besonderer Wichtigkeit für die Bewertung und Einordnung der BZE-Ergebnisse.

Die europaweit längste Zeitreihe der atmosphärischen Deposition in einen Fichtenbestand besteht für den Solling (Niedersachsen) und liegt im Zuständigkeitsbereich der NW-FVA. Der Solling, ein durch Buntsandstein geprägtes Mittelgebirge in Südniedersachsen, ist mit hessischen Mittelgebirgen in Nord- und Osthessen wie Reinhardswald, Kaufunger Wald (sog. Sollinggewölbe), Sandsteingebiet Hersfeld/Niederaula, dem Ostrand des Vogelsberges (Fulda-/Haune-Bergland), Teilen der Rhön und des Spessart sowie im Süden mit dem Odenwald unmittelbar vergleichbar.

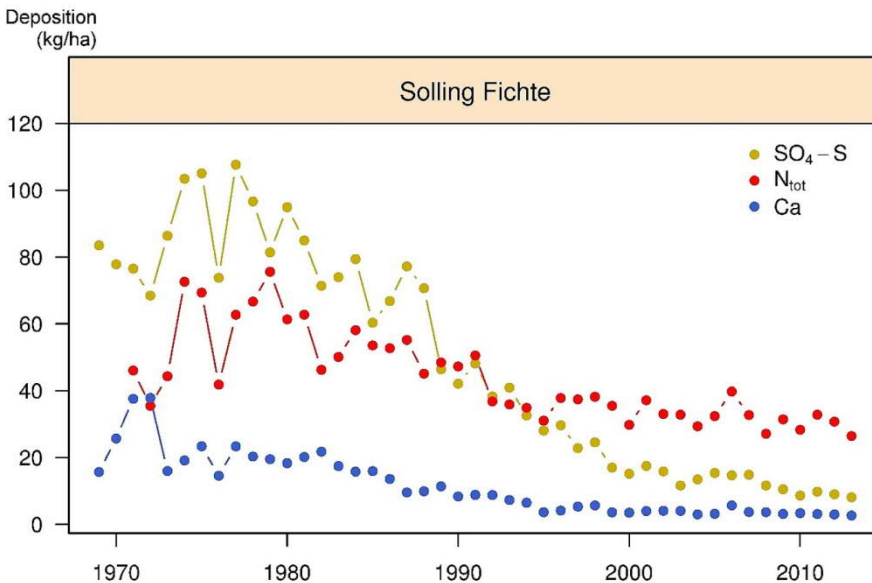


Abbildung 10: Zeitliche Entwicklung der atmosphärischen Deposition von Schwefel, Stickstoff und Calcium [kg/ha] in einem Fichtenbestand im Solling

Die Phase höchster Schwefelbelastungen (s. Abb. 10; SO₄-S; gelbe Linie) hat ihr Maximum in den 1970er-Jahren des letzten Jahrhunderts erreicht. Aufgrund der Erfolge von Maßnahmen der Luftreinhaltung nahmen diese seit Mitte der 1970er-

Jahre ab, besonders deutlich in den 1980er-Jahren. Heute liegen die Werte etwa noch bei einem Zehntel der damaligen Belastungen.

Demgegenüber zeigt sich für Stickstoff (s. Abb. 10; Summe aus Nitrat- und Ammonium-N, N_{tot} ; rote Linie) ein anderer zeitlicher Verlauf. Zwar verringerte sich die Deposition von versauernd wirkendem Stickstoff, die Werte verbleiben aber noch auf einem hohen Niveau. Ausgehend von etwa 50 kg pro Hektar und Jahr Anfang der 1970er-Jahre werden nunmehr etwa 30 kg pro Hektar und Jahr gemessen.

Zu beachten und in der Diskussion um die positive Wirkung der Reduktion von Säureeinträgen infolge der Luftreinhaltemaßnahmen oft wenig berücksichtigt ist zudem, dass die Deposition von Calcium (s. Abb. 10; Ca; blaue Linie), das ökosystemar dem Säureeintrag gegenübersteht und entlastend wirkt, durch die Luftreinhaltemaßnahmen ebenfalls stark reduziert wurde.

Sowohl für die Säureeinträge als auch für die Stickstoffeinträge gilt, dass die Critical Loads (GAUGER et al. 2002) bis heute für die Mehrzahl der Standorte immer noch weit überschritten sind.

Im Rahmen des Programms „Waldbelastung durch Immissionen“ (heute Wald-ökosystemstudie Hessen) wurde 1984 mit der Erfassung der Stoffeinträge mit dem Niederschlag in Fichten- und Buchenbeständen begonnen. Die Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Stoffeinträge stützt sich auf die Auswertung der 30-jährigen Zeitreihen in Königstein (Fichte) und Krofdorf (Buche) sowie der 27-jährigen Zeitreihen in Fürth (Fichte und Buche) und im Spessart (Buche) (s. Abb. 11 bis 13).

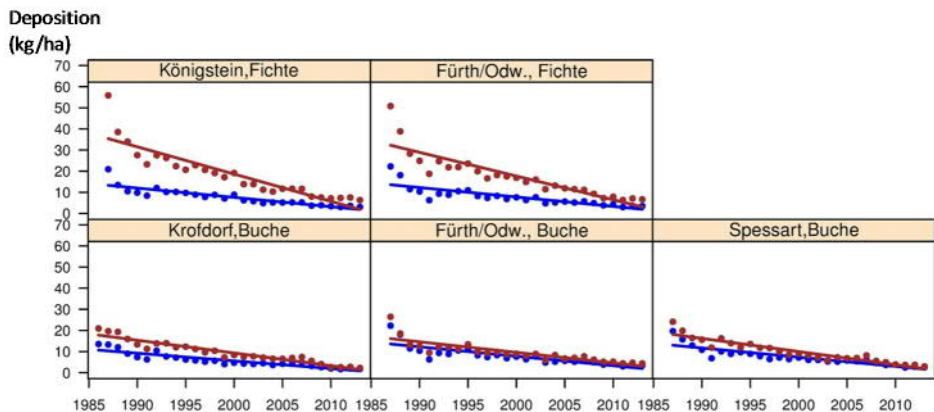


Abbildung 11: Sulfatschwefeleintrag in kg je Hektar und Jahr (rot: Gesamtd deposition im Bestand, blau: Freiland, durchgezogene Linie: signifikanter Trend)

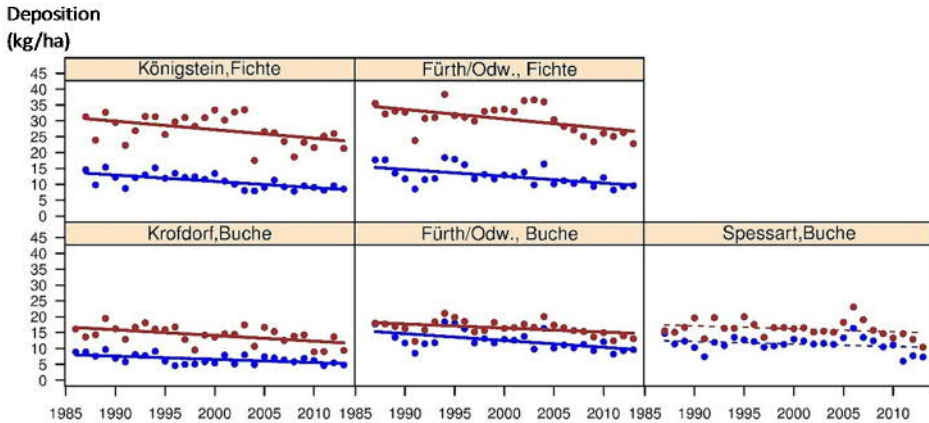


Abbildung 12: Stickstoffeintrag ($\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) in kg je Hektar und Jahr (rot: Gesamtdeposition im Bestand, blau: Freiland, durchgezogene Linie: signifikanter Trend, gestrichelte Linie: kein signifikanter Trend)

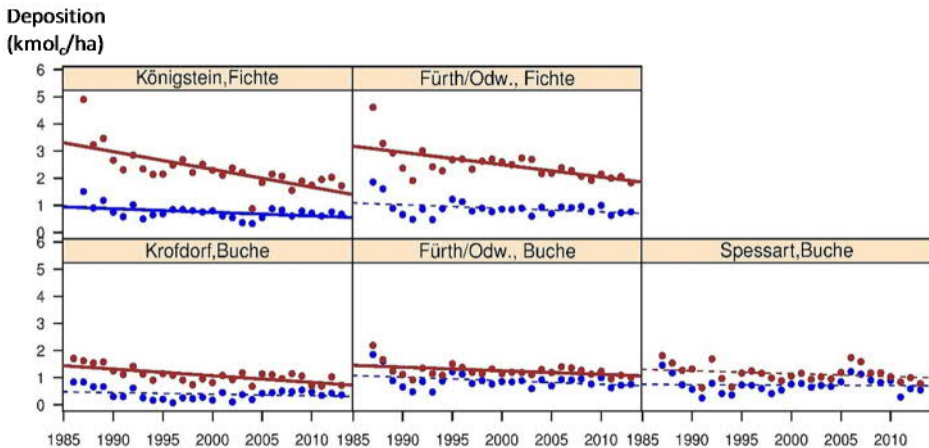


Abbildung 13: Gesamtsäureeintrag in kmol (nach GAUGER et al. 2002) je Hektar und Jahr (rot: Gesamtdeposition im Bestand, blau: Freiland, durchgezogene Linie: signifikanter Trend, gestrichelte Linie: kein signifikanter Trend)

Der Gesamtsäureeintrag berechnet sich als Summe der Gesamtdeposition von Nitrat, Ammonium, Sulfat und Chlorid abzüglich der mit dem Niederschlag eingebrachten Basen Calcium, Magnesium und Kalium (jeweils nicht seesalzbürtige Anteile; GAUGER et al. 2002).

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 Freiland liegen deshalb regelmäßig unter denen im Bestand. Aufgrund der ganzjährigen Benadelung im Vergleich zu Buche, die im Winter unbelaubt ist, sind die Einträge in Fichtenbestände höher als die in Buchenbestände.

Da die hessischen Zeitreihen erst 1985 beginnen, dienen die bereits bis dahin abgelaufenen höheren Belastungen der davor liegenden 20 Jahre aus dem Solling als Beispiel für die Entwicklung in Hessen.

Die Analyse der Stoffeinträge zeigt eine extrem hohe Belastung der Waldökosysteme durch anthropogen bedingte Stoffeinträge, insbesondere von Schwefel und Stickstoff, Mitte/Ende der 1970er-Jahre. Durch die seit Mitte der 1980er-Jahre ergriffenen Maßnahmen zur Luftreinhaltung sowie den Zusammenbruch der Kohlewirtschaft der ehemaligen DDR sind die Emissionen von Schwefeldioxid in Deutschland seit dem Auftreten der neuartigen Waldschäden in erheblichem Umfang zurückgegangen. Infolge des Rückgangs der Emissionen ging der Schwefeleintrag in Wälder stark zurück. Im Vergleich zu den Jahren 1987/88 betrug der Rückgang des Schwefeleintrags unter Buche zwischen 80 und 89 % und unter Fichte 85 %.

Zugleich ist aber festzustellen, dass sich im selben Zeitraum die Gesamtdosition von anorganischem Stickstoff lediglich gering reduzierte, und zwar unter Fichte zwischen 23 % (Königstein) und 33 % (Fürth) und unter Buche zwischen 27 % (Fürth) und 33 % (Krofdorf). Da die Stickstoffeinträge nach wie vor den nachhaltigen Stickstoffbedarf der Waldbäume teilweise erheblich überschreiten, kommt es zu einer weiter fortschreitenden Stickstoffsättigung der Wälder, die den Stoffhaushalt von Wäldern großflächig und tiefgreifend verändert und zu Bodenversauerung, Nährelementverlusten und -imbilanzen sowie Änderungen des Wuchs- und Konkurrenzverhaltens von Bestand und Bodenorganismen führen kann (EICHHORN 1995, DISE et al. 1998, GUNDERSEN et al. 1998, ROTHE et al. 2002, BERNHARDT 2005). Internationale Langzeit-Monitoring-Programme stützen die Befunde (BORKEN u. MATZNER 2004).

3.4.2 Indikatoren der Azidität von Waldböden

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 reichen 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 Beispiele für resiliente Eigenschaften von Waldböden.

Eng verbunden mit den Pufferbereichen ist die Basensättigung. Für eine Intensivmessfläche im Harz liegt eine der längsten Zeitreihen zu bodenchemischen Veränderungen vor. Die Ergebnisse der seit Anfang 1970 durchgeführten Bodeninventuren lassen erkennen, dass atmosphärische Säureinträge innerhalb weniger Jahrzehnte zu deutlich veränderten chemischen Bedingungen der Bodenfestphase führten.

In der Abbildung 14 sind die Werte der Basensättigung in Abhängigkeit von der Mineralbodentiefe für fünfmalige Bodeninventuren seit dem Jahr 1974 dargestellt. Deutlich wird, dass die Basensättigung seit 1974 – innerhalb von nur drei Jahrzehnten – nicht nur im Oberboden, sondern auch im Unterboden deutlich abgenommen hat. Unter Annahme einer Grenze von 20 % Basensättigung für den Beginn des Aluminium-Pufferbereiches sind seit der zweiten Inventur alle Bodentiefen diesem Pufferbereich zuzuordnen. Austauschbares Aluminium steht für eine hohe ökosystemare Belastung für Bäume, Flora und Fauna bei gleichzeitig stark reduzierten Nährstoffgehalten im System.

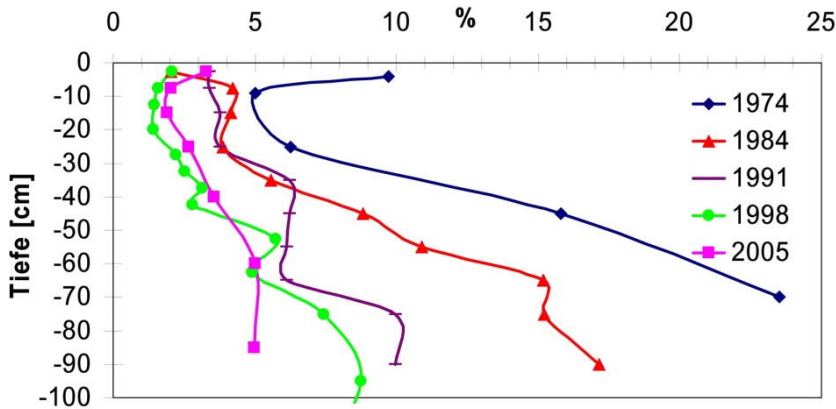


Abbildung 14: Veränderung des Tiefengradienten der Basensättigung im Mineralboden für eine podsolierte Braunerde (Harz) Mitte der 1970er-Jahre bis heute (nach MÜLLER et al. 2016)

3.4.3 Stoffbilanzen ausgewählter hessischer Intensivmonitoringflächen

Auf Intensivmonitoringflächen des internationalen Level II-Programms im Rahmen von ICP Forests besteht die Möglichkeit, die über rasterbezogene Inventuren abgeleiteten Erkenntnisse über den Zustand des Waldbodens exemplarisch validieren zu können. Hier liegen langjährige Messreihen aller relevanten Ein- und Austräge vor, welche zur Berechnung einer bodenbürtigen Stoffbilanz erforderlich sind. Bei gleichzeitiger Kenntnis über die Höhe der pflanzenverfügbaren Bodenvorräte im effektiven Wurzelraum ist die Bewertung verschiedener Nutzungsintensitäten möglich. Eine standortgerechte Waldnutzung entnimmt im Regelfall als Derbholznutzung nur begrenzt Nährstoffe. Wichtige Nährstoffe sind in den schwächeren Holzsortimenten wie Ästen und Rinden um ein vielfaches höher als im Derbholz ohne Rinde (JACOBSEN et al. 2003). Eine zusätzliche Entnahme von Ästen, Zweigen und Nadeln bei Vor- und Endnutzungen – wie dies im Fall einer Vollbaumnutzung geschieht – führt deshalb zu deutlich erhöhten Nährstoffentzügen (BRAUN et al. 2009).

Die Berechnung der Calcium-, Kalium-, Magnesium- und Stickstoff-Bilanzen erfolgte für den 20-jährigen Zeitraum von 1989-2008, der an den Abstand zwischen

BZE I und BZE II angelehnt ist. Berücksichtigung fanden die Mediane der Jahresstoffflüsse von atmogener Gesamtdeposition und Sickerwasseraustrag unterhalb der durchwurzelten Zone. Die Verwitterungsraten im Boden und die Nettonährstoffaufnahme des Bestandes wurden für den Zeitraum der Betrachtung als konstant angenommen. Generell bestehen bei derartigen Bilanzierungen Unsicherheiten bei der Abschätzung der einzelnen Teilgrößen (HODSON et al. 1996, SVERDRUP et al. 2006), weshalb die über Fehlerfortpflanzung hergeleiteten Standardfehler ebenfalls abgebildet sind. Die Stoffbilanzen werden als eindeutig positiv bzw. negativ angesehen, wenn die dazugehörigen Standardabweichungen im jeweiligen Wertebereich verbleiben.

Exemplarisch ausgewählt wurden ein gut nährstoffversorgter Buchenbestand auf Basalt (Zierenberg, Buche: Level II-Nr. 606, 160 Jahre, Ertragsklasse (EKL) I,7), weiterhin drei mesotrophe Bestände auf Buntsandstein, von denen einer ebenfalls mit Buche bestockt ist (Witzenhausen, Buche: Level II-Nr. 612, 161 Jahre, EKL II,1) und zwei mit Fichte (jeweils 92 Jahre, EKL I,4) in einer gekalkten (Witzenhausen, Fichte, gekalkt: 3 t je Hektar, 55 % CaCO_3 , 40 % MgCO_3 in 1993 per Hand ausgebracht) und einer ungekalkten Variante (Witzenhausen, Fichte, ungekalkt). Die Altersangaben beziehen sich jeweils auf das Jahr 2015. Der auf allen vier Fallstudien vorherrschende Bodentyp ist die Braunerde, die klimatischen Rahmenbedingungen der Flächen sind nahezu gleich.

Bei allen Nutzungsintensitäten waren die Calcium-Bilanzen in Zierenberg, Buche (s. Abb. 15, links oben) negativ und die Kalium-Bilanzen positiv (+27 kg je Hektar und Jahr bei Derbholznutzung). Die Magnesium-Bilanzen zeigten bei den Medianen einen positiven Trend, unter Berücksichtigung der Bilanzierungsunsicherheiten (Standardabweichung), jedoch keine eindeutig positive bzw. negative Richtung. Gleiches galt für die Stickstoff-Bilanzen unter Nutzung. Aufgrund der guten Nährstoffversorgung (Basalt mit Lösslehm) kann der Standort als unproblematisch hinsichtlich unterschiedlich intensiver Nutzungen eingestuft werden. Die aus Bodeninventuren abgeleiteten pflanzenverfügbaren Bodenvorräte im effektiven Wurzelraum sind als mittel (0,6 t/ha Kalium) bis hoch (12,6 t/ha Calcium, 4,1 t/ha Magnesium) einzustufen (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003).

Der schlechter nährstoffversorgte Buntsandstein-Standort Witzenhausen, Buche (s. Abb. 15, rechts oben) wies bei allen Nutzungsintensitäten positive Magnesium- und Stickstoff-Bilanzen (+5 kg Mg je Hektar und Jahr bzw. +10 kg N je Hektar und Jahr bei Derbholznutzung) auf. Die Calcium- und Kalium-Bilanzen waren bei Nutzungsverzicht positiv, unter Nutzung jedoch ohne eindeutige Richtung oder gar negativ (Kalium-Bilanz bei Vollbaumnutzung), was eine Intensivierung der Nutzung über das Derbholz mit Rinde hinaus als nicht ratsam erscheinen lässt.

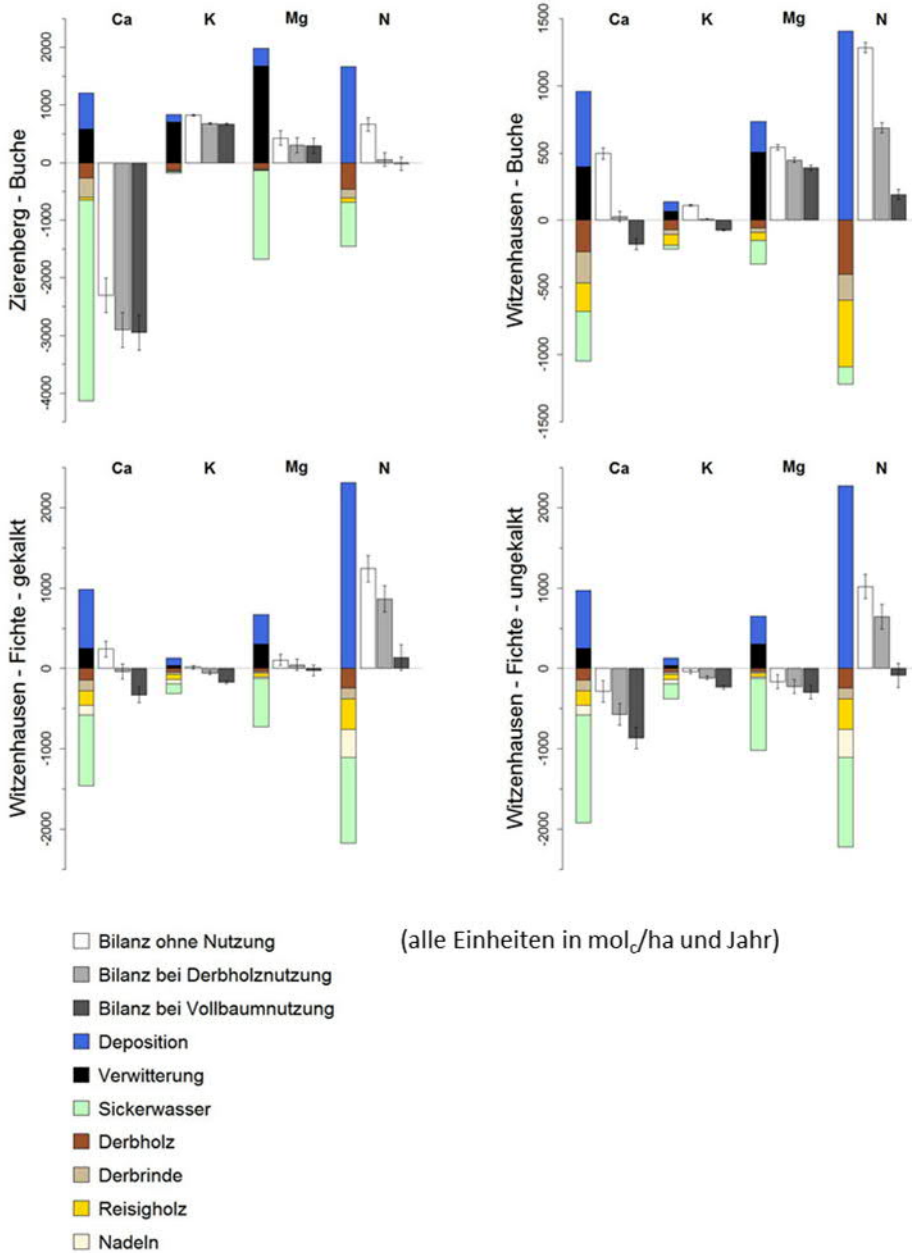


Abbildung 15: Stoffbilanzen von vier Level II-Flächen, Mediane ± Standardfehler [mol_e/ha und Jahr], Zeitraum: 1989-2008

Im mit Fichte bestockten Pendant dazu (Witzenhausen, Fichte, ungekalkt, s. Abb. 15, rechts unten) zeigten die Bilanzen zwar im Median Trends, die aber unter Berücksichtigung der Bilanzierungsunsicherheiten (Standardabweichung) i. d. R. keine eindeutig positive bzw. negative Richtung hatten. Positiv auch unter Berücksichtigung der Bilanzierungsunsicherheiten war allein die Stickstoff-Bilanz bei Nutzungsverzicht, während die Calcium-Bilanz bei Vollbaumnutzung und die Kaliumbilanzen unter Nutzung negativ ausfielen.

Geringfügig besser schnitt die gekalkte Variante (Witzenhausen, Fichte, gekalkt, s. Abb. 15, links unten) ab, bei der unter Berücksichtigung der Bilanzierungsunsicherheiten (Standardabweichung) nur noch die Kalium-Bilanz bei Vollbaumnutzung negativ auffiel. Gleichzeitig war auch die Stickstoff-Bilanz bei Derbholznutzung positiv (+12 kg je Hektar und Jahr). Im Gegensatz zu den drei anderen Fallstudien liegen für diesen Bestand aber nur Messwerte der Stoffkonzentrationen im Bodenwasser vor, weshalb der Unterschied zur ungekalkten Variante einzig in den Sickerwasserausträgen besteht und demnach diese Bilanzen zurückhaltend gedeutet werden sollten. Die aus Bodeninventuren abgeleiteten pflanzenverfügbaren Bodenvorräte im effektiven Wurzelraum sind für die Standorte Witzenhausen-Buche und Witzenhausen-Fichte (ungekalkt) als gering einzustufen (nach AK STANDORTSKARTIERUNG 2003): 0,1 t/ha Magnesium auf beiden Flächen; 0,3 t/ha Calcium und 0,3 t/ha Kalium auf der Buchenfläche bzw. 0,4 t/ha Calcium und 0,5 t/ha Kalium auf der Fichtenfläche; keine Werte für die Fläche Witzenhausen-Fichte (gekalkt).

Es ist ersichtlich, dass die Interpretation der Stoffbilanzen je nach Standort, Baumart, Kalkungskulisse, Element, Intensität der Nutzung und Historie der Stoffeinträge zu sehr differenzierten und daher nur schwer verallgemeinerbaren Aussagen führt. Zudem unterscheiden sich die wichtigsten Teilgrößen der Bilanz je nach Element (Calcium: Nettonährstoffaufnahme, Kalium: Verwitterung, Magnesium: Sickerwasseraustrag, Stickstoff: atmogene Gesamtdeposition). Negative Stoffbilanzen sind i. d. R. auf einen entsprechend hohen Sickerwasseraustrag unterhalb der durchwurzelten Zone bei vergleichsweise nur geringer Nachlieferung aus der Verwitterung zurückzuführen. Aus diesem Grund zeigt ein großer Teil der basenarmen deutschen Waldstandorte auch negative Calcium-Bilanzen (BLOCK et al. 2013, PRETZSCH et al. 2013).

3.4.4 Zusammenfassung der Befunde des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings

Die Hauptergebnisse zum Stoffeintrag belegen den deutlichen Rückgang des Gesamtsäureeintrags in hessische Wälder für den Zeitraum der letzten Jahrzehnte. Diese Entlastung ist zu großen Teilen auf die erfolgreiche Reduzierung des Schwefeleintrags zurückzuführen. Trotz des Rückgangs übersteigt aber auch aktuell der Säureeintrag das nachhaltige Puffervermögen basenarmer Waldböden durch Verwitterung, insbesondere unter Fichte, erheblich.

Veränderungen des Tiefengradienten der Basensättigung in der Festphase des Mineralbodens für eine podsolierte Braunerde (Harz) zeigen für eine Fallstudie, dass die Basensättigung seit 1974 – innerhalb von nur drei Jahrzehnten – nicht nur im Oberboden, sondern auch im Unterboden deutlich abgenommen hat.

Darüber hinaus belegen Stoffbilanzen für nicht gekalkte Intensivflächen des Forstlichen Umweltmonitorings, dass bereits normale Derbholznutzungen zu negativen Nährstoffbilanzen, insbesondere für Calcium, führen können.

Die aufgezeigten, exemplarisch ausgewählten Hauptergebnisse aus dem Bereich des Intensiven Monitorings sind wichtige Basislinien für die Einordnung der BZE-Ergebnisse im Rahmen der Übersichtserhebungen.

4 Aufgaben und Ziele der Bodenzustandserhebungen

Uwe Paar, Jan Evers

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

Die bundesweit systematische Stichprobeninventur zum Zustand der Waldböden gibt 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

Uwe Paar, Jan Evers, Inge Dammann, Marcus Schmidt

5.1 Allgemeine Einführung

In der Zeit von 2006 bis 2008 fand in hessischen Wäldern die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung (BZE II) statt. Sie folgte der ersten Waldbodenzustandserhebung (BZE I), die in Hessen in den Jahren 1992 bis 1993 durchgeführt wurde. Wie bei der BZE I fanden die Erhebungen der BZE II auf den 139 Inventurpunkten des Forstlichen Umweltmonitorings statt. Voraussetzung dafür, dass Veränderungen ermittelt werden können, ist, dass bei Folgeinventuren grundsätzlich die gleichen Erhebungsprinzipien (hier insbesondere Erhebungsraster, Stichprobenkonzept und Methoden) angewendet werden. Bei der konzeptionellen Ausgestaltung der BZE II wurden daher möglichst viele methodische Vorgaben aus der BZE I übernommen. Im Hinblick auf länderübergreifende Vergleiche ist des Weiteren von Bedeutung, unterschiedliche Definitionen der Standortselemente der Länder zu vereinheitlichen. Darüber hinaus musste die Vergleichbarkeit von Analyseverfahren beachtet bzw. eine Angleichung unterschiedlicher Tiefenbeprobungen vorgenommen werden (s. a. EVERS et al. 2010).

5.2 Merkmalsgruppen

Bei der BZE II wurden folgende Merkmalsgruppen erfasst:

- Forstliche Daten und allgemeine Angaben (Punktangaben, 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 Humusaufgabe)
- Nadel-/Blatternahrung
- Bestandesdaten
- Vitalität (Waldzustandserhebung)
- Bodenvegetation

5.3 Untersuchungsdesign und -module am BZE II-Punkt

Das nachfolgend dargestellte Design für die verschiedenen Untersuchungsobjekte wurde auf sämtlichen BZE II-Punkten in Hessen umgesetzt.

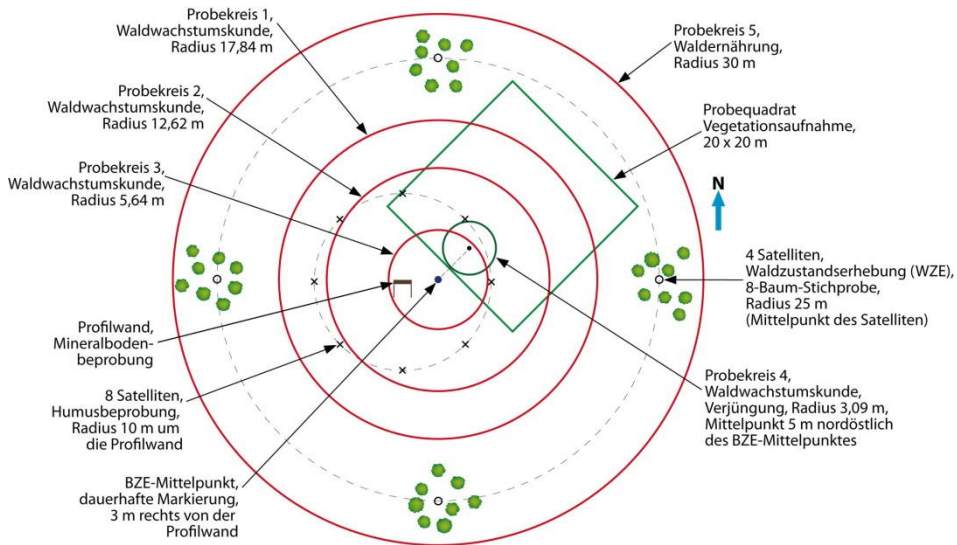


Abbildung 16: Inventurdesign an hessischen BZE II-Punkten

5.3.1 Beprobung und Analyse des Auflagehumus und der Mineralbodenproben

Die 139 BZE II-Punkte wurden vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG, Wiesbaden) in enger Zusammenarbeit mit der NW-FVA im Zeitraum vom 22.02.2006 bis 15.10.2008 beprobt. Durch Nachbeprobungen verlängerte sich der Beprobungszeitraum bis Ende 2009.

Die Beprobung orientierte sich an der bundesweiten BZE II-Arbeitsanweisung (WELLBROCK et al. 2006). Der Auflagehumus und die Tiefenstufen 0-5 und 5-10 cm wurden an 8 Satelliten ausgehend von der Profilstirnseite in 10 m Abstand in die vier Haupthimmelsrichtungen und jeweils dazwischen überwiegend mit den Murach'schen Wurzelbohrer (Innendurchmesser 8 cm, 50,26 cm²) oder Stechrahmen volumengerecht beprobt. An den hessischen BZE-Punkten wurde der Mineralboden ausschließlich nur am Profil beprobt, da dieses Vorgehen auch bei der BZE I in Hessen angewandt wurde. Sofern möglich, wurden noch vorhandene Profile aus der BZE I genutzt oder neue Profile am BZE-Mittelpunkt angelegt und eingemessen.

Die Beprobung erfolgte überwiegend nach den BZE-Tiefenstufen 0-5, 5-10, 10-30, 30-60 und 60-90 cm, wobei bei deutlich anderer Haupthorizontlage von der Tiefenstufenbeprobung abgewichen wurde. In den meisten dieser Fälle sind dann die BZE-Tiefenstufen unterteilt worden, sodass eine Rückführung in die Tiefenstufe problemlos möglich wurde. Die Proben wurden in Braunglasflaschen verpackt und zeitnah in den Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL Kassel) 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 Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL) geliefert.

Zur Bestimmung der Trockenrohdichten des Feinbodens, der Skelettgehalte und Auflagehumusmasse sind Nachbeprobungen durch das Ingenieurbüro für Umwelt und Landwirtschaft (IFÖL Kassel) im Auftrag der NW-FVA erfolgt. Die Analysen sind im Umweltlabor der NW-FVA durchgeführt worden.

Die Probenvorbereitungen, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden erfolgten auf Basis des „Handbuches Forstliche Analytik“ (HFA inklusive Ergänzungslieferungen, 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 10 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 zur Blatt-/Nadelbeprobung sind in Hessen, Niedersachsen/Bremen und Sachsen-Anhalt identisch und vergleichbar. Im Rahmen der BZE I wurden in Hessen keine Blatt-/Nadelbeprobungen durchgeführt (s. Tab. 3).

An 137 hessischen Inventurpunkten des systematischen BZE II-Rasters wurden Nadeln und Blätter aus der Oberkrone von drei Probestämmen je Baumart als Mischprobe chemisch analysiert. An zwei BZE II-Punkten wurden keine Blatt- oder Nadelproben gewonnen, weil der Bestand durch Windwurf zerstört bzw. keine der Hauptbaumarten vertreten war. Die Beprobung der Laubbäume fand im Juli 2007 statt, die Fichten und Kiefern wurden im Winter 2007/2008 beprobt. Da an vielen Erhebungspunkten mehrere Baumarten vorkommen, sind insgesamt 238 Beprobungen von jeweils drei Probestämmen in Hessen erfolgt. Grundlage für die Erhebung war auch hier die Arbeitsanleitung zur Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) (WELLBROCK et al. 2006). Für den zeitlichen Vergleich der Nährelementversorgung der Fichte konnten die Daten der Immissionsökologischen Waldzustandserfassung (IWE) verwendet werden, die in den Jahren 1982/1983 im 8 x 8 km-Raster für die Fichte an 147 Beprobungspunkten mit je drei Probestämmen als Mischprobe durchgeführt wurde (GÄRTNER et al. 1990). Die Beprobungen auf den Flächen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings entsprachen der Methodik des ICP Forests-Manuals (ICP FORESTS 1998) mit jährlicher Probennahme; es wurden pro Fläche 6-9 Bäume beprobt.

Tabelle 3: Übersicht der Blatt- und Nadelproben im Rahmen der BZE I und II in Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt

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

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

(Fortsetzung Tabelle 3)

	Sachsen-Anhalt	
	BZE I	BZE II
Beprobte Inventurpunkte	40	67
Baumarten*	Fi, Ki	Bu, Ei, Fi, Ki
Alter der Probebäume (zum Zeitpunkt der Probennahme)	alle Alter 5-191	alle Alter 18-206
Zeitpunkt der Probennahme	Winter 1992	Laubholz: Juli-August 2007 Nadelholz: Winter 2007/2008
Mischproben	Mischproben aus 3 Bäumen der jeweiligen Baumart	Mischproben aus 3 Bäumen der jeweiligen Baumart
Anzahl der Proben	40 Ki 32, Fi 8	78 Bu 11, Ei 13, Fi 10, Ki 44
Analysierte Nadeljahrgänge	Ki: 1; Fi: 1+3	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).

** Im Jahr 1996 wurde eine Zwischeninventur der Blatt-/Nadelanalysen in Niedersachsen durchgeführt.

*** Zum Zeitpunkt der BZE II wurden in Niedersachsen an zusätzlich 66 Inventurpunkten der BZE I, die nicht zum BZE II-Kollektiv gehören, Nadel- und Blattproben durchgeführt (Bu 25, Ei 10, Fi 11, Ki 25).

Die Ergebnisse der Nadel- und Blattbeprobung der BZE I in Niedersachsen sind mit den Ergebnissen der Zwischeninventur 1996 vergleichbar. Es wurden die Probebäume der BZE I erneut beprobt. Auch bei der Probennahme der BZE II in Niedersachsen wurden – soweit möglich – die Probebäume der BZE I und der Zwischeninventur erneut beprobt. Bei der BZE I in Sachsen-Anhalt wurden die Probebäume gefällt, daher wurden bei der BZE II andere Probebäume ausgewählt.

Die Analyse der Nadel- und Blattproben der BZE II in Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt wurde im Umweltlabor der NW-FVA durchgeführt.

5.3.3 Vegetationsaufnahmen

Haupterfassungszeitraum waren die Monate Mai bis September. Auf basen- und kalkreichen Böden (Vorinformation aus der BZE I) wurde eine erste Begehung bereits im April/Mai vorgenommen, um Frühjahrs-Geophyten zu erfassen. Ein zweiter Aufnahmedurchgang erfolgte bei voller Entwicklung der Waldgräser ab Mitte Juni. Die Waldvegetation bodensaurer Standorte kann von Mai bis September (notfalls noch im Oktober) aufgenommen werden. 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 m². 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 (3 m rechts von der Außenseite des Bodenprofils) 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. 16). 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 wurde. 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-Probekreis erstellt.

5.3.4 *Waldwachstumskundliche Aufnahmen*

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

6 Ergebnisse der Bodenuntersuchungen

6.1 Repräsentativität des Erhebungsnetzes

Uwe Paar, Jan Evers

Die 139 BZE-Punkte des Landes Hessen liegen auf einem systematischen 8 km x 8 km Rasternetz. Wie in früheren Aufnahmen und Untersuchungen bereits belegt (HOCKE 1995), liefert dieses Dauerbeobachtungsnetz repräsentative Ergebnisse für verschiedene Fragestellungen zu den Wäldern in Hessen. Inwieweit auch die Ergebnisse der BZE II als repräsentativ für die Waldfläche Hessens gewertet werden dürfen, wird nachfolgend am Beispiel der Standortselemente „Trophie“ und „Geländewasserhaushalt“ sowie „Baumartenverteilung“ überprüft. Dazu werden die strukturbezogenen Befunde der BZE mit den Vollaufnahmen der Forsteinrichtung bzw. Standortskunde validiert.

Vergleicht man die Verteilung der aktuellen Trophiestufen für die BZE-Punkte entsprechend der Standortskartierung mit dem flächenhaften Vorkommen der Trophiestufen, so dokumentieren die Ergebnisse (s. Tab. 4) eine bemerkenswert hohe Repräsentativität des Rasternetzes (Spalten 2 und 3 der folgenden Tabelle).

Tabelle 4: Verteilung [%] der Trophiestufen gemäß der Standortskartierung und an den BZE-Punkten

Trophiestufe	Digitale Standortstypenkarte für Hessen (Gesamtwald)* [%]	Trophiestufen Standortskarte an den BZE-Punkten** [%]	Trophieeinschätzung an BZE-Punkten mit BZE-Bodenchemie [%]
carbonat-eutroph	0,1	-	4,3
eutroph	25,0	23,0	25,2
gut mesotroph	4,4	2,9	11,5
mesotroph	65,4	66,9	35,3
schwach mesotroph	3,4	2,9	18,7
oligotroph	1,7	4,3	5,0

* Flächenanteile in %; Auswertung der digitalen Standortskarten; Datensatz (2010): Staatswald, betreuter Wald und einige nicht betreute Waldbesitzungen

** nach digitaler Standortskarte (Lage im Polygon); Stand 2010; relative Häufigkeiten in %

Demgegenüber weicht jedoch die abgeleitete punktbezogene Trophieeinschätzung an den BZE-Punkten unter Einbeziehung der BZE-Bodenchemie von den Trophiestufen entsprechend der digitalen Standortskarte deutlich ab. Die Einbeziehung der Bodenchemie führt zu einer deutlich feineren Differenzierung der Trophiestufen.

Insbesondere der hohe Anteil mesotropher Standorte nach der digitalen Standortskarte kann unter der Einbeziehung bodenchemischer Kenngrößen deutlich feiner klassifiziert werden. Dies führt zu einer Umverteilung von mesotrophen zu gut mesotrophen beziehungsweise zu schwach mesotrophen Standorten.

Nahezu ähnlich positiv sind die Befunde zur Repräsentativität des Geländewasserhaushalts im BZE-Kollektiv (s. Tab. 5). Auch hier ergeben die relativen Häufigkeiten der Geländewasserhaushaltsstufen des BZE-Kollektivs eine gute Übereinstimmung mit dem tatsächlichen flächenhaften Vorkommen der einzelnen Wasserhaushaltsstufen in Hessens Wäldern.

Tabelle 5: Verteilung [%] der Geländewasserhaushaltsstufen gemäß der Standortkartierung und an den BZE-Punkten

Geländewasserhaushaltsstufe (Schlüsselziffer)	Digitale Standortstypenkarte Hessen (Flächenanteile in %; Auswertung der digitalen Standortskarten; Datensatz (2010): Staatswald, betreuter Wald und einige nicht betreute Waldbesitzungen)	Geländewasserhaushaltsstufen an den BZE-Punkten (nach digitaler Standortstypenkarte, Stand 2010; relative Häufigkeiten in %)
trocken (9)	0,4	-
mäßig trocken (4)	6,1	7,2
mäßig frisch (3)	30,8	30,9
frisch (14)	41,2	46,8
betont frisch (2)	10,8	7,2
feucht (5)	3,1	1,4
wechselfeucht (6)	6,5	6,5
wechselltrocken (46)	0,1	-
sickerfeucht (8)	0,4	-
nass (7)	0,6	-

Für die Überprüfung der Repräsentativität des BZE-Rasters hinsichtlich der Baumartenverteilung wurden der Forsteinrichtungsdatensatz und der Datensatz der Waldzustandserhebung verwendet.

Die Ergebnisse des Forsteinrichtungsdatensatzes basieren auf der Zusammenfassung der Befunde für sämtliche Betriebe (Staatswald, betreuter Wald, sonstiger Wald). Die Herleitung der relativen Anteile der Hauptbaumarten bzw. für das sonstige Laubholz und sonstige Nadelholz wurde auf der Basis der Angaben für den Hauptbestand auf der Gesamtfläche vorgenommen (WILLIG 2012, mdl. Mittl.). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die aktuellen Forsteinrichtungsdaten vom 11.01.2012 ein mittleres Stichjahr angeben, das im Mittel fünf Jahre zurückliegt.

Da im Rahmen der Waldzustandserhebungen nur Bäume der Baumklassen 1 bis 3 aufgenommen werden, ist der Vergleich mit den Angaben zum Hauptbestand in der Forsteinrichtung gut möglich.

Tabelle 6 zeigt die Baumartenverteilungen im WZE-Kollektiv für die Zeit von 2006-2008.

Tabelle 6: *Altersübergreifende Baumartenverteilung [%] im WZE-Kollektiv für die Jahre 2006-2008*

Jahr	Bu [%]	Ei [%]	Fi [%]	Ki [%]	SLH ¹ [%]	SNH ² [%]	Anzahl Bäume	Punktanzahl
2006	31,23	8,49	27,63	18,31	7,58	6,76	3298	137
2007	34,06	9,18	22,47	19,29	7,76	7,24	3106	119
2008	34,26	9,21	22,55	19,13	7,79	7,06	3158	131

¹ Sonstiges Laubholz: Ahorn, Aspe, Birke, Eberesche, Elsbeere, Erle, Esche, Hainbuche, Kastanie, Kirsche, Linde, Pappel, Robinie, Roteiche, Schwarz-Nuss, Ulme, Weide, Wildobst.

² Sonstiges Nadelholz: Douglasie, Hemlock-Tanne, Europ. Lärche, Jap. Lärche, Lebensbaum, Schwarz-Kiefer, Sitka-Fichte, Strobe, Tanne, Zypresse.

Da als mittleres Stichjahr für die Forsteinrichtungsangaben das Jahr 2007 angenommen werden kann, wurde für den Vergleich die durchschnittliche Baumartenverteilung im WZE-Kollektiv aus den Jahren 2006-2008 berechnet. Diese Vorgehensweise berücksichtigt somit auch die Auswirkungen des Windwurfs durch den Orkan „Kyrill“ (18.01.2007) auf die Baumartenverteilung (s. Tab. 6).

Mit Ausnahme der Kiefer, deren Anteil im WZE-/BZE-Kollektiv überproportional hoch ist, ergeben sich im Rahmen des Kollektivvergleichs nahezu deckungsgleiche relative Häufigkeiten für Fichte, Buche, Eiche, „Sonstiges Laubholz“ und „Sonstiges Nadelholz“ (s. Tab. 7).

Tabelle 7: *Baumartenanteile [%] in der Forsteinrichtung und im WZE-/BZE-Kollektiv*

Baumart	Forsteinrichtung Baumanteile [%] Basis Hauptbestand Mittleres Stichjahr 2007	WZE-Kollektiv auf BZE-Punkten Baumanteile [%] Baumklasse 1 bis 3 Mittelwert 2006-2008
Buche	33	33
Eiche	12	9
Fichte	24	24
Kiefer	13	19
SLH ¹	9	8
SNH ²	9	7

¹ Sonstiges Laubholz: Ahorn, Aspe, Birke, Eberesche, Elsbeere, Erle, Esche, Hainbuche, Kastanie, Kirsche, Linde, Pappel, Robinie, Roteiche, Schwarz-Nuss, Ulme, Weide, Wildobst.

² Sonstiges Nadelholz: Douglasie, Hemlock-Tanne, Europ. Lärche, Jap. Lärche, Lebensbaum, Schwarz-Kiefer, Sitka-Fichte, Strobe, Tanne, Zypresse.

Da das WZE-Kollektiv die Baumartenverteilung des hessischen Waldes (bestockte Fläche) hervorragend repräsentiert, kann aus deren Entwicklung auf die jahresbezogene Veränderung im Gesamtwald Hessen geschlossen werden.

Die Ergebnisse zur Baumartenverteilung im WZE-Kollektiv belegen für den Zeitraum 1984 bis 2014 eine Zunahme des Buchenanteils im hessischen Wald von rund 28 % auf 36 % sowie eine Abnahme des Fichtenanteils von 31 % auf 20 % (s. Tab. 8).

Tabelle 8: *Altersübergreifende Baumartenverteilung [%] im WZE-/BZE-Kollektiv von 1984-2014*

Jahr	Bu [%]	Ei [%]	Fi [%]	Ki [%]	SLH ¹ [%]	SNH ² [%]	Anz. Bäume	Punktzahl
1984	27,49	9,11	31,44	20,11	5,85	6,00	3.336	139
1985	27,46	9,14	31,41	20,11	6,03	5,85	3.336	139
1986	27,81	9,18	30,77	2,023	6,04	5,98	3.312	138
1987	30,73	9,64	23,59	24,17	7,03	4,84	1.920	80
1988	29,29	8,48	30,46	20,02	5,71	6,04	3.312	138
1989	28,99	8,73	30,46	20,02	5,83	5,98	3.312	138
1990	28,91	9,06	29,26	20,13	6,11	6,52	3.144	131
1991	30,50	8,43	28,30	20,37	5,81	6,59	3.216	134
1992	30,51	8,40	28,77	20,19	5,77	6,57	3.240	135
1993	30,30	8,43	28,09	19,98	6,43	6,77	3.264	136
1994	30,65	8,43	27,54	20,06	6,43	6,89	3.250	135
1995	30,61	8,53	27,56	19,99	6,47	6,84	3.247	135
1996	30,71	8,52	27,34	19,92	6,72	6,78	3.273	136
1997	30,14	8,57	27,82	19,90	6,76	6,82	3.242	135
1998	30,35	8,71	27,57	19,91	6,70	6,76	3.239	135
1999	30,72	8,26	27,80	19,79	6,62	6,80	3.219	134
2000	30,80	8,23	27,78	19,73	6,62	6,84	3.218	134
2001	30,75	8,42	27,70	19,69	6,58	6,86	3.220	134
2002	30,79	8,39	27,52	19,63	6,65	7,02	3.219	134
2003	30,56	8,33	28,28	19,40	6,54	6,91	3.243	135
2004	30,82	8,42	27,49	19,48	6,83	6,96	3.219	134
2005	31,78	8,33	27,60	18,77	6,72	6,78	3.228	135
2006	31,23	8,49	27,62	18,31	7,58	6,76	3.298	137
2007	34,06	9,18	22,47	19,29	7,76	7,24	3.106	129
2008	34,26	9,21	22,55	19,13	7,79	7,06	3.158	132
2009	34,97	9,49	21,62	19,07	7,63	7,22	3.131	131
2010	35,46	10,23	20,36	19,08	7,53	7,34	3.119	130
2011	35,48	10,24	20,30	19,04	7,55	7,39	3.114	130
2012	35,95	10,43	19,70	18,99	7,62	7,40	3.096	129
2013	35,92	10,37	19,86	18,86	7,59	7,40	3.096	129
2014	35,98	10,43	19,96	18,83	7,56	7,24	3.096	129

^{1,2} Erläuterungen: s. Tab. 6

6.2 Bodenmorphologische Kenngrößen

Jan Evers, Uve Paar, Jörg Weymar

Eine Zielsetzung im Rahmen der Analyse der BZE II-Erhebungen für die Trägerländer der NW-FVA ist es, länderübergreifende Auswertungen zur Veränderung der bodenchemischen Kennwerte zu realisieren. Als länderübergreifende Stratifizierungseinheiten wurden die Substratgruppen und die Substrat-Lagerungstypen generiert. Zudem wurde eine Synopse der Hauptmerkmale der forstlichen Standortskartierungsverfahren 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 gesondert veröffentlicht (EVERS et al. 2013a, EVERS u. PAAR 2013c).

6.2.1 Substratgruppen

Durch eine Expertengruppe, bestehend aus Bodenkundlern und erfahrenen Standortskartierern, wurde jedem der 388 BZE-Punkte (Hessen, Niedersachsen, Bremen und Sachsen-Anhalt) eine Substratgruppe zugeordnet. 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. 9).

In Hessen kommen 14 der für Nordwestdeutschland insgesamt definierten 16 Substratgruppen vor. Für 39 BZE-Punkte (28 %) wurde die Substratgruppe „Buntsandstein“ ausgewiesen. Dies sind Standorte des Unteren- und Mittleren Buntsandsteins mit i. d. R. geringmächtigen Deckschichten (s. a. EVERS et al. 2016). 20 BZE-Punkte (14 %) wurden als Lösslehm-Standorte identifiziert. Auf diesen Standorten beträgt die reine Lösslehmüberlagerung mehr als 70 cm. Ebenfalls 14 % der BZE-Punkte werden standörtlich von Basalt- und Diabasvorkommen bestimmt. Auf weiteren 16 BZE-Punkten (12 %) findet sich Tonschiefer. Grauwackenstandorte kommen im BZE-Kollektiv mit einem Anteil von 5 % vor. Genauso häufig ist die Substratgruppe „Ton(stein)“ vertreten. Das Vorkommen von BZE-Sand-Standorten verteilt sich auf acht (6 %) „unverlehmte Sande“, fünf (4 %) „schwach verlehmte Sande“ und einen „verlehmten Sand“. Die Substratgruppen „Granit“, „Zechstein/Rotliegendes“, „Quarzit“, „Lehm“ und „Kalk“ sind jeweils mit Anteilen von 1-3 % vertreten (s. Abb. 17). Die Substratgruppenverteilung zeigt damit eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen zum flächenhaften Vorkommen der Ausgangsgesteine (s. Kap. 3.2.1, Tab. 1).

Tabelle 9: Beschreibung der Substratgruppen

Substratgruppe	Substrate	Kriterien/Merkmale/Herkunft
Buntsandstein	reine Sande bis schluffig, lehmige Sande, thw. mit Tonsteinwechsellagerung	kalkfreie Buntsandsteinformationen
Substratuntergruppe: Buntsandstein (tonig)	im Unterboden: sandige Lehme, tonige Lehme, sandige Tone, stark lehmige Sande, tonige Sande	kalkfreie Buntsandsteinformationen
Substratuntergruppe: Buntsandstein (sandig)	über alle Bodentiefen reine Sande, schwach schluffige Sande bis schwach lehmige Sande	kalkfreie Buntsandsteinformationen
Lösslehm	feinsandig lehmige Schluffe bis schluffig-schwach tonige Lehme	Mächtigkeit > 70 cm (auch Kolluvien); über silikatarmem oder silikatreichem Ausgangssubstrat; Pleistozän und thw. Holozän
Basalt/Diabas	überwiegend schluffige Lehme	silikatreiche tertiäre Ergussgesteine und devonische Diabase
Tonschiefer	überwiegend lehmige Tone	z. B. devonische Schieferformationen, Hunsrücksschiefer
unverlehmtte 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 verlehmtte Sande	schwach lehmige Sande, schluffige Sande	Geschiebedecksande, Sandlöss; Wasserabsätze > 20 cm Rheinweiß- (Kalk) und Flugaschenstandorte, Mergelsande und -kiese; Pleistozän und Holozän
verlehmtte Sande	verlehmtte Sande, schluffige Sande, tonige Sande	Geschiebedecksande, Lösssande; Wasserabsätze > 50 cm 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 lehmig 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/Rotliegendes	verlehmtte Sande bis tonige Lehme	Perm: Dolomite, Kalksteine bzw. Sandsteine, Konglomerate
Granit	grusig, sandig, schluffige Lehme	Plutonite
Kreidesandstein	schwach verlehmtte bis verlehmtte 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

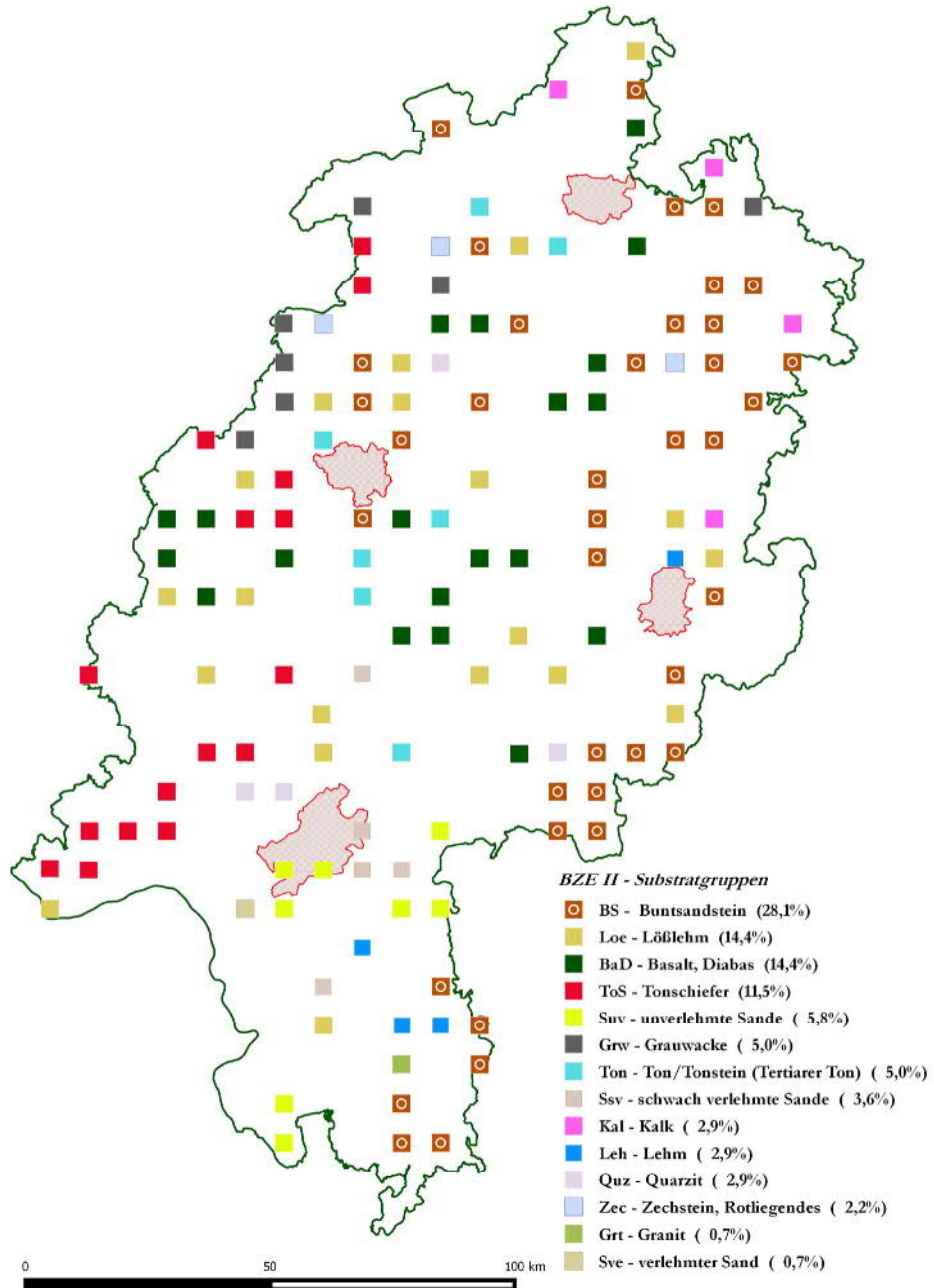


Abbildung 17: Zuordnung der 139 hessischen BZE II-Punkte zu den Substratgruppen

6.2.1.1 Kalkung und Substratgruppen

Die untersuchten Waldstandorte unterliegen einer Vielzahl von Umwelteinflüssen. Hinzu kommt die Bodenschutzkalkung als forstliche Maßnahme. Um die aktuelle Situation der Standorte zu verstehen, aber auch um Veränderungen zu bewerten, ist es wichtig, den Einfluss der Kalkung auf die Böden zu kennen und von der „natürlichen“ Entwicklung der Böden seit der BZE I zu unterscheiden.

Eine intensive und umfangreiche Recherche zur Kalkung der BZE-Inventurpunkte wurde mithilfe folgender Schritte realisiert:

- Verschneidung der BZE-Punkte mit dem Kalkungskataster (soweit vorhanden)
- Übernahme der Informationen zum Kalkungsstatus aus der BZE I
- aktuelle Befragungen der Forstämter, Reviere bzw. Waldeigentümer
- Analyse chemischer Parameter des Auflagehumus auf das Vorhandensein von freiem Carbonat auf sonst kalkfreien Standorten

Tabelle 10: Anteil der gekalkten und ungekalkten Flächen je Substratgruppe in Hessen

Substratgruppe	Kalkungsstatus							
	gekalkt		ungekalkt*		unklar		ohne Kalkung**	
	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent
Buntsandstein	27	69	11	28	1	3		
Lösslehm	7	35	12	60	1	5		
Basalt/Diabas							20	100
Tonschiefer	14	88	1	6	1	6		
unverlehmte Sande							8	100
schwach verlehnte Sande							5	100
verlehnte Sande							1	100
Grauwacke	4	57	3	43				
Ton(stein)	4	57	3	43				
Kalkstein							4	100
Lehm	2	50	1	25	1	25		
Quarzit	3	75	1	25				
Zechstein/ Rotliegendes							3	100
Granit			1	100				
Gesamt	61	44	33	24	4	3	41	29

* ungekalkt = Kalkung vorgesehen

** ohne Kalkung = Kalkung ist nicht vorgesehen

Auf Basis der verschiedenen Analyseschritte ergab sich, dass in Hessen 44 % der BZE-Punkte mindestens einmal gekalkt wurden. 53 % der Punkte sind nicht gekalkt, wovon 41 BZE-Punkte (29 %) nicht zur Kalkungskulisse zählen. Für vier Punkte (3 %) blieb der Kalkungsstatus ungeklärt. Tabelle 10 zeigt den Anteil der gekalkten und ungekalkten Inventurpunkte je Substratgruppe.

Circa zwei Drittel der gekalkten BZE-Punkte in Hessen sind Buntsandstein- bzw. Tonschiefer-Standorte, wobei 69 % der BZE-Buntsandstein-Punkte und 88 % der BZE-Tonschiefer-Punkte gekalkt wurden. Die Befunde für die wenigen Tonstein-, Grauwacke- und Quarzit-BZE-Punkte lassen den Schluss zu, dass auch deutlich mehr als die Hälfte dieser Standortbereiche gekalkt wurden. Wie zu erwarten bzw. vorgegeben, wurden Basalt- und Diabas-Standorte von Kalkungsmaßnahmen ausgeschlossen. Auffallend ist zudem, dass ca. 60 % der hessischen Lösslehm-Standorte bislang nicht gekalkt worden sind.

6.2.2 *Substrat-Lagerungstypen*

Wichtige Elemente zur Beschreibung des Standortstyps sind u. a. die Bodenart und die Bodenartenschichtung, aus denen Rückschlüsse auf den Luft- und Wasserhaushalt gezogen werden können. In der Verbindung Bodenart und Bodenartenschichtung mit dem geologischen Ausgangssubstrat sind differenzierte Ableitungen zur Nährstoffversorgung möglich.

Wasserhaushalts- und Nährstoffansprachen, die Kennzeichnung des Bodentyps und die Darstellung der genetischen Bodenentwicklung sind Ableitungen, die ihre Basis auf der Bestimmung der Substrat-Lagerung haben (OTTO 1972). Der Begriff „Substrat-Lagerung“ umfasst die Angaben zur Bodenart und den Lagerungsverhältnissen und entspricht somit der Substratzahl der Forstlichen Standortaufnahme in Niedersachsen (NFP 2007, NFP u. LLUR 2009a, b).

Für sämtliche BZE-Profile bestimmte eine Expertengruppe aus Bodenkundlern und erfahrenen Standortkartierern anhand von Profildaten und den Profilbeschreibungen die Substrat-Lagerung. Anschließend wurden die 40 möglichen Substratzahlen für den Anwendungsbereich Mittelgebirge, Bergland und Hügelland und die 68 möglichen Substratzahlen für das pleistozäne (diluviale) Tiefland zu insgesamt 33 Substrat-Lagerungstypen zusammengefasst (s. Abb. 18 und Tab. 11 (NFP 2007, NFP u. LLUR 2009 a, b)).

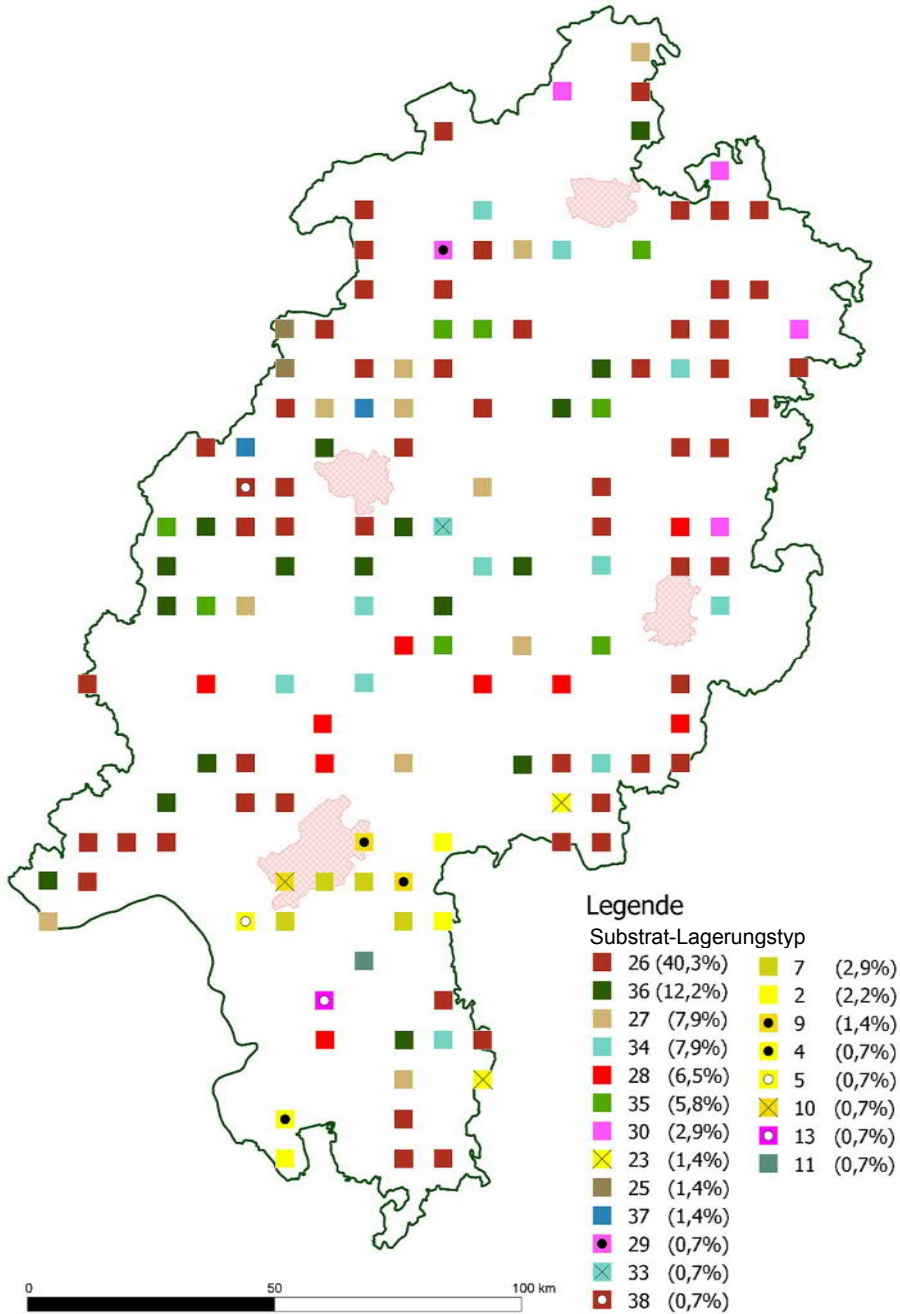


Abbildung 18: Substrat-Lagerungstyp je BZE-Punkt (BZE II) in Hessen (Klassifizierung nach Standortskartierungsanleitung von Niedersachsen (NFP 2007, NFP u. LLUR 2009a, b))

Tabelle 11: Legendenergänzung zu Abbildung 18

Substrat / Lagerung im Tiefland			
Code für Substrat-Lagerungstyp	Hauptbodenart bis 70 cm Unterboden	Substrat/Lagerung nach Rahmenschema ¹	Bemerkung
1	OB: Kies UB: Kies	1.1, 8.1	auch kalkhaltig
2	OB: unverlehmter Sand UB: unverlehmter Sand/Kies	1.2, 2.1, 2.2, 2.3, 2.9	im UB auch kiesig
3	OB: unverlehmter Sand UB: schwach verlehmter Sand	2.6, 3.2, 9.5	im UB auch Sandlöss
4	OB: unverlehmter Sand UB: Lehm	2.7, 2.8, 4.2, 6.3	
5	OB: unverlehmter Sand UB: schluffige Feinsande	2.5, 5.3, 5.6	UB: schluffig, schlickige Feinsande
6	OB: unverl. u. schwach verlehmter Sand UB: Ton*	7.3, 7.4, 7.5	* Beckenabsätze, auch feinsandig, schluffig
7	OB: schwach verlehmter Sand UB: unverlehmter Sand	1.3, 2.4, 3.1, 3.3, 3.4, 5.1, 9.4	OB auch mit Sandlöss u. schluffig schlickig; UB auch mit Kies
8	OB: schwach verlehmter Sand UB: schwach verlehmter Sand	3.5, 3.6, 5.2, 5.4, 5.5, 9.1, 9.2	OB und UB auch mit Sandlöss u. schluffig, schlickig
9	OB: schwach verlehmter Sand UB: Lehm	3.7, 4.3, 4.5, 5.8, 6.4, 9.3	OB auch mit Sandlöss
10	OB: Lehm UB: unverl. u. schw. verl. Sande/Kiese	1.4, 4.1, 6.1, 6.2, 6.5	
11	OB: Lehm/Ton* UB: Lehm/Ton*	4.4, 4.6, 6.6, 6.8, 7.1, 7.2, 7.6	* Beckenabsätze, auch feinsandig, schluffig
12	Mergel oder Kalk bis oben	7.8, 8.6, 8.7	
13	Mergel/Kalk unter versch. Decken	3.9, 4.7, 5.7, 6.7, 7.7, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 9.6	
14	Moore	Römisch I bis V	
15	Übererdete Moore u. Humushorizonte	5.9, 6.9	

OB = Oberboden, UB = Unterboden

¹ NFP u. LLUR 2009a, b

(Fortsetzung Tabelle 11)

Substrat / Lagerung im Bergland		
Code für Substrat-Lagerungstyp	Beschreibung	Substrat/Lagerung nach Rahmenschema ²
22	Felsen, Blockhalden, Geröll, Kies, feinbodenarme Gesteinsböden	1.1, 1.2
23	maximal anlehmige Sande (≤ 70 cm) über basenarmem Silikatgestein	1.3, 2.1
24	skelettreiche und unverlehmte Decken (≤ 70 cm) über Ton, Kalk oder basenreichem Untergrund	1.4, 1.5
25	schluffige, verlehmte Decken (≤ 70 cm) über Geröll, Schotter, Kies oder Sand	1.6
26	lehmige/schluffige sandige Decken (≤ 70 cm) über basenarmem Silikatgestein	2.2, 2.3
27	Lösslehm (≥ 70 cm), auch vermischt über basenarmem Silikatgestein	3.1, 3.2, 3.4, 3.5
28	Lösslehm und verlehmte Fließerden (≥ 70 cm) über Kalk und basenreichem Untergrund	2.5, 3.3
29	geringmächtige Kalksteinböden (≤ 20 cm) mit geringem Feinbodenanteil	4.1, 4.2
30	Löss- und Mischlehm (≤ 70 cm) über Kalkstein- und Verwitterungsprodukten	4.3, 4.4
31	kalkhaltige Fließerden (≥ 30 cm) über basenreichem Untergrund oder Ton	4.5, 4.8
32	kalkhaltige Fließerden (≥ 30 cm) über basenarmem Grundgestein	4.6
33	Tonböden mit geringen Deckschichten (≤ 30 cm), auch Bröckeltone	5.1, 5.2, 5.5
34	sandige/lehmige Fließerden ($30 - \leq 70$ cm) über Ton, auch Bröckeltone	2.4, 5.3, 5.6
35	feinbodenarme Decken (≤ 40 cm) über basenreichem Grundgestein (c3 max.)	6.1, 6.2
36	feinbodenreiche Decken (≤ 70 cm) über basenreichem Grundgestein (c3 max.)	6.3
37	basenreiche Mischlehme (≥ 30 cm) über basenarmem oder kompaktem Grundgestein	2.6, 5.4, 6.4, 6.5
38	Kolluvien und Alluvien über basenarmem oder basenreichem Grundgestein, kein Stau	7.1, 7.2, 7.3
39	Kolluvien und Alluvien mit Stau im Untergrund	7.4

² NFP 2007

An ca. 40 % der BZE-Profile in Hessen findet man bis zu 70 cm mächtige lehmige, schluffige, sandige Decken (Löss-Lehmdecken) über basenarmem Silikatgestein (Typ 26). Auf 23 % der Standorte sind Decken mit einer Mächtigkeit zwischen 30 und 70 cm ausgebildet, während bei 17 % die Deckschicht bis zu 30 cm mächtig ist. Typisch für diesen häufig zu findenden Substrat-Lagerungstyp ist das Vorkommen von Hainsimsen-Buchenwäldern.

Auf ca. 12 % der hessischen BZE-Standorte zeigen sich bis zu 70 cm mächtige feinkbodenreiche Decken über basenreichem Grundgestein (z. B. Basalt, Diabas, Gabbro etc.; Typ 36). Es handelt sich hierbei um typisch eutrophe Standorte.

Der dritthäufigste Substrat-Lagerungstyp ist charakterisiert durch das Vorkommen von sandig-lehmigen Fließerden (30-70 cm) über Ton, auch Bröckeltone (Typ 34). Der tonige Untergrund kann hierbei aus unterschiedlichen Ausgangssubstraten (Buntsandsteinmaterial, tertiären Tonen etc.) bestehen. Insgesamt weisen 8 % der hessischen BZE-Punkte diesen Substrat-Lagerungstyp auf.

Ebenfalls ca. 8 % der hessischen BZE-Standorte zeigen über 70 cm mächtige Lösslehmdecken über basenarmem Silikatgestein (Typ 27). Diese mesotrophen bis gut mesotrophen Standorte gehören i. d. R. zu den Hochleistungsstandorten. Die natürlichen Waldgesellschaften sind hier Hainsimsen-Buchenwälder und Flattergras-Buchenwälder.

Mit etwa 6 % ist der Substrat-Lagerungstyp 28 vertreten. Hierbei handelt es sich um Standorte mit Lösslehm und verlehmtten Fließerden (≥ 70 cm) über Kalk und basenreichem Untergrund. Diese Hochleistungs-Standorte sind als schwach eutroph einzustufen. Als natürliche Waldgesellschaften finden sich hier Hainsimsen-Waldmeister-Buchenwälder.

Ebenfalls knapp 6 % der hessischen BZE-Punkte sind als stark skeletthaltige Böden mit höchstens 40 cm Deckschicht über basenreichem Grundgestein einzustufen (Typ 35). Hierzu gehören insbesondere Waldmeister-Buchenwälder auf Diabas- und Basalt-Standorten.

Somit können ca. 80 % der hessischen BZE-Standorte durch insgesamt sechs Substrat-Lagerungstypen beschrieben werden. An den restlichen Punkten sind 14 weitere Substrat-Lagerungstypen mit relativen Anteilen von ca. 1-3 % zu finden.

Auswertungen auf der Basis der Substrat-Lagerungstypen werden in diesem Bericht nicht vorgestellt; sie erfolgen in einem nächsten Schritt und werden gesondert publiziert.

6.2.3 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 abgeleitet.

Abbildung 19 verdeutlicht, dass auf den hessischen Waldstandorten drei Bodentypen dominieren. 50 % der BZE-Punkte sind durch den Bodentyp Braunerde gekennzeichnet (s. Abb. 20a u. b) und auf 31 % der BZE-Punkte sind Parabraunerden (s. Abb. 20c u. d) zu finden. Für 10 % der BZE-Punkte wurde der Bodentyp Pseudogley (s. Abb. 20e u. f.) ausgewiesen. Diese Hauptbodentypen kommen somit insgesamt auf 91 % der hessischen BZE-Punkte vor. Auf den restlichen BZE-Standorten finden sich Gleye, Fahlerden, Kolluvisole, Pararendzinen, Podsole, Ranker, Regosole, Stagnogleye und Terra-Fuscen mit Flächenanteilen von jeweils 1-2 %.

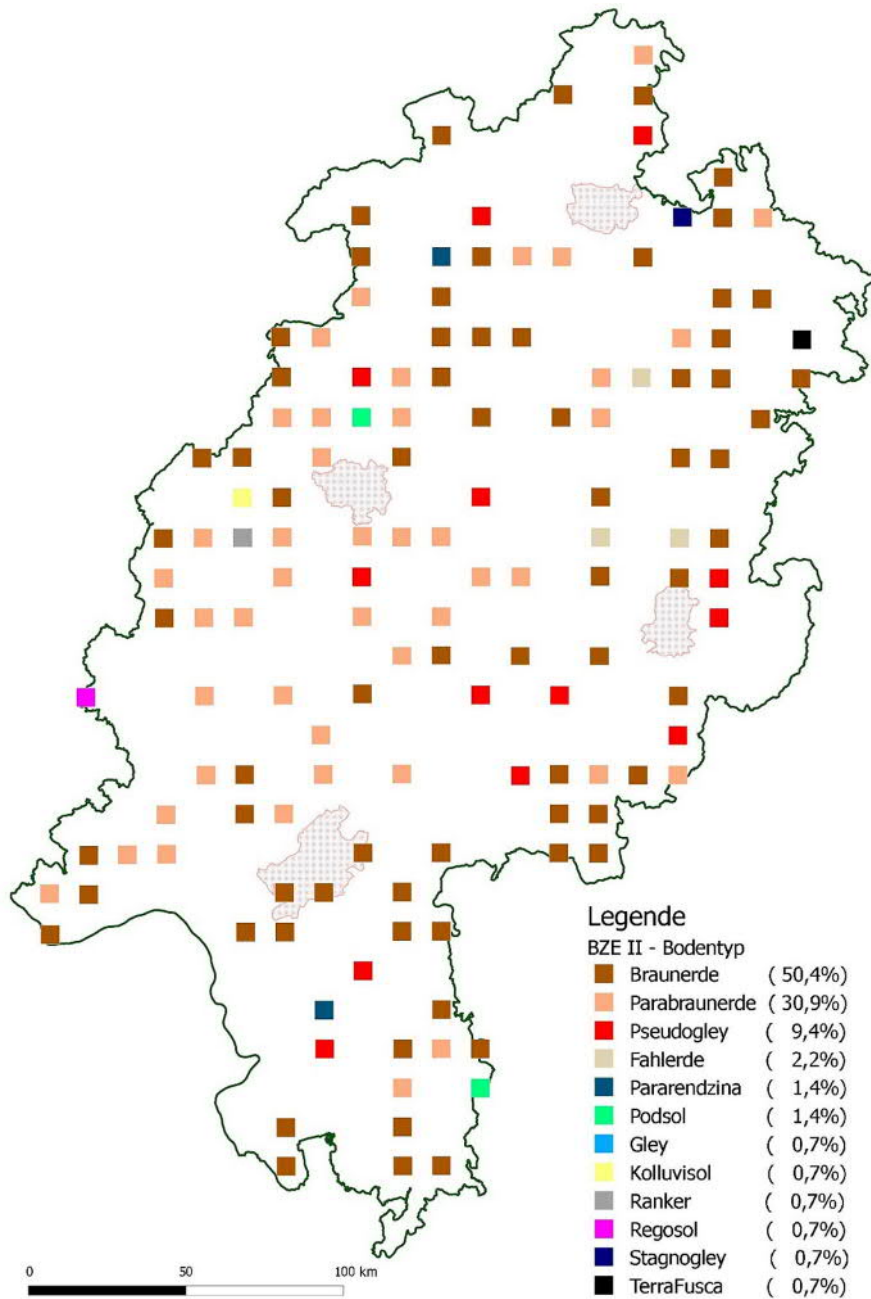


Abbildung 19: Bodentyp je BZE-Punkt in Hessen (BZE II)

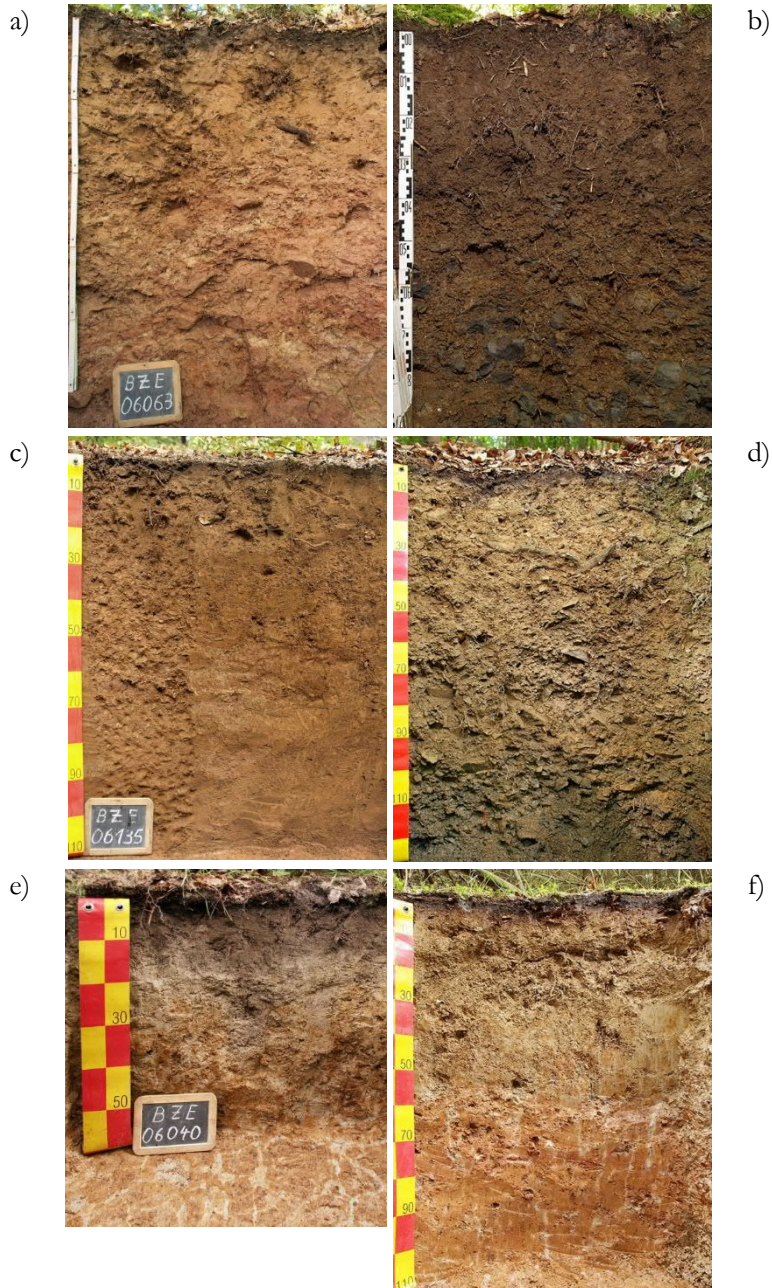


Abbildung 20: Die häufigsten Bodentypen in Hessen (Braunerden aus Lösslehm über Buntsandstein (a), aus Basalt (b); Parabraunerden aus Lösslehm (c) und aus Lösslehm über Grauwacke (d); Pseudogleye aus Lösslehm über Buntsandstein (e und f))

6.2.3.1 Bodentypen nach Substratgruppen

Analysiert man das Vorkommen von Bodentypen in den hauptsächlich vorzufindenden Substratgruppen, so zeigen sich die folgenden Ergebnisse:

Auf fast drei Viertel der BZE-Buntsandstein-Standorte sind Braunerden ausgebildet. Weitere 10 % der Standorte dieser Substratgruppe sind durch Parabraunerden gekennzeichnet. Pseudogleye, Podsole und Fahlerden kommen mit Anteilen von jeweils 5 % vor.

Charakteristische Bodentypen der Lösslehme in Hessen sind Parabraunerden (45 %) bzw. Fahlerden (5 %) und Pseudogleye (30 %).

Die Substratgruppe Basalt/Diabas ist durch das Vorkommen der Bodentypen Parabraunerden (55 %) und Braunerden (35 %) gekennzeichnet.

Auf den Tonschiefer-Standorten sind zumeist Parabraunerden (50 %) und Braunerden (37,5 %) ausgeprägt.

6.2.4 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 Streulage (L), Vermoderungslage (Of) und 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 aushaltenden 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 acht Satellitenpunkten pro Inventurpunkt angesprochen. Auf der Basis dieser Einzelerhebungen wurde für jeden Inventurpunkt eine dominante Humusform abgeleitet. Die Auswertung erfolgte auf der Ebene Subtyp und Varietät (WELLBROCK et al. 2006, s. Tab. 12).

Insgesamt 43 % der hessischen BZE-Punkte zeigen den Humustyp Mull, wobei der typische Mull nur auf zwei Inventurpunkten vorkam; für 48 Punkte wurde F-Mull kartiert.

Der Anteil von BZE-Plots mit der Humusform Mullartiger Moder liegt bei 13 %.

Moder-Standorte haben insgesamt einen Anteil von 26 % (feinhumusarm: 14 %, feinhumusreich: 12 %). Rohhumusartige Humusformen sind nur auf 17 % der Inventurpunkte festzustellen. Schlechteste Humusformen (typischer Rohhumus, und feinhumusreicher Rohhumus) sind auf nur fünf hessischen BZE-Punkten ausgeprägt (s. Abb. 21).

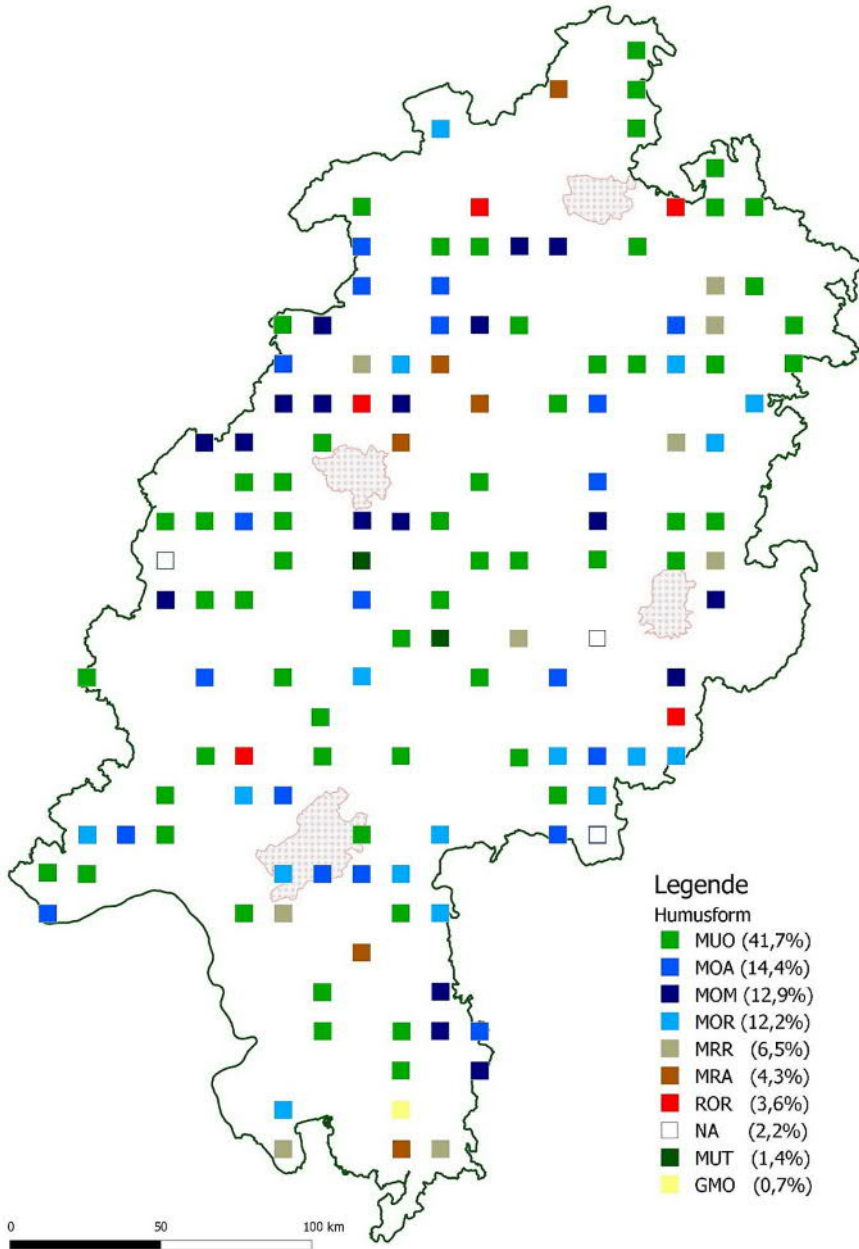


Abbildung 21: Humusform der BZE-Punkte in Hessen (BZE II), Abkürzungen der Humusformen s. Tab. 12

Tabelle 12: Humusformen (nach WELLBROCK et al. 2006)

Typ	Subtyp	Varietät	BZE I	Bedeutung	Bemerkung
	Kürzel BZE II				
Aeromorphe Humusformen					
MU	MUT		mu, mup, muk, muw	Mull Typischer Mull	Ah basenreich
	MUO		muf, mus	F-Mull	
MO	MOM	MOA MOR	mou	Mullartiger Moder	Oh locker, bröckelig
	MOT		mot	Typischer Moder	
	GMO TA MR		mota	- feinhumusarm	Oh < 2 cm
			motr	- feinhumusreich	Oh ≥ 2 cm
		SHGM	Graswurzelfilzmoder	Sonderform	
	MRA MRR	ta	Tangel		Oh unscharf, brechbar Oh < 3 cm Oh ≥ 3 cm
		mor	Rohhumusartiger Moder		
		- feinhumusarm - feinhumusreich			
RO	ROT	ROA ROR	rot	Rohhumus Typischer Rohhumus	Oh scharfkantig, brechbar Oh < 4 cm Oh ≥ 4 cm
			rota	- feinhumusarm	
	ror		- feinhumusreich		
	HMO	SHHA, SHMO	Hagerhumus	Sonderform	
	SRO	SHRO	Streunutzungs- Rohhumus	Sonderform	
Hydromorphe Humusformen (L-, Of-, Oh-Horizonte schmierig feucht, A-Horizonte hydromorph (Sw-Ah, Go-Ah))					
MUF			amu	Feuchtmull	
MOF			amo	Feuchtmoder	
ROF			aro	Feuchtrohumus	
AMO			am	Anmoor	Aa-Horizont, Oh fehlend
NA = Nicht angesprochen (Humusform konnte nicht bestimmt werden)					

6.2.4.1 Veränderung des Auflagehumus

Die durchschnittliche Trockenmasse des Auflagehumus für alle BZE-Punkte in Hessen hat sich von 43,4 t/ha bei der BZE I um 5,7 t/ha auf 37,9 t/ha verringert. Diese Veränderung ist signifikant (s. Tab. 13). Da die Trockenmassen im Auflagehumus der BZE-Punkte bei der BZE I und BZE II in Hessen nicht immer erhoben wurden, sind die Stichprobenzahlen nicht identisch und die Differenzen nicht exakt aus den Zahlen in der Tabelle 13 ableitbar. Werden die BZE-Punkte hinsichtlich ihres Kalkungsstatus stratifiziert, zeigt sich ein leichter, nicht signifikanter Anstieg in dem Kollektiv „Kalkung entfällt“. Dies sind in Hessen beispielsweise die Sande und die nährstoffreichen Standorte wie die Kalke, Basalte und Diabase. Im Kollektiv „gekalkt“ finden sich vor allem die Buntsandstein-, Tonschiefer-, Lösslehm- und Grauwacken-Standorte, hier zeigt sich ein recht hoher und signifikanter Rückgang der Trockenmassen der Humusaufgaben von 50 t/ha auf unter 40 t/ha. Dies ist ein Rückgang um knapp ein Viertel der Trockenmasse. Im Kollektiv „ungekalkt“ wurde ein leichter, nicht signifikanter Rückgang festgestellt.

Tabelle 13: Durchschnittliche Trockenmasse des Auflagehumus bei der BZE I und II in Hessen sowie Veränderungen [t/ha]

Trockenmasse des Auflagehumus		BZE I	BZE II	Differenz	P
			t/ha		
insgesamt	Mittel	43,4	37,9	-5,7	*
	N	119	117	117	
	SD	32,9	27,7	28,4	
Kalkung entfällt	Mittel	33,0	35,4	2,4	
	N	35	34	34	
	SD	27,5	27,8	20,0	
gekalkt	Mittel	50,1	38,6	-11,8	*
	N	57	56	56	
	SD	35,1	27,7	29,1	
ungekalkt	Mittel	42,7	39,4	-3,3	
	N	27	27	27	
	SD	32,0	28,6	33,6	

Die Trockenmasse im Auflagehumus wird auch von der Baumartenzusammensetzung der jeweiligen Bestände (Bestandestyp) beeinflusst. Mit zunehmendem Anteil an Laubholz reduziert sich die Trockenmasse im Auflagehumus (s. Abb. 22). In den von Laubholz bestimmten Bestandestypen Eiche, sonstiges Laubholz, Buche und Laubmischwald (bis 30 % Nadelholzanteil möglich) liegen die Trockenmassen der Auflage überwiegend zwischen 10 und 40 t/ha, in den von Nadelholz bestimmten Bestandestypen zwischen 30 und 70 t/ha.

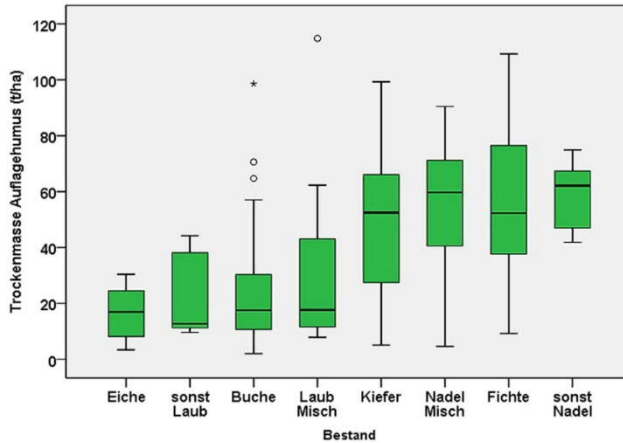


Abbildung 22: Trockenmasse im Auflagehumus [t/ha] bei der BZE II in Hessen nach Bestandestypen

Die Trockenmassen im Auflagehumus sind in den Substratgruppen sehr unterschiedlich. (s. Abb. 23). Geringe Auflagen finden sich auf den eher besser versorgten Standorten auf Basalt/Diabas (BaD), Zechstein (Zec) und Lehm (Leh), aber auch auf Granit (Grt) und Grauwacke (Grw) mit Medianen hauptsächlich bis 35 t/ha. Mittlere Trockenmassen zwischen 10 und 60 t/ha und mit Medianen um 20 t/ha treten bei den Substratgruppen Tonschiefer (ToS), Kalkstein (Kal), Ton(stein) (Ton) und Lösslehmen (Loe) auf. Die höchsten Werte von 25 bis 85 t/ha finden sich bei den Sanden (Sve, Ssv, Suv), Buntsandsteinen (BS) und Quarziten (Quz), also den eher ärmeren Waldstandorten. Auf diesen Standorten sind die Nadelholzanteile in der Regel höher, daher gibt es Korrelationen zwischen den Substratgruppen und Bestandestypen.

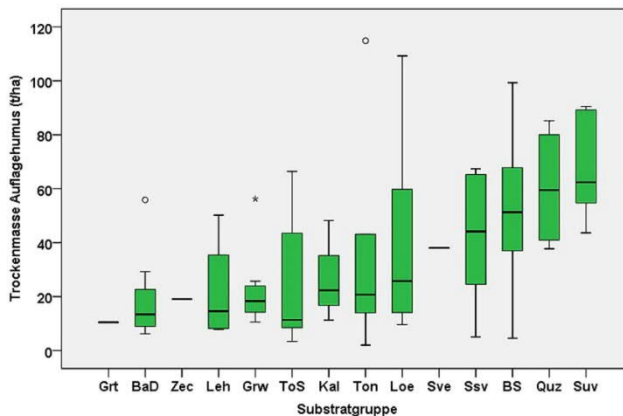


Abbildung 23: Trockenmasse im Auflagehumus [t/ha] bei der BZE II in Hessen nach Substratgruppen (BaD: Basalt/Diabas, BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Grt: Granit, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer, Zec: Zechstein)

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 weiterhin ein wichtiger Indikator einer nachhaltigen Nutzung von Wäldern, gerade vor dem Hintergrund der Waldkalkung und Vollbaumnutzung.

Definitionsgemäß sind im Mineralboden Korngrößen unter 2 mm Siebdurchmesser als Feinboden und über/gleich 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 (g/cm^3) abzüglich des Grobbodens (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 Hessens analytisch bestimmt. (WELLBROCK et al. 2006) Aus diesen Messdaten und der jeweiligen Schichtmächtigkeit wird der Feinbodenvorrat programmgestützt berechnet und für die Berechnung der Elementvorräte verwendet. Vergleichende Auswertungen der bei der BZE I gemessenen Trockenrohddichten des Gesamtbodens und der bei der BZE II gemessenen Trockenrohddichte des Feinbodens ergeben deutlich höhere Trockenrohddichten des Gesamtbodens bei der BZE I. Dies ist nachvollziehbar, da im Gesamtboden immer auch kleinere Steine mit hohem Eigengewicht und geringem Volumen mit eingewogen wurden, die bei der Trockenrohddichte des Feinbodens ausgesiebt werden und damit unberücksichtigt bleiben. Die Zielgröße Elementvorrat des Feinbodens wird dadurch deutlich überschätzt. Die bei der BZE I am Profil geschätzten Grobbodenanteile lagen im Mittel über den tatsächlichen Messwerten der BZE II. Damit wurden die Feinbodenvorräte bei der BZE I unterschätzt. Um Auswertungen auf möglichst einheitlicher Datenbasis mit möglichst genauen und vergleichbaren Messwerten sicherstellen zu können, wurden die Feinbodenvorräte der BZE II auch für die BZE I verwendet.

6.3.1 Trockenrohddichten des Feinbodens

Die Trockenrohddichten des Feinbodens (s. Abb. 24) steigen erwartungsgemäß mit zunehmender Bodentiefe kontinuierlich an, zeigen aber in Abhängigkeit von den Substratgruppen Unterschiede. Sehr geringe Trockenrohddichten finden sich bei Standorten auf Grauwacke (graue Linie) mit Werten von $0,72 \text{ g/cm}^3$ in 0-5 cm bis $1,25 \text{ g/cm}^3$ in 60-90 cm Bodentiefe. Wesentlich höhere Trockenrohddichten finden

sich bei Standorten des Buntsandsteins (dunkelrote Linie mit 1,0-1,6 g/cm³) und den schwach verlehmtten Sanden in ähnlicher Höhe. In der Tiefenstufe 0-5 cm reicht die Spanne der gemessenen Trockenrohdichten von 0,72 g/cm³ (Grauwacke) bis zu 1,12 g/cm³ (Lehm). Bei sonst gleichen Bedingungen ergibt dies bei Lehmen schon über 50 % höhere Elementvorräte nur aufgrund höherer Trockenrohdichten gegenüber Standorten auf Grauwacke. Die Spannen zwischen den Substratgruppen bleiben in jeder Tiefenstufe relativ ähnlich. Auffällig sind die sehr geringen Trockenrohdichten von weit unter 1,2 g/cm³ in den Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm, sie sind Ausdruck der hohen Humusgehalte und des lockeren Mineralbodens direkt unterhalb des Auflagehumus.

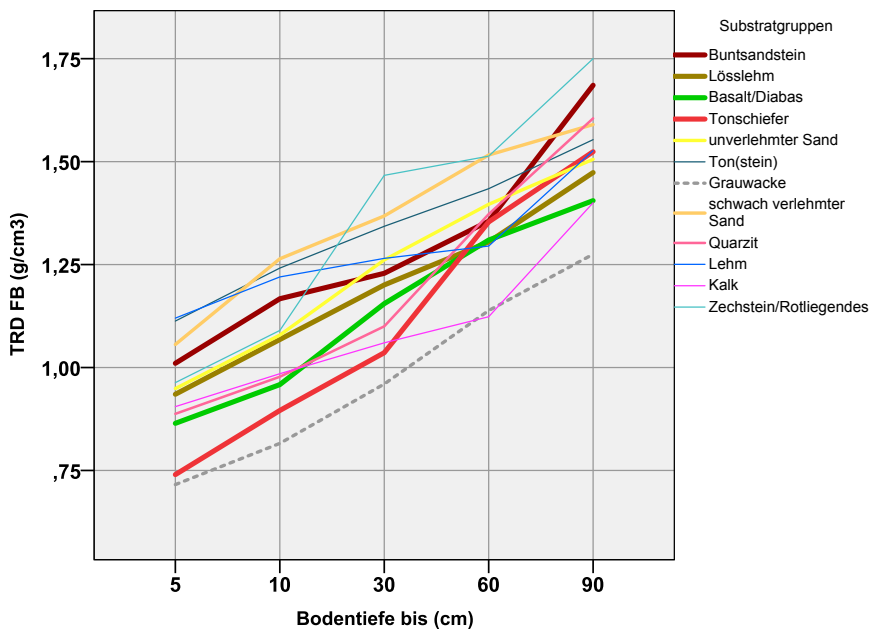


Abbildung 24: Trockenrohdichten des Feinbodens (TRD FB) [g/cm³] in Hessen nach Tiefenstufen und Substratgruppen (fette Linien: Anzahl Profile über 10 % an Gesamtzahl der BZE II-Punkte)

6.3.2 Grobbodenanteil

Auch beim Grobbodenanteil finden sich typische Muster: Die Grobbodenanteile nehmen mit zunehmender Bodentiefe deutlich zu (s. Abb. 25). Dabei zeigen sich eindeutige Unterschiede zwischen den Substratgruppen. Die Profile der Substratgruppe Grauwacke weisen die höchsten Grobbodenanteile zwischen 17 % in 0-5 cm und 64 % in 60-90 cm Bodentiefe auf. Es folgen die Substratgruppen Tonschiefer und Basalt/Diabas mit um ca. 10-15 %-Punkten geringeren Grobbodenanteilen. Die Substratgruppe Buntsandstein liegt mit mittleren Grobbodenanteilen von 3 % in

0-5 cm und 38 % in 60-90 cm Bodentiefe im mittleren Bereich der BZE-Standorte in Hessen. Erwartungsgemäß haben Sande und Lösslehme nur sehr geringe Grobbodenanteile.

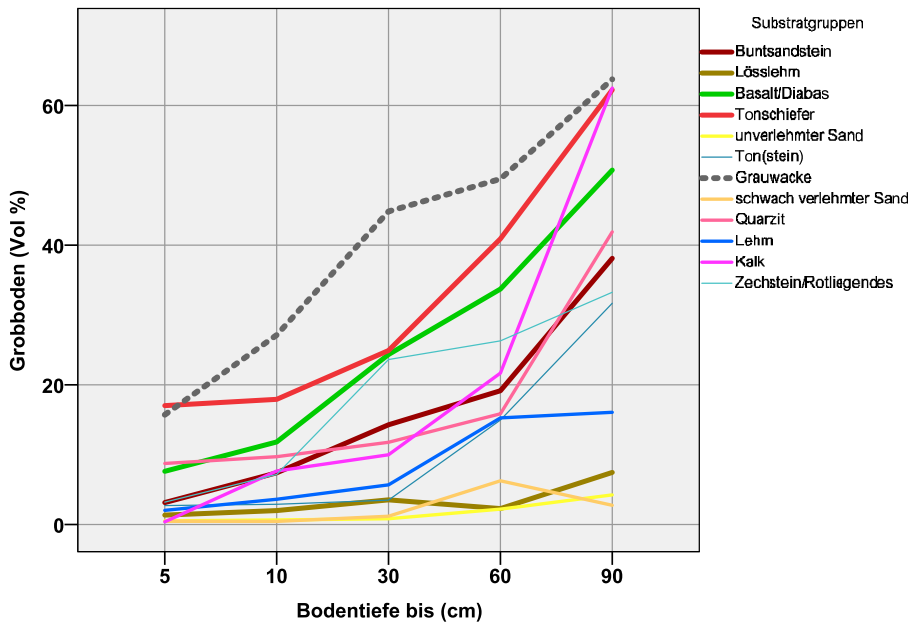


Abbildung 25: Grobbodenanteile [Vol.-%] in Hessen nach Tiefenstufen und Substratgruppen (fette Linien: Anzahl Profile über 10 % an der Gesamtzahl der BZE II-Punkte)

6.3.3 Feinbodenvorrat

Entsprechend den 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. 26).

Die Spanne der mittleren Feinbodenvorräte bis 90 cm Bodentiefe je Substratgruppe reicht von 3.600 t/ha für Grauwacke bis zu über 13.000 t/ha bei den Sanden. Diese weite Spanne erklärt sich durch geringe Trockenrohdichten und hohe Grobbodenanteile bei den Punkten in der Substratgruppe Grauwacke und durch hohe Trockenrohdichten und geringe Grobbodenanteile bei den Punkten der Sande. Die mittleren Feinbodenvorräte der weiteren Substratgruppen liegen je nach Kombination der Trockenrohdichte und Grobbodenanteile zwischen diesen Extremen, teilweise mit weiten Spannen und Überschneidungen, aber auch deutlichen Mustern. Die Böden mit hohen Grobbodenanteilen (Grauwacke, Kalk, Tonschiefer und Basalt/Diabas) haben häufig auch geringe Trockenrohdichten und daher relativ geringe Feinbodenvorräte, wohingegen die Böden mit hohen Trockenrohdichten

(z. B. Sande und Lehme) kaum Grobbodenanteile enthalten und damit höhere Feinbodenvorräte aufweisen.

Diese Unterschiede werden bedeutend bei der Beurteilung von Elementvorräten, die schon aufgrund der Feinbodenvorräte in Abhängigkeit des Substrates sehr verschieden sind.

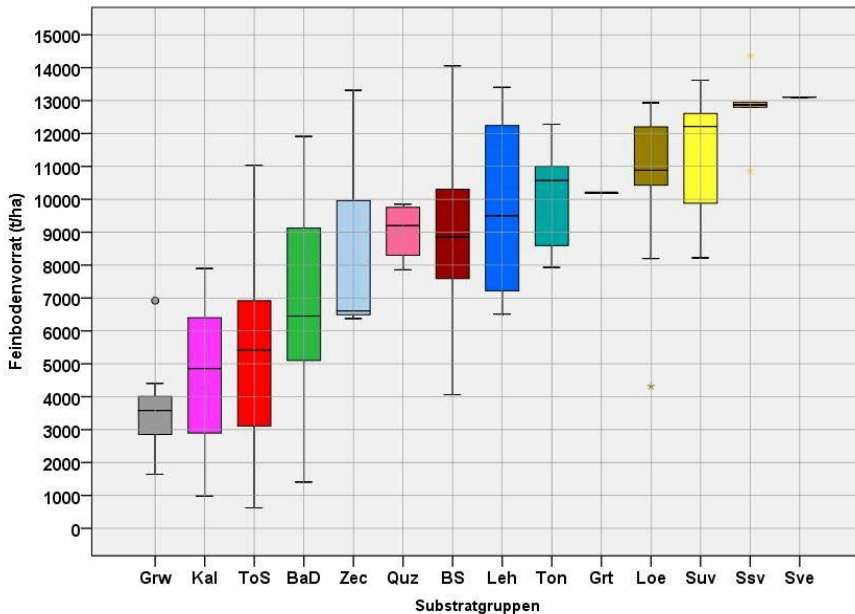


Abbildung 26: Feinbodenvorräte [t/ha] in Hessen nach Substratgruppen bis 90 cm Bodentiefe (BaD: Basalt/Diabas, BS: Buntsandstein, Grw: Grauwacke, Grt: Granit, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzlit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer, Zec: Zechstein/Rotliegendes)

6.3.4 Nutzbare Feldkapazität

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) ist ein Maß für den pflanzennutzbaren Bodenwassergehalt¹ und eine grundlegende, wichtige 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 absolute Wasserspeicher (nFK) im Boden ist und ob er tatsächlich zu Beginn der Vegetationsperiode im Boden vorhanden ist und damit den Pflanzen in der Vegetationsperiode zur Verfügung steht. Die nFK wird anhand

¹ 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)

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.

Wie die Trockenrohdichte und der Grobbodenanteil folgt auch die nFK bestimmten Mustern. In Abbildung 27 ist die mittlere nFK nach den BZE-Tiefenstufen auf Basis des BZE II-Datensatzes für die Substratgruppen in Hessen dargestellt.

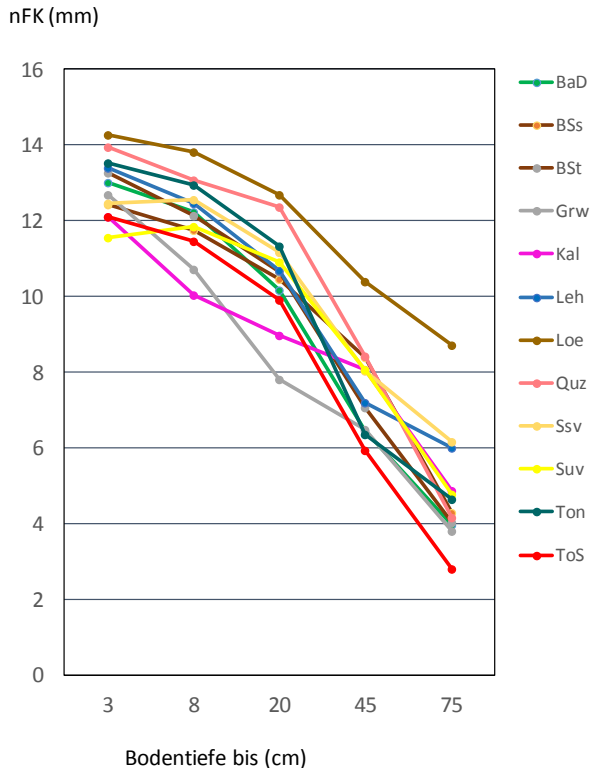


Abbildung 27: Mittlere nutzbare Feldkapazität (nFK) [mm] berechnet nach Stufenmitten der BZE-Tiefenstufen für die Substratgruppen in Hessen anhand der BZE II-Daten (nur Substratgruppen mit mind. 4 BZE-Punkten) (BaD: Basalt/ Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BSt: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

Grundsätzlich nimmt die nFK mit der Bodentiefe ab, da mit zunehmender Bodentiefe die Trockenrohdichten und Grobbodenanteile zunehmen und die Humusgehalte abnehmen. Die höchste nFK haben die Böden der Substratgruppe Lösslehm in allen Tiefen. Dies liegt an der besonderen Korngrößenzusammensetzung des Lösslehms mit relativ wenig Feinporen und Grobporen, aber vielen Mittelporen und

dem weitgehend fehlenden Grobboden. Die geringsten mittleren nFK-Summen bis maximal 90 cm Bodentiefe weisen die BZE-Punkte der Substratgruppen Kalk, Zechstein, Tonschiefer und Grauwacke auf. Dies liegt z. T. an der Flachgründigkeit der Profile, z. B. bei Kalken und Tonschiefern, aber auch an teilweise sehr hohen Steingehalten in den unteren Bodentiefen dieser Substratgruppen (s. Abb. 25).

Für die Beurteilung der Standorte hinsichtlich ihrer Boden-Wasserspeicherkapazität ist die nFK bis maximal 90 cm Bodentiefe aufsummiert und nach Substratgruppen getrennt in Abbildung 28 dargestellt. Die mittlere nFK in Hessen liegt mit 135 mm im relativ hohen Bereich nach der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Die höchsten Werte finden sich im tiefgründigen Lösslehm mit 188 mm und liegen damit in der sehr hohen Bewertungsstufe. Die meisten Substratgruppen in Hessen befinden sich mit ihrer durchschnittlichen nFK im hohen Bewertungsbereich, so der Basalt/Diabas, der Buntsandstein, Ton(stein), Lehm, die Sande und der Quarzit. Teilweise wurden aber auch nur nFK-Summen von unter 30 mm errechnet, die nach der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) als äußerst gering eingestuft werden, so z. B. bei den Kalken und Tonschiefern.

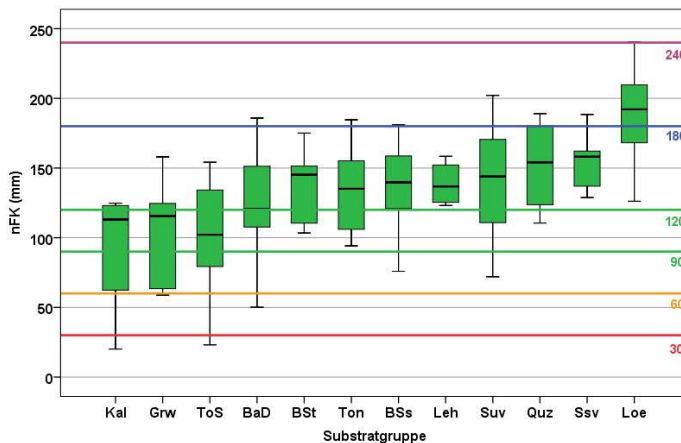


Abbildung 28: Nutzbare Feldkapazität [mm] bis maximal 90 cm Bodentiefe nach Substratgruppen anhand der BZE II-Daten in Hessen (nur Substratgruppen mit mind. 4 BZE-Punkten), als Linien sind die Bewertungsgrenzen nach der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003; s. Tab. 16, S. 123) angegeben (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BSt: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

6.4 Bodenmorphologische und bodenphysikalische Kenngrößen im Ländervergleich

Jan Evers, Uwe Paar

Da in den nachfolgenden Ergebnisdarstellungen zur Bodenchemie auch die Mittelwerte für die Länder Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt dargestellt sind, wird in diesem Kapitel auf einige grundsätzliche Unterschiede hinsichtlich der Verteilung der Substratgruppen und damit ihrer bodenphysikalischen Kenngrößen eingegangen.

Für die drei Bundesländer insgesamt bilden die Sande mit knapp 40 % das größte Kollektiv, dabei sind die unverlehmten 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 Grauwanke-, 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. 29).

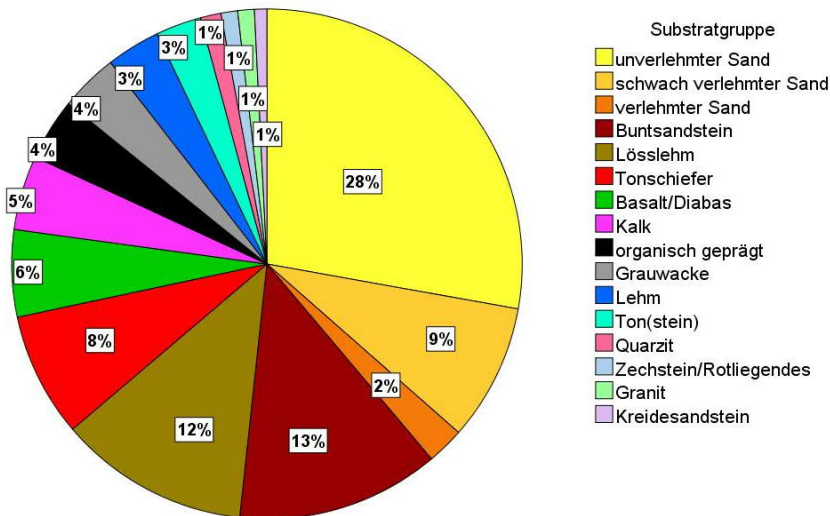


Abbildung 29: Verteilung der BZE-Punkte nach Substratgruppen (Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt)

Die Verteilungen der Substratgruppen im BZE-Kollektiv sind entsprechend den naturräumlich-standörtlichen Verhältnissen in den Bundesländern Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt unterschiedlich.

Der Ländervergleich zeigt Folgendes (s. Tab. 14):

Tabelle 14: Anzahl und prozentuale Verteilung der BZE II-Punkte auf die Substratgruppen in den Bundesländern

Substratgruppe	Hessen		Niedersachsen		Sachsen-Anhalt	
	N	%	N	%	N	%
Buntsandstein	39	28	10	6	0	0
Lösslehm	20	14	18	11	8	11
Basalt/Diabas	20	14	0	0	1	1
Tonschiefer	16	11	7	4	7	9
unverlehmter Sand	8	6	59	36	39	51
Ton(stein)	7	5	4	2	0	0
Grauwacke	7	5	5	3	2	3
schwach verlehmter Sand	5	4	23	14	5	7
Quarzit	4	3	0	0	1	1
Lehm	4	3	6	4	3	4
Kalk	4	3	14	8	0	0
Zechstein (Rotliegendes)	3	2	0	0	1	1
verlehmter Sand	1	1	4	2	4	5
Granit	1	1	1	1	2	3
organisch geprägt	0	0	13	8	2	3
Kreidesandstein	0	0	2	1	1	1
Summe	139	100	166	100	76	100

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 Sachsen-Anhalts nicht vor, ist aber in der niedersächsischen BZE mit zehn Punkten (6 %) vertreten. Nur der Lösslehm ist über alle drei Bundesländer relativ gleichmäßig im BZE-Kollektiv verteilt (11 % Niedersachsen, 11 % Hessen und 14 % Sachsen-Anhalt). Basalt/Diabas-Standorte sind besonders typisch für Hessen. Sie kommen im Rahmen der BZE 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 bedingte 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 nur vereinzelt 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 Unterschiede zwischen den Ländern in den weiteren Auswertungen.

Im Vergleich der Bundesländer Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt gibt es hinsichtlich der durchschnittlichen Trockenrohdichten des Feinbodens in Abhängigkeit der Tiefenstufen länderbezogene Unterschiede (s. Abb. 30): 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 Klassifizierung 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.

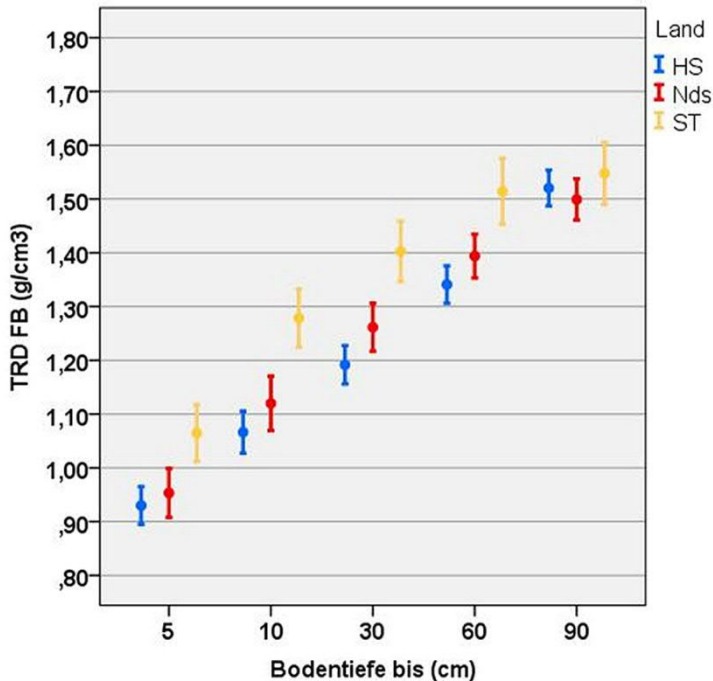


Abbildung 30: Durchschnittliche Trockenrohdichten des Feinbodens (TRD FB) [g/cm³] nach Tiefenstufen für Hessen (HS), Niedersachsen (Nds) und Sachsen-Anhalt (ST); dargestellt ist der Mittelwert und das 95 %-Konfidenzintervall

Im Vergleich der Bundesländer Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt weisen die Waldböden Hessens mit Abstand die höchsten Grobbodenanteile auf (s. Abb. 31).

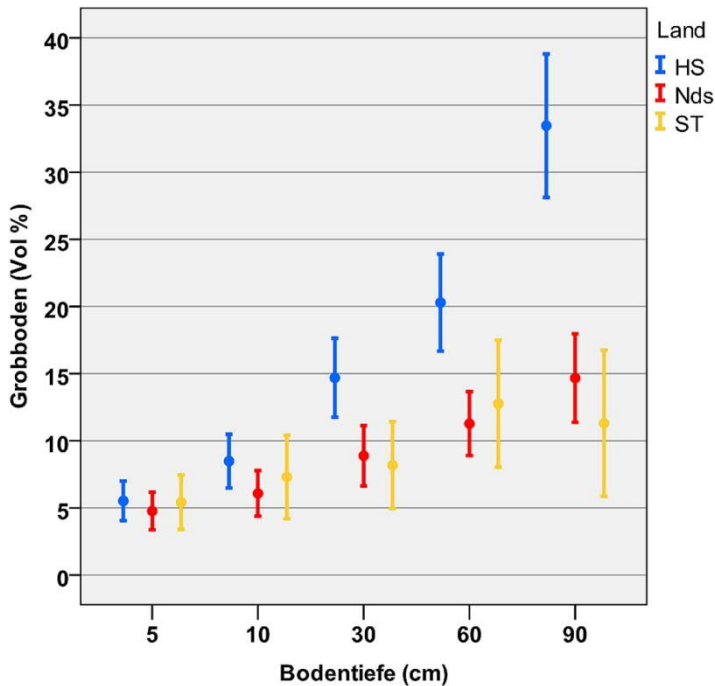


Abbildung 31: Durchschnittliche Grobbodenanteile [Vol.-%] nach Tiefenstufen für Hessen (HS), Niedersachsen (Nds) und Sachsen-Anhalt (ST); dargestellt ist der Mittelwert und das 95 %-Konfidenzintervall

Mit Ausnahme der Tiefenstufe 0-5 cm sind die Grobbodenanteile in Hessen am höchsten, in den Tiefenstufen 10-30 cm und 30-60 cm 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.

Für Hessen ergibt sich der geringste durchschnittliche Feinbodenvorrat in allen Tiefenstufen, es folgt Niedersachsen und dann Sachsen-Anhalt (s. Abb. 32).

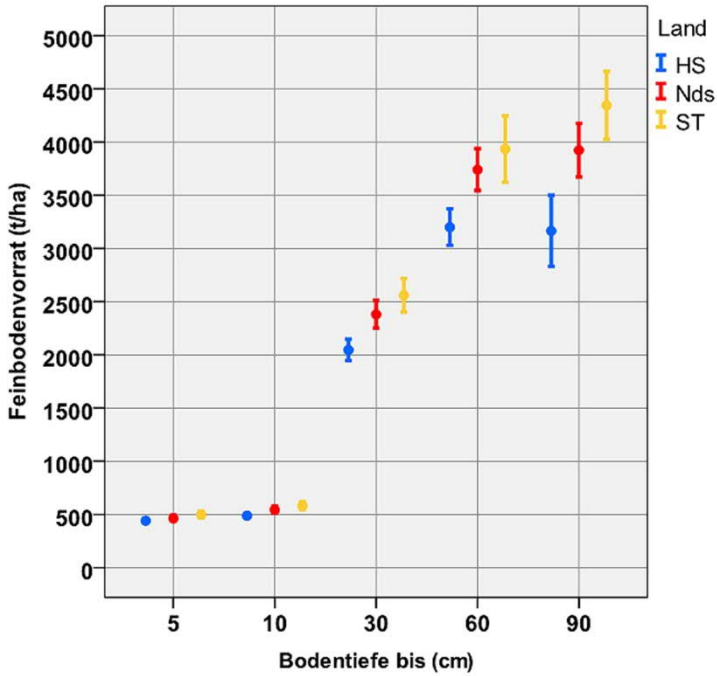


Abbildung 32: Durchschnittlicher Feinbodenvorrat [t/ha] nach Tiefenstufen für Hessen (HS), Niedersachsen (Nds) und Sachsen-Anhalt (ST); dargestellt ist der Mittelwert und das 95 %-Konfidenzintervall

Unterschiede zwischen den Bundesländern Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt bei den durchschnittlichen Elementvorräten in den Waldböden können auf die länderspezifische Verteilung der Substrate zurückgeführt werden. 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 zwischen 10.000-14.000 t/ha immer die höchsten Werte, die Feinbodenvorräte nehmen dann über Ton(stein), Buntsandstein, Kalk, Tonschiefer bis hin zur Grauwacke, die bei rund 4.000 t/ha liegt, kontinuierlich ab (s. Abb. 33).

Der durchschnittliche Feinbodenvorrat der Waldböden liegt in Hessen mit rund 8.500 t/ha deutlich niedriger als in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt mit rund 11.000 t/ha (s. Tab. 15). 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 verantwortlich sind. Die Sande sind in Hessen selten, dafür kommen hier vor allem Böden mit Buntsandstein, Basalt/Diabas sowie Tonschiefer vor, die deutlich geringere Feinbodenvorräte zwischen 4.000 und 14.000 t/ha aufweisen (s. Abb. 34). Bei der Berechnung von Elementvorräten und ihrer Veränderung ist die Kenntnis der zu Grunde 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.

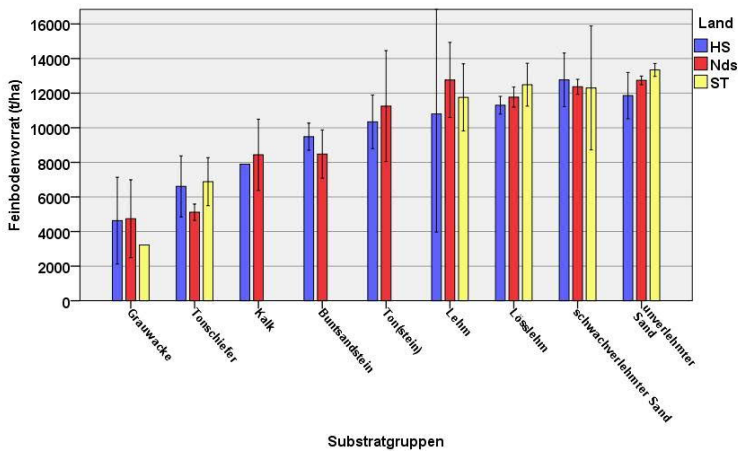


Abbildung 33: Mittlere Feinbodenvorräte [t/ha] in Hessen (HS), Niedersachsen (Nds) und Sachsen-Anhalt (ST) nach Substratgruppen bis 90 cm Bodentiefe ($n > 3$ je Bundesland, als Streumaß ist der Konfidenzintervall angegeben)

Tabelle 15: Durchschnittliche Feinbodenvorräte [t/ha] bis max. 90 cm Bodentiefe in Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt

Feinbodenvorrat	N	Mittel [t/ha]	SD* [t/ha]	Median [t/ha]	Min [t/ha]	Max [t/ha]
Hessen	139	8.501	3.311	8.760	622	14.372
Niedersachsen	166	10.738	3.271	12.075	918	14.774
Sachsen-Anhalt	76	11.077	3.844	12.703	1.026	15.631

* SD = Standardabweichung

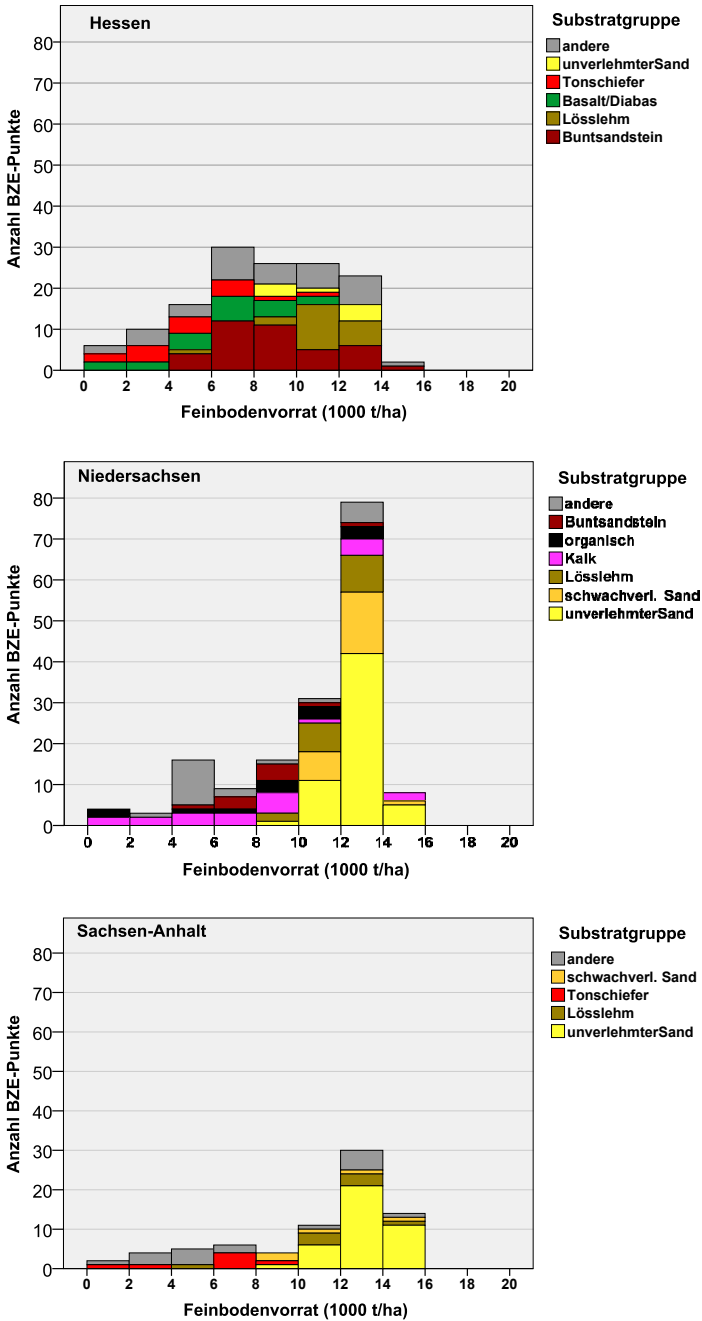


Abbildung 34: Verteilung der Feinbodenvorräte [1.000 t/ha] in Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt nach den wichtigsten Substratgruppen bis 90 cm Bodentiefe

6.5 Bodenchemische Kenngrößen in Hessen

Jan Evers, Uve Paar, Egbert Schönfelder

Die wichtigsten bodenchemischen Kenngrößen für den Auflagehumus und den Mineralboden werden anhand der Referenzwerte für die Bewertung von forstlichen Standorten mit ihren Einstufungen von „sehr gering“ bis „sehr hoch“ in Tabelle 16 bewertet (nach AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Die Grenzwerte für die verschiedenen Bewertungsbereiche sind als Orientierung zu verstehen und keinesfalls als scharf getrennte Grenzen. In den folgenden Abbildungen sind diese Bewertungsbereiche in den jeweiligen Profilsommen farblich hinterlegt, um die Bewertung zu erleichtern. Diese 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 mit 90 cm Bodentiefe den wichtigsten Wurzelraum der Waldbäume erfasst. Dies trifft für die intensivere Durchwurzelung (mittlere bis extreme Durchwurzelung) auch 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 unter 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 Standortspotentiale von Waldbäumen sollten gerade im Tiefland auch tiefere Bodenschichten einbezogen werden (EVERS et al. 2015).

Tabelle 16: Bewertungsrahmen der Forstlichen Standortsaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003)

(eff. Wurzelraum mit Auflagehumus)	sehr gering	gering	gering mittel	mittel	mittel hoch	hoch	sehr hoch
Ake (kmolc/ha)	50	100	250	500	1000	2000	
Basensättigung (%)	7	20	30	50	70	85	
Ca (kg/ha)	200	400	800	2000	4000	8000	
Mg (kg/ha)	50	100	200	500	1000	2000	
K (kg/ha)	200	400	600	800	1200	1600	
C (t/ha)	50		100	200		400	
N (t/ha)	2,5		5,0	10,0		20,0	
C/N	35	25	20	16	12	10	
Pufferbereiche	Fe	Al-Fe	Al	Austauscher	Kohlensäure/Silikat	Carbonat	
pH (H ₂ O)	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 pH(H₂O)-Werten unter 6,2 als effektive Austauschkapazität (Ake) bestimmt, wobei der Austausch im Perkolat annähernd bei bodeneigenem pH vollzogen wird. Die Kationenkonzentrationen werden im Perkolat gemessen, in Ionenäquivalente umgerechnet und auf die Bodenmenge bezogen. Bei pH(H₂O)-Werten von über 6,2 wird die potentielle Austauschkapazität (Akt) bestimmt (WELLBROCK et al. 2006). 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 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 pH(H₂O)-Werten unter 4,2 lagern sich Al-Hydroxy-Polymere in die Tonmineral-Zwischenschichten ein, es kommt langfristig zur Tonmineralzerstörung und 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 35 ist für Hessen die mittlere Austauschkapazität für den Auflagehumus und die Mineralboden-Tiefenstufen der BZE I und II mit den Konfidenzintervallen (orange) und den Mittelwerten der Länder Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt (rote Kreise) dargestellt.

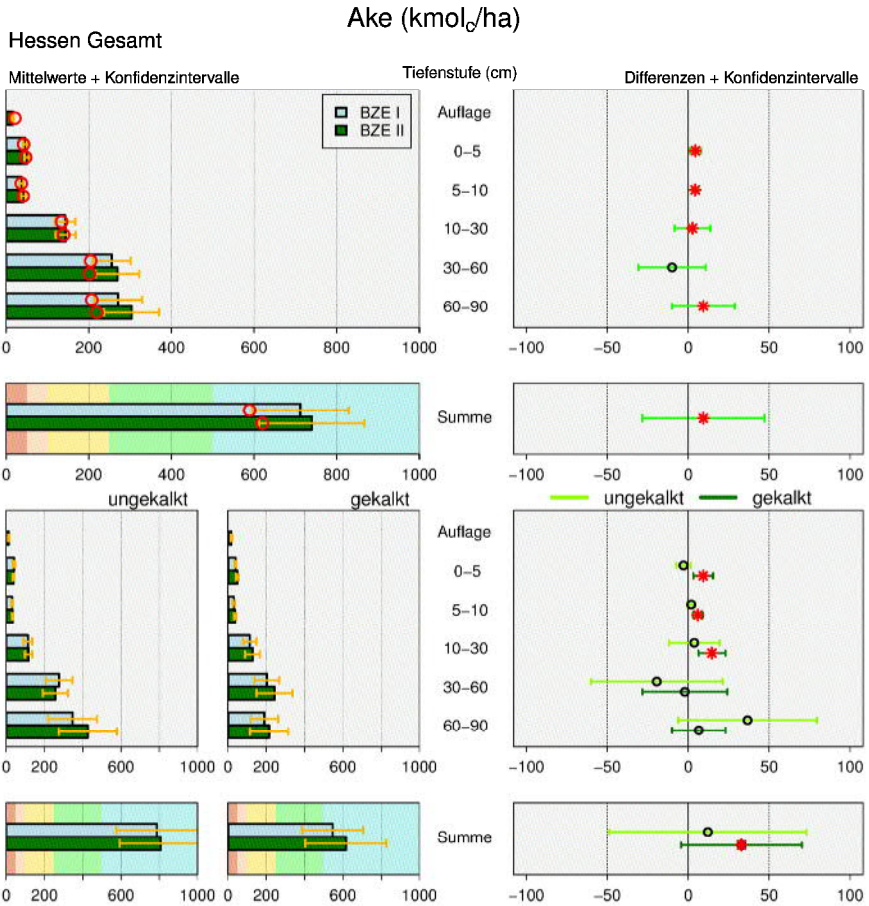


Abbildung 35: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] in bessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II-BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt gegliedert (untere 6 Grafiken)

Abbildung 36 gibt einen Überblick über den schematischen Aufbau der Abbildungen zur Austauschkapazität und steht stellvertretend für die folgenden Abbildungen mit diesem Aufbau.

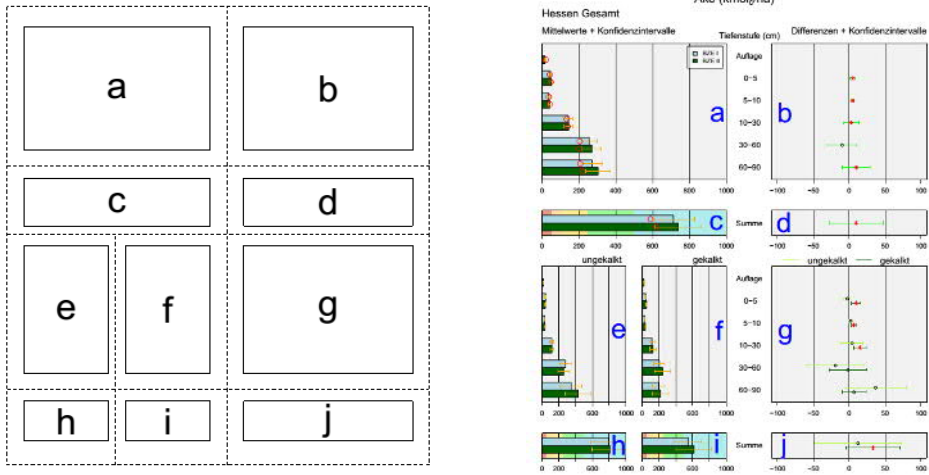


Abbildung 36: Schematischer Aufbau der Abbildungen zur Austauschkapazität (Ake). Die Erläuterungen der Teilgrafiken sind im Text zu finden.

Im Folgenden werden die Teilgrafiken erläutert:

Teilgrafik a: Mittlerer Vorrat der BZE I (hellblau) und BZE II (dunkelgrün) nach Auflage und BZE-Tiefenstufen 0-5, 5-10, 10-30, 30-60 und 60-90 cm Bodentiefe; in orange sind die 95 %-Konfidenzintervalle, mit roten Kreisen der Gesamtmittelwert der drei Länder Niedersachsen, 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 Profilvorrat (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 STANDORTSKARTIERUNG 2003): rot = sehr gering, orange = gering, gelb = gering-mittel, grün = mittel, hellblau = mittel-hoch, dunkelblau = hoch, violett = sehr hoch (s. a. Tab. 16).

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).

Teilgrafiken e und f: Inhalt wie Teilgrafik a, nur für die Teilkollektive der BZE getrennt nach gekalkt und ungekalkt, wobei von der Bodenschutzkalkung

ausgeschlossene Standorte (z. B. Kalk, Basalt/Diabas, Sand und Zechstein) in diese Darstellung nicht einbezogen sind.

Teilgrafik g: Entspricht Teilgrafik b, nur bezogen auf die Kollektive gekalkt und ungekalkt und bei Vorhandensein der jeweiligen Tiefenstufe bei der BZE I und II.

Teilgrafiken h und i: Entsprechen der Teilgrafik c, aber bezogen auf die Kollektive gekalkt und ungekalkt.

Teilgrafik j: Entspricht der Teilgrafik d, aber bezogen auf die Kollektive gekalkt und ungekalkt.

Insgesamt liegt die Austauschkapazität in den Waldböden Hessens im Mittel aller BZE-Punkte bei der BZE II mit rund 740 kmol_c/ha im mittel-hohen Bewertungsbereich nach der Forstlichen Standortaufnahme (s. Tab. 16, S. 123 in diesem Band). Damit haben die Waldböden in Hessen im Vergleich der Bundesländer Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt die höchste mittlere Austauschkapazität (s. Abb. 35, Teilgrafik c). Dies folgt insbesondere aus den Befunden für tiefere Bodenschichten ab 30 cm des Mineralbodens (Teilgrafik a). Substratabhängig streuen diese Werte zwischen 74 kmol_c/ha bei einem flachgründigen Tonschiefer-Ranker bei Bischoffen (Niederweidbacher Becken an der Aartalsperre) und 5.250 kmol_c/ha bei einer tiefgründigen Parabraunerde mit Basalteinlagerung bei Homberg. Dies zeigt die große Spanne der Ake der forstlichen Waldböden in Hessen, weshalb eine zusätzliche Auswertung nach Substratgruppen sinnvoll ist.

Mit 16 kmol_c/ha trägt der Auflagehumus bedingt durch seine in der Regel geringe Mächtigkeit durchschnittlich nur etwa 2 % zur gesamten Austauschkapazität bis 90 cm Bodentiefe bei. In den oberen (0-30 cm), mittleren (30-60 cm) und unteren (60-90 cm) Bodenschichten verteilt sich die Austauschkapazität mit 230-270 kmol_c/ha je Schicht ähnlich. Die höchste Austauschkapazität (bezogen auf jeweils 5 cm Bodenschicht) mit 50 kmol_c/ha findet sich aufgrund hoher Humusgehalte in den oberen 5 cm des Mineralbodens und aufgrund hoher Tonanteile in den unteren Bodenschichten von 60-90 cm (s. Abb. 35, Teilgrafik a).

Die durchschnittliche Austauschkapazität hat sich in den Tiefenstufen 0-30 cm bei der BZE II im Vergleich zur BZE I leicht um rund 10 kmol_c/ha erhöht, dies entspricht einer Zunahme von 5 %-Punkten (s. Abb. 35, Teilgrafik b). Das Gleiche ist auch für die Ebene des gesamten Profils nachweisbar (s. Abb. 35, Teilgrafik d), hier erhöhte sich die durchschnittliche Austauschkapazität um 9,4 kmol_c/ha in gleicher absoluter Größenordnung (+1,4 %).

Diese Zunahme kann für den Oberboden durch die Waldkalkung erklärt werden (Teilgrafiken e-j). Auf Tiefenstufenebene (Teilgrafik g) hat sich die Austauschkapazität nur bei den gekalkten BZE-Punkten signifikant erhöht, und zwar in den Tiefenstufen 0-5, 5-10 und 10-30 cm. Auf Profilebene ergibt sich für das gekalkte Kollektiv eine signifikante Zunahme von 33 kmol_c/ha, die Zunahme von 12 kmol_c/ha im ungekalkten Kollektiv ist nicht signifikant (Teilgrafik j). Über eine übliche Waldkal-

kung von 3 t kohlenurem Magnesiumkalk werden rechnerisch je nach Kalkzusammensetzung ungefähr 60 kmol_c/ha Säureneutralisationskapazität ausgebracht, was relativ gut mit der bei der BZE II gefundenen Zunahme der Austauschkapazität korreliert. Ursache für die Erhöhung ist die durch die Waldkalkung ausgelöste Zunahme der organischen Substanz mit ihrer variablen Ladung im Mineralboden.

Auffällig ist weiterhin, dass die ungekalkten BZE-Punkte mit rund 800 kmol_c/ha durchschnittlich eine deutlich höhere Austauschkapazität aufweisen als die gekalkten BZE-Punkte mit 550 kmol_c/ha (BZE I) und 615 kmol_c/ha (BZE II). Diese Unterschiede zeigen sich vor allem in den Tiefenstufen 30-90 cm. Ein direkter Vergleich der Vorräte zwischen den Kollektiven gekalkt und ungekalkt ist damit für tiefere Mineralbodenschichten nur vor diesem Hintergrund zu interpretieren.

6.5.1.1 Austauschkapazität nach Substratgruppen

Die Austauschkapazität in den Mineralböden der wichtigsten Substratgruppen hessischer Waldböden ist sehr verschieden. Sie reicht von rund 250 kmol_c/ha in den unverlehmten Sanden im Hessischen Ried bis zu über 2.000 kmol_c/ha in den durch Tone bestimmten Waldböden. Die Sande, Buntsandsteine (sandige Ausprägung), Grauwacken, Tonschiefer und Quarzite liegen im mittleren Bewertungsbereich, die Buntsandsteine (tonige Ausprägung), Lösslehme und Lehme im mittel-hohen und die Kalke, Basalt/Diabase und Ton(stein)e überwiegend im hohen Bewertungsbereich. Dabei sind die Schwankungen innerhalb der einzelnen Substratgruppen, vor allem in den besseren Bewertungsstufen, erheblich. Die Verteilungen bei der BZE II sind für die einzelnen Substratgruppen in Abbildung 37 dargestellt.

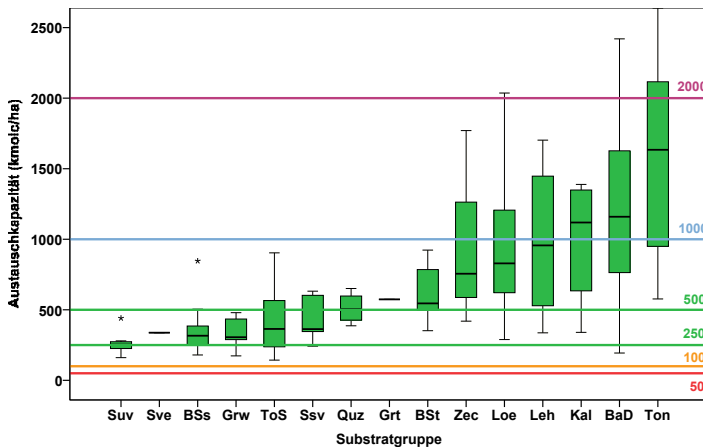


Abbildung 37: Austauschkapazität [kmol_c/ha] im Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe bei der BZE II nach Substratgruppen in Hessen (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BSt: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Grt: Granit, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzlit, Ssv: schwach verlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer, Zec: Zechstein; Grenzwerte: s. Tab. 16, S. 123)

Die weitaus überwiegende Anzahl der BZE II-Punkte in Hessen weist mindestens eine mittlere Austauschkapazität auf. Nur vereinzelt gibt es BZE II-Punkte, die mit einer geringen Austauschkapazität ausgestattet sind. Sie finden sich in den Substratgruppen Tonschiefer, unverlehmte Sande und Buntsandstein (sandige Ausprägung).

Bei den Standorten mit eher geringer Austauschkapazität finden sich die überwiegenden Austauscherplätze in den oberen 30 cm des Mineralbodens, so z. B. bei den unverlehmten Sanden mit 46 % und Buntsandstein (sandige Ausprägung) mit 43 % (s. Abb. 38). Dies liegt vor allem an den hohen relativen Anteilen organischer Substanz im Oberboden. Bei Substratgruppen im eher mittleren Bewertungsbereich sind die Anteile mit ca. 30-35 % je Bodenschicht ähnlich, wogegen bei den besseren Standorten die höheren Anteile der Austauschkapazität in unteren Bodenschichten zu finden sind. Dies liegt an den relativ hohen pH-Werten und Basensättigungen dieser Schichten bei den entsprechenden Substraten. Eine Ausnahme bilden die Kalke, hier liegen die höchsten Anteile der Austauschkapazität mit über 60 % im Oberboden, was auf die hohen Skelettanteile und damit geringeren Feinbodenvorräte in tieferen Bodenschichten zurückgeführt werden kann. Die Anteile des Auflagehumus an der Austauschkapazität sind relativ gering, sie haben nur bei den ärmeren Standorten mit maximal 8 % nennenswerte Anteile an der gesamten Austauschkapazität im Profil.

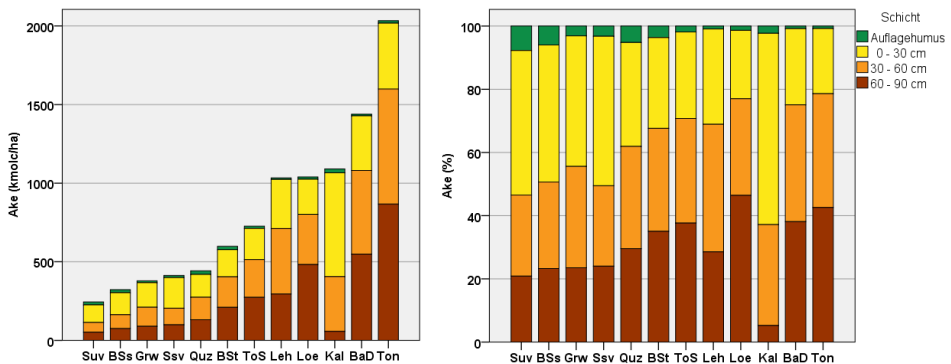


Abbildung 38: Austauschkapazität (Ake) in den Substratgruppen im Mineralboden nach Bodenschichten (0-30, 30-60, 60-90 cm) in kmol./ha (links) und % (rechts) bei der BZE II, dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (Hessen) (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BSt: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzlit, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

Im Folgenden sind die einzelnen Substratgruppen detaillierter beschrieben.

6.5.1.1.1 Buntsandstein

In Abbildung 39 ist die Austauschkapazität für die Substratgruppe Buntsandstein (Gesamt) dargestellt.

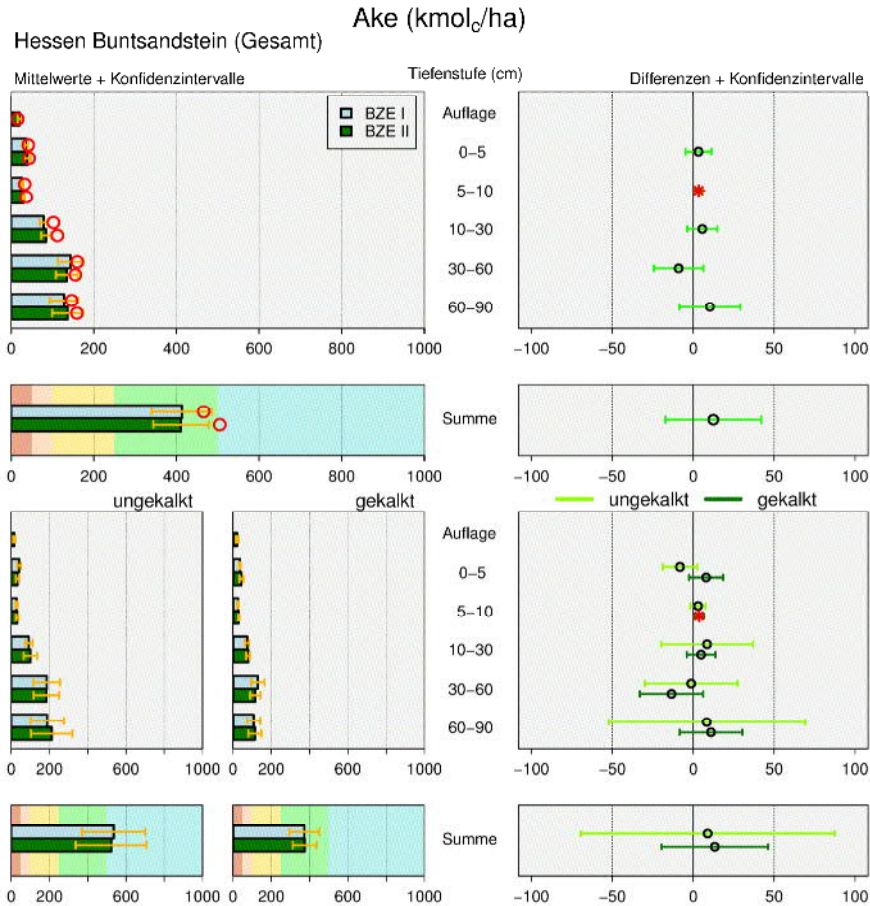


Abbildung 39: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Buntsandstein (n = 39) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II-BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und als Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

Mit rund 400 kmol_c/ha Austauschkapazität (summiert bis 90 cm Bodentiefe), liegen die BZE-Punkte der Substratgruppe Buntsandstein im mittleren Bewertungsbereich (s. Abb. 39). Die geringste Austauschkapazität in dieser Substratgruppe liegt bei 166 kmol_c/ha, die höchste bei 852 kmol_c/ha (BZE II). Insgesamt sind die Veränderungen der Austauschkapazität gering und nicht signifikant. Die durchschnittliche Austauschkapazität liegt im ungekalkten Kollektiv mit 523 kmol_c/ha deutlich über

dem Durchschnitt des gekalkten Kollektivs mit 374 kmol_c/ha (Teilgrafiken h und i). Im Durchschnitt ist die Austauschkapazität der hessischen Buntsandstein-Standorte geringer als die Vergleichswerte in Niedersachsen (s. Abb. 39, Teilgrafiken a und c).

Die Substratgruppe Buntsandstein kann in eine mehr sandige (s. Abb. 40) und eine tonige Fraktion (s. Abb. 41) unterteilt werden. In der sandigen Fraktion ist die Austauschkapazität mit durchschnittlich rund 300 kmol_c/ha bis 90 cm Bodentiefe nur fast halb so hoch wie in der tonigen Fraktion mit 560 kmol_c/ha . Bei den tonigen Buntsandsteinböden liefern vor allem die Bodenschichten unter 30 cm Bodentiefe mit 200 kmol_c/ha relativ hohe Werte der Austauschkapazität. Im Vergleich dazu liegt die Austauschkapazität dieser Bodenschichten bei den sandigen Buntsandsteinböden nur bei ungefähr 100 kmol_c/ha . Signifikante Veränderungen zwischen BZE I und BZE II gab es nur in der sandigen Fraktion des Buntsandsteins in der Tiefenstufe 5-10 cm.

Hinsichtlich der Austauschkapazität auf Profilebene gab es in der sandigen Fraktion (s. Abb. 40, Teilgrafiken h und i) keine Unterschiede zwischen den gekalkten und ungekalkten Kollektiven, in der tonigen Fraktion lagen jedoch die ungekalkten mit rund 630 kmol_c/ha über den gekalkten BZE-Punkten mit rund 500 kmol_c/ha (s. Abb. 41, Teilgrafiken h und i).

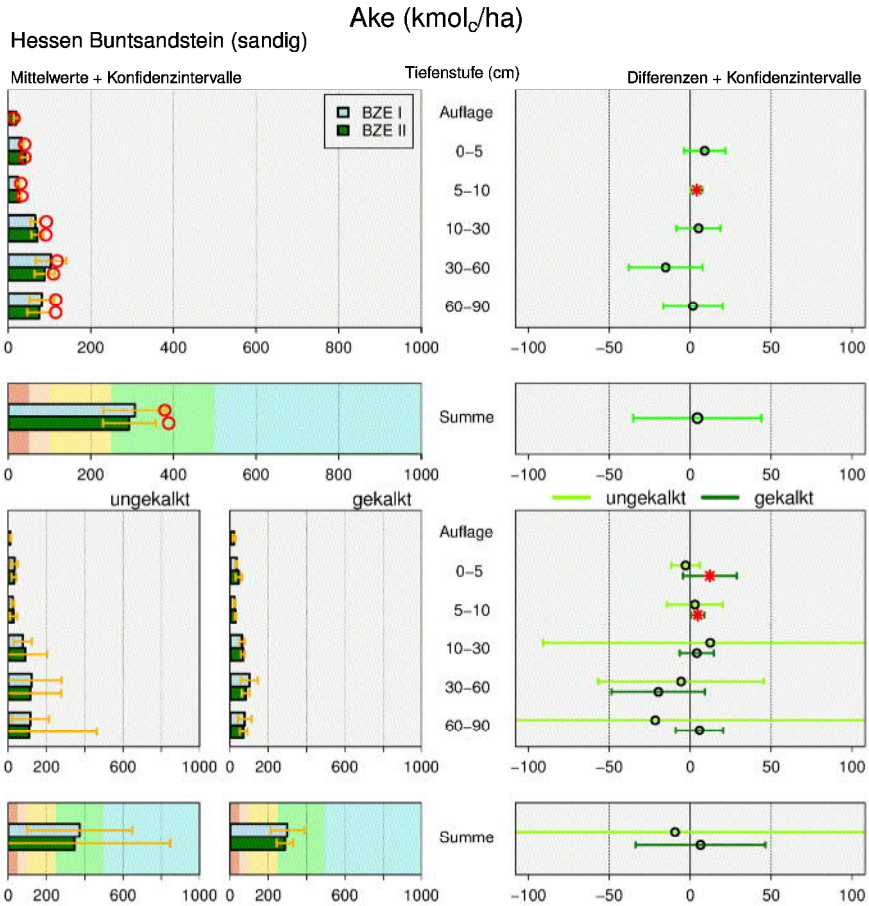


Abbildung 40: Austauschkapazität (Ake) [kmol_e/ha] der Substratgruppe Buntsandstein, sandige Ausprägung (n = 22) in bessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

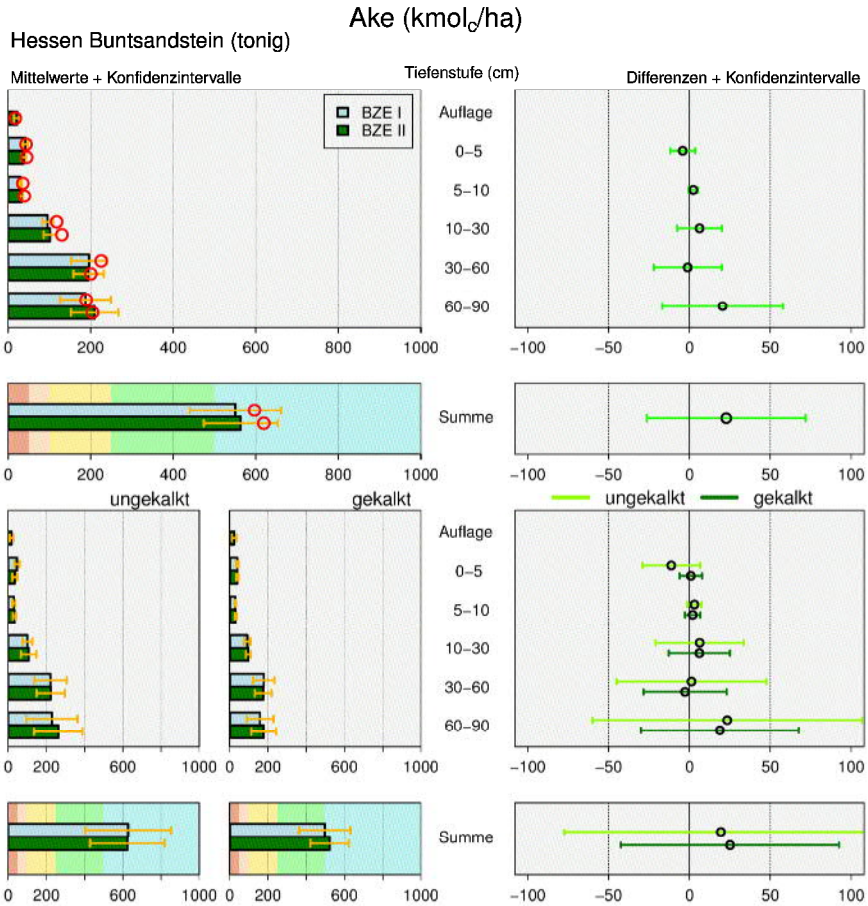


Abbildung 41: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Buntsandstein, tonige Ausprägung (n = 17) in bessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.1.1.2 Lösslehm

Mit rund 950 kmol_c/ha Austauschkapazität summiert bis 90 cm Bodentiefe liegen die BZE-Punkte der Substratgruppe Lösslehm im mittelhohen Bewertungsbereich der Ake (s. Abb. 42). Lösslehm-Standorte verfügen im Mittel über eine mehr als doppelt so hohe Austauschkapazität wie Buntsandstein.

Die Spanne der vorkommenden Austauschkapazitäten bei unterschiedlichen Lösslehm-Standorten ist bezogen auf die kompletten Bodenprofile hoch: Der geringste Wert liegt mit 241 kmol_c/ha in einem schluffigen Boden mit Bimstuff bei

Mengerskirchen (Landkreis Limburg-Weilburg), der höchste mit 2.638 kmol_c/ha mit einer Einmischung von Diabas bei Hirzenhain (Lahn-Dill-Kreis) in der Nähe der Angelburg. Insgesamt sind die Veränderungen der Austauschkapazität zwischen beiden BZE-Zeitpunkten gering und in der Summe nicht signifikant. Die Waldkalkung führte tendenziell zu höheren Austauschkapazitäten in den einzelnen Tiefenstufen, dies ist jedoch nur für die Tiefenstufe 5-10 cm signifikant (Teilgrafik g).

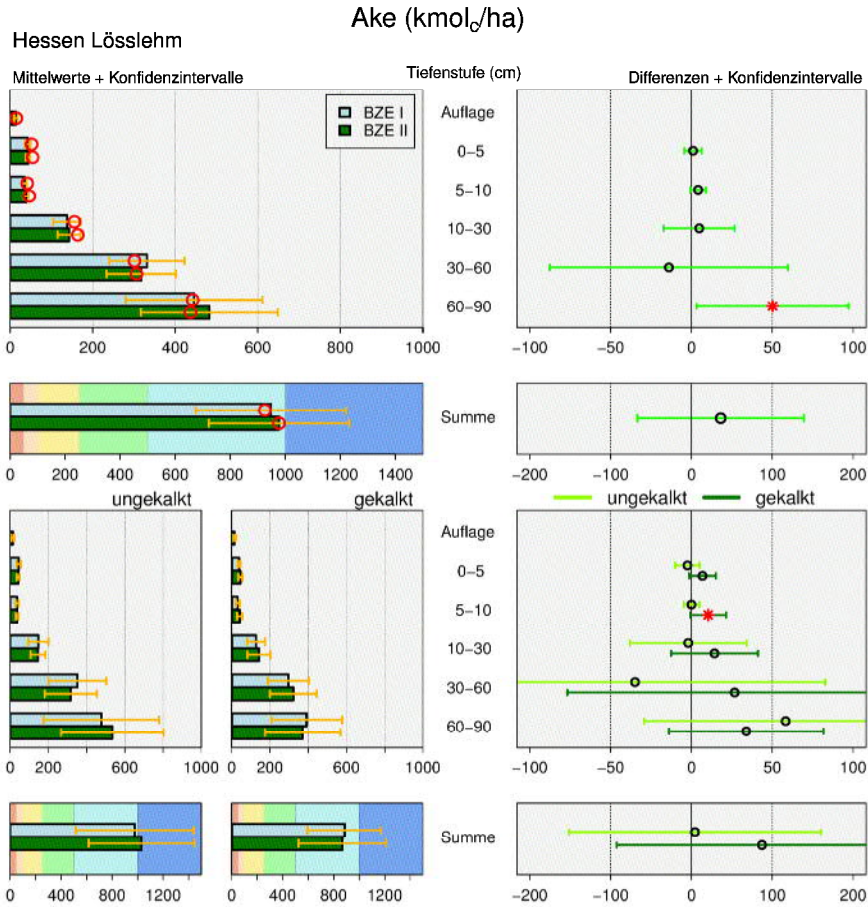


Abbildung 42: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Lösslehm ($n = 20$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.1.1.3 Basalt/Diabas

Mit Werten um 1.300 kmol_c/ha Austauschkapazität bis 90 cm Bodentiefe zählen die BZE-Punkte der Substratgruppe Basalt/Diabas zu den Standorten mit den höchsten Austauschkapazitäten in Hessen (s. Abb. 43). Sie werden in der Forstlichen Standortaufnahme mit hoch bewertet. Die Austauschkapazität ist über alle Tiefenstufen hinweg vergleichsweise hoch. Dennoch gibt es auch für diese Standorte weite Spannen. Sie reichen bis 90 cm Bodentiefe von 180 kmol_c/ha bis zu 3.680 kmol_c/ha. Signifikante Veränderungen konnten weder in einzelnen Tiefenstufen noch für die Gesamtprofile festgestellt werden (Teilgrafik b und d). Diese Standorte wurden aufgrund der hohen Vorräte und Pufferkapazität gegenüber Säureeinträgen von der Waldkalkung ausgeschlossen.

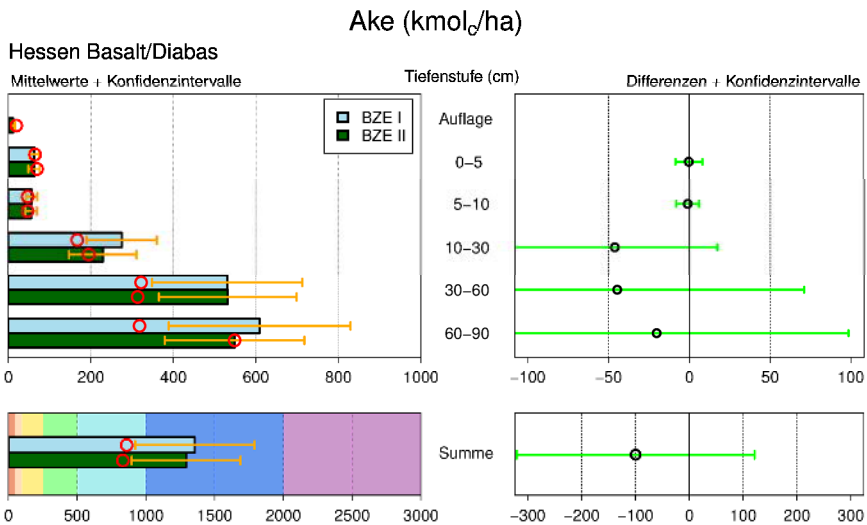


Abbildung 43: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Basalt/Diabas (n = 20) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.1.1.4 Tonschiefer

Die Austauschkapazität der Standorte des Tonschiefers liegt im Mittel der BZE I in Hessen bei 410 kmol_c/ha, bei der BZE II bei rund 580 kmol_c/ha (s. Abb. 44, Teilgrafik c). Dennoch gibt es auf Profilebene nur eine geringe, nicht signifikante Zunahme von 8 kmol_c/ha. Dies liegt darin begründet, dass ein Tonschiefer-Standort (bei Presberg) mit extrem hoher Austauschkapazität von über 4.000 kmol_c/ha im Rahmen der BZE II bis 90 cm, bei der BZE I jedoch nur bis 30 cm beprobt wurde. Dieses Beispiel unterstreicht die Notwendigkeit, bei zeitlichen Veränderungen zwischen der BZE I und BZE II dieselben Tiefenbereiche zu vergleichen. Diese

Fließerde bei Presberg ist neben dem prägenden Tonschiefer auch durch Lösslehm und Basalt beeinflusst, welches die hohe Austauschkapazität erklärt. Im Allgemeinen liegt der Tonschiefer eher im mittleren Bewertungsbereich der Austauschkapazität, dies wird durch den Median bei 310 kmol_c/ha (344 kmol_c/ha) bei der BZE II (BZE I) für die Tonschiefer-Standorte in Hessen belegt. Der Standort mit der geringsten Austauschkapazität aller drei Länder überhaupt ist ein Tonschiefer mit 57 kmol_c/ha bei Bischoffen, der aufgrund seines hohen Steingehaltes nur bis 10 cm zu beproben war.

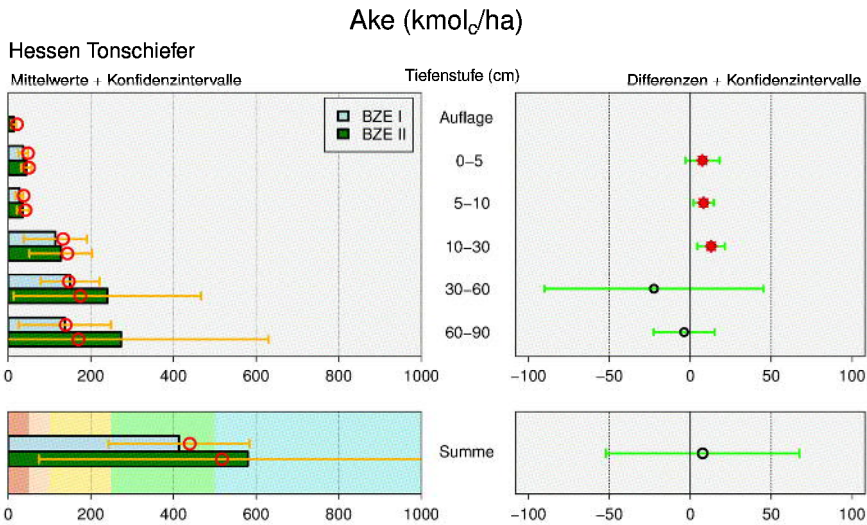


Abbildung 44: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Tonschiefer ($n = 16$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

Mit Ausnahme von zwei Standorten sind alle BZE-Punkte der Substratgruppe Tonschiefer gekalkt worden. Da das Kollektiv ungekalkt aufgrund des geringen Stichprobenumfangs damit für die Auswertung entfällt, sind die Standorte nur insgesamt dargestellt. Für die Tiefenstufen 0-5, 5-10 und 10-30 cm zeigen sich signifikante Zunahmen von summiert rund 30 kmol_c/ha , welches als Kalkungseinfluss gedeutet werden kann. Die Unterschiede unterhalb von 30 cm Bodentiefe sind nicht mehr signifikant.

6.5.1.1.5 Sande

Die geringsten Austauschkapazitäten der BZE II in Hessen mit rund 220 kmol_c/ha im Mittel weisen die unverlehmten Sande der Rhein-Main-Ebene auf. Die Austauschkapazitäten liegen zwischen 160 und 350 kmol_c/ha und sind im Mittel noch geringer als bei der Grauwacke. Damit liegen die unverlehmten Sande hinsichtlich der Austauschkapazität im gering-mittleren Bewertungsbereich (s. Abb. 45, Teilgrafik c). Wie bei den Standorten der Grauwacke liegt die höchste Austauschkapazität in den oberen 30 cm mit insgesamt 110 kmol_c/ha , in 30-60 cm fällt die Austauschkapazität auf rund 60 kmol_c/ha und von 60-90 cm auf 50 kmol_c/ha ab (s. Abb. 45, Teilgrafik a). Signifikante Veränderungen der Austauschkapazität wurden weder auf der Tiefenstufenebene noch auf Ebene des Gesamtprofils festgestellt (s. Abb. 45, Teilgrafik b und d). Die Sande wurden in Hessen nicht gekalkt.

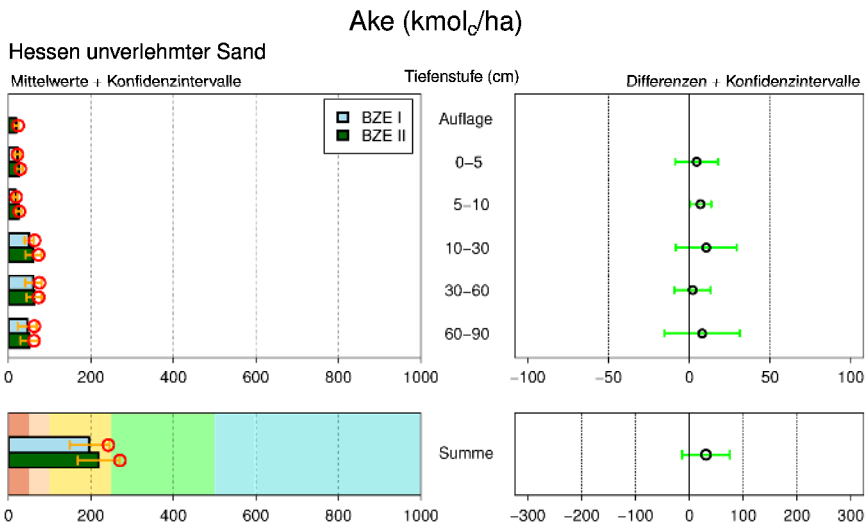


Abbildung 45: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe unverlehmter Sand ($n = 8$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

Die schwach verlehnten Sande in Hessen liegen mit ihrer Austauschkapazität von rund 400 kmol_c/ha im Mittel bis 90 cm Bodentiefe fast doppelt so hoch wie die unverlehmten Sande. Die Austauschkapazität hat zwischen beiden BZE-Aufnahmen mit 120 kmol_c/ha zwar deutlich zugenommen, diese Zunahme ist jedoch weder auf Profilebene noch in den einzelnen Tiefenstufen signifikant (s. Abb. 46).

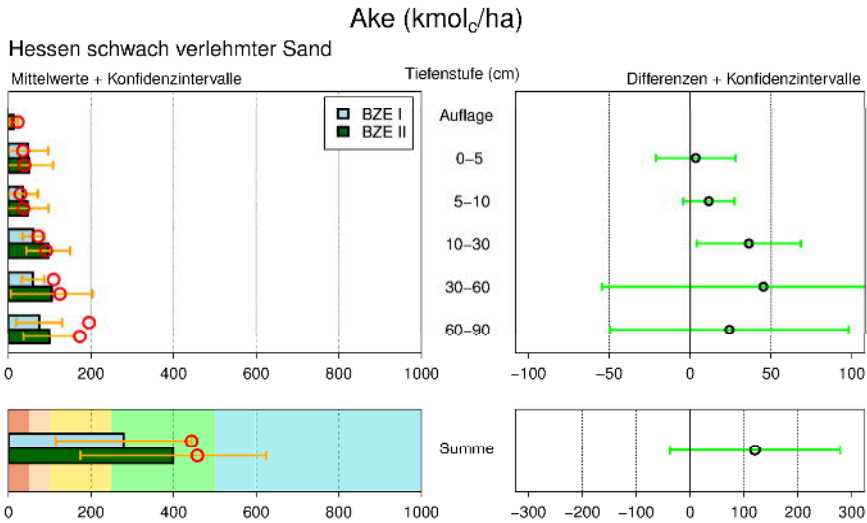


Abbildung 46: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe schwachverlehmtter Sand ($n = 5$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

In die Substratgruppe verlehmtter Sand fällt in Hessen nur ein BZE-Punkt, er liegt mit 300 kmol_c/ha im mittleren Bewertungsbereich.

6.5.1.1.6 Grauwacke

Die Austauschkapazitäten der durch Grauwacke geprägten BZE-Punkte liegen im mittleren Bewertungsbereich (rund 300 kmol_c/ha; BZE II). Die bis 90 cm Bodentiefe aufsummierten Austauschkapazitäten liegen zwischen 160 und 440 kmol_c/ha, die Spannweite ist vergleichsweise eng. Mit rund 160 kmol_c/ha sind in den oberen 30 cm des Mineralbodens die relativ höchsten Austauschkapazitäten vorzufinden, mit zunehmender Bodentiefe sinkt die Austauschkapazität mit 120 kmol_c/ha in der Tiefenstufe 30-60 cm und auf 90 kmol_c/ha in der Tiefe 60-90 cm. Hier zeigen sich die Lössbeeinflussung im oberen Profilbereich und der zunehmende Einfluss des basenarmen Gesteins mit zunehmender Bodentiefe (s. Abb. 47).

Signifikante Änderungen der Austauschkapazität zeigen sich bis in 30 cm Bodentiefe mit einer aufsummierten Zunahme von etwa 30 kmol_c/ha. Für die Profile insgesamt ließ sich der Einfluss der Kalkung nicht signifikant belegen. Mehr als die Hälfte der Grauwacke-Standorte sind gekalkt.

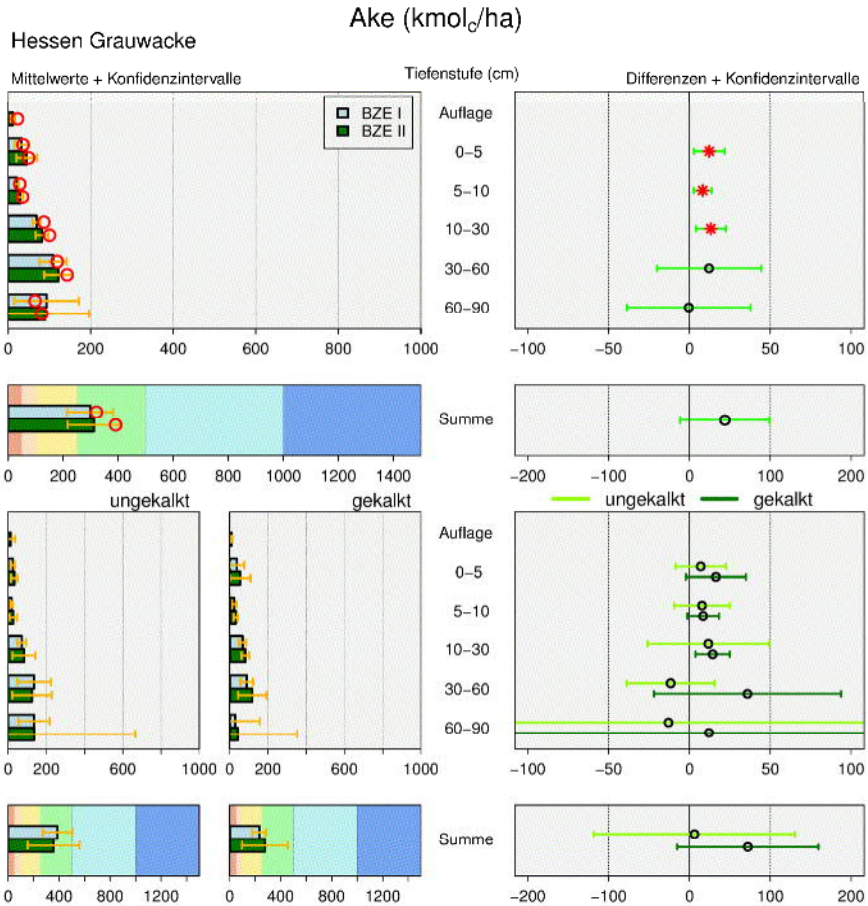


Abbildung 47: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Grauwacke (n = 7) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.1.1.7 Ton(stein)

In der Substratgruppe Ton(stein) treten erwartungsgemäß die höchsten Austauschkapazitäten innerhalb des BZE-Kollektives auf. Bei Homberg liegt der BZE-Punkt mit der höchsten Austauschkapazität im Kollektiv der drei Bundesländer mit 5.250 kmol_c/ha. Im Mittel liegen die Austauschkapazitäten in der Substratgruppe Ton(stein) in Hessen bei rund 1.900 kmol_c/ha und damit im hohen Bewertungsbereich (s. Abb. 48).

Vier von den sieben Ton(stein)-BZE-Punkten sind gekalkt worden, es ergaben sich jedoch keine nachweisbaren Veränderungen der Austauschkapazität.

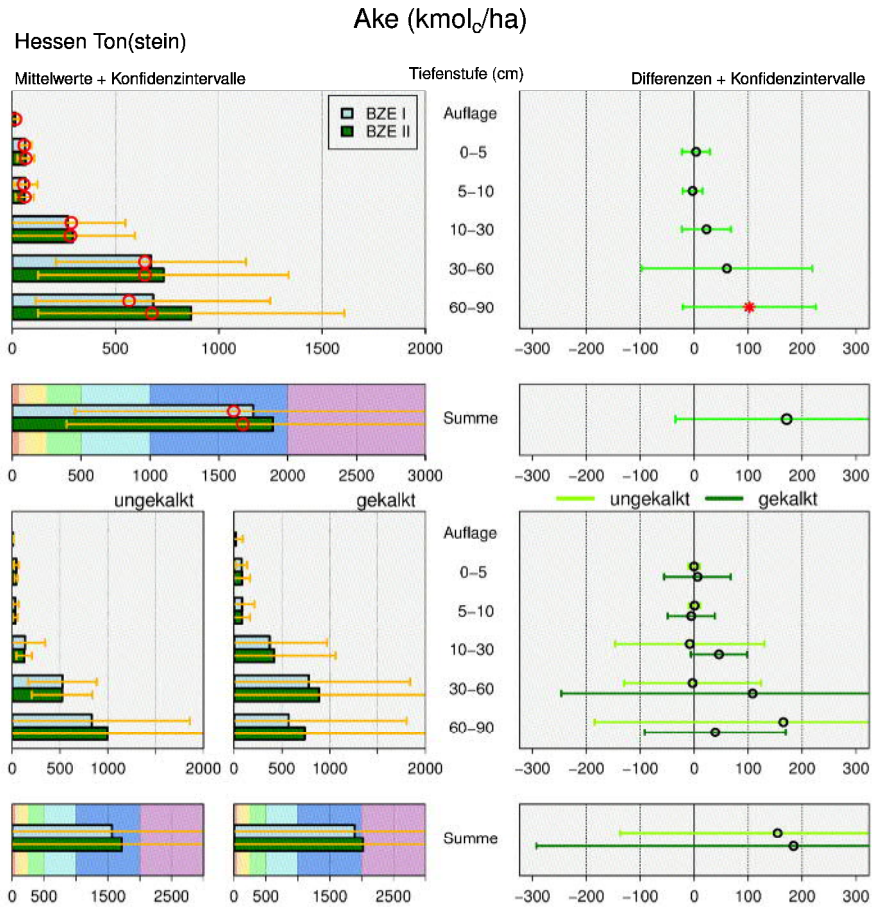


Abbildung 48: Austauschkapazität (Ake) [kmol_e/ha] der Substratgruppe Ton(stein) (n = 7) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.1.1.8 Kalk

Hinsichtlich der Austauschkapazität bis in 90 cm Bodentiefe liegen die Kalk-Standorte in Hessen mit durchschnittlich 930 kmol_c/ha im mittel-hohen Bewertungsbereich. Besonders auffällig ist für diese Standorte, dass mit Abstand die höchste Austauschkapazität in den oberen 30 cm des Mineralbodens mit rund 800 kmol_c/ha erreicht wird. In 30-60 cm Bodentiefe sind 350 kmol_c/ha , in 60-90 cm dann nur noch rund 60 kmol_c/ha im Mittel bestimmt worden. Hier kommt besonders der mit der Tiefe zunehmende Steinanteil zum Tragen, der bei Kalk-Standorten die Feinbodenanteile und damit die verfügbaren Bodenvorräte am Austauscher verringert. Signifikante Veränderungen der Austauschkapazität traten zwischen den beiden BZE-Erhebungen nicht auf (s. Abb. 49).

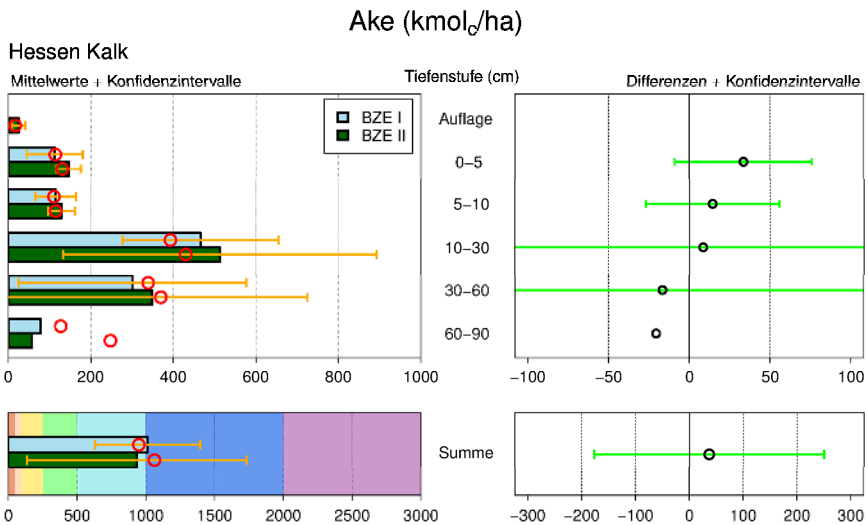


Abbildung 49: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Kalk ($n = 4$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.1.1.9 Lehm

In dieser Substratgruppe sind alle vorwiegend lehmigen Mischsubstrate wie Hochflut- oder auch Auenlehme zusammengefasst, entsprechend heterogen sind die Böden in dieser Gruppe. Mit 950 kmol_c/ha liegen die Lehme im mittel-hohen Bewertungsbereich und sind mit den Kalken, Lösslehmen sowie Zechstein vergleichbar. Im Unterschied zu den Kalken ist die Austauschkapazität relativ gleichmäßig über das Profil verteilt. Signifikante Veränderungen wurden weder auf Tiefenstufenebene noch auf Profilebene festgestellt (s. Abb. 50).

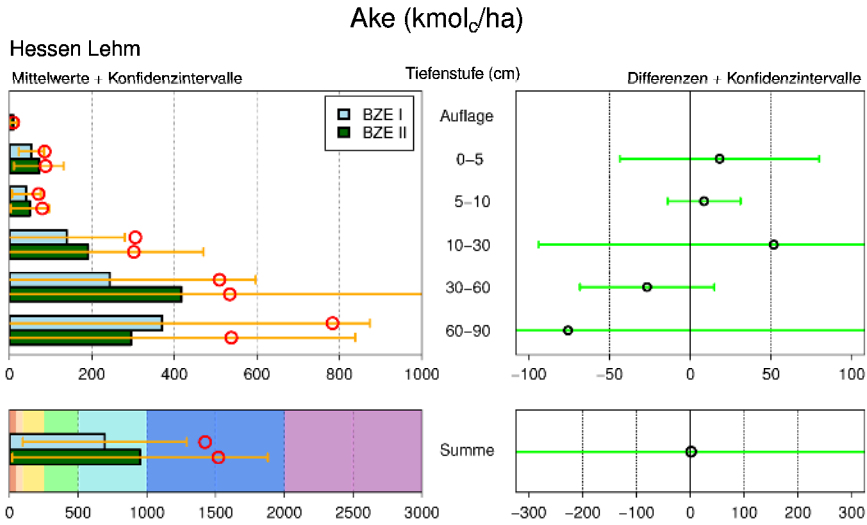


Abbildung 50: Austauschkapazität (Ake) [kmol_e/ha] der Substratgruppe Lehm (n = 4) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.1.1.10 Quarzit

Mit 420 kmol_c/ha im Mittel der BZE II liegen die Quarzit-geprägten BZE-Punkte hinsichtlich der Austauschkapazität bis 90 cm Bodentiefe im mittleren Bewertungsbereich. Die Spanne reicht bei der BZE II von rund 300 kmol_c/ha im Minimum bis hin zu knapp 600 kmol_c/ha Austauschkapazität. Mit 560 kmol_c/ha lagen diese BZE-Punkte bei der BZE I im Mittel deutlich höher. Dies liegt vor allem an Unterschieden in tieferen Bodenschichten ab 30 cm Bodentiefe und der geringen Stichprobenzahl. Diese Standorte sind für eine Kalkung vorgesehen und auch überwiegend gekalkt (3 von 4), für einen Vergleich gekalkt-ungekalkt ist der Stichprobenumfang jedoch nicht ausreichend (s. Abb. 51).

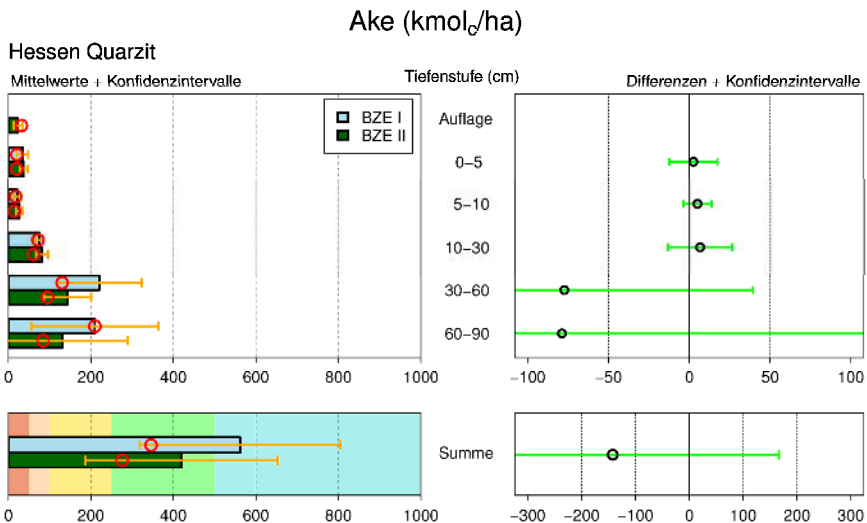


Abbildung 51: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Quarzit ($n = 4$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.1.1.11 Zechstein/Rotliegendes

Die Standorte des Zechsteins/Rotliegendes sind hinsichtlich ihrer Austauschkapazität mit den Kalken und Lehmen vergleichbar. Mit 400, 760 und 1.740 kmol_c/ha aufsummiert bis 90 cm Bodentiefe liegen die Austauschkapazitäten der 3 Profile im mittleren bis hohen Bewertungsbereich. Signifikante Veränderungen gab es zwischen der BZE I und II nicht, weder für einzelne Tiefenstufen noch auf Ebene der Profile (s. Abb. 52).

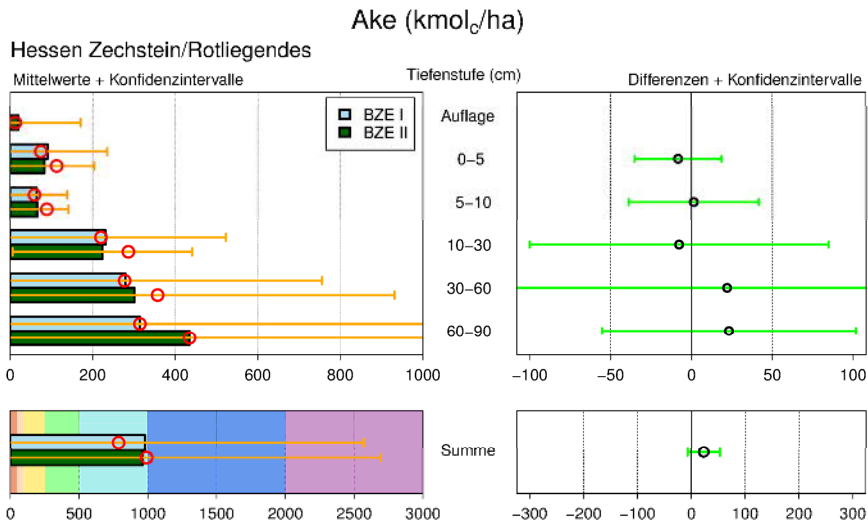


Abbildung 52: Austauschkapazität (Ake) [kmol_c/ha] der Substratgruppe Zechstein/Rotliegendes ($n = 3$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.1.1.12 Granit

Die Substratgruppe Granit kommt in Hessen nur mit einem Profil vor, mit $560 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ liegt hier die Austauschkapazität bis 90 cm im mittel-hohen Bereich.

6.5.1.2 Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität

An der mittleren prozentualen Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität in Abbildung 53 ist erkennbar, dass Aluminium in jeder Bodentiefe das bestimmende Kation mit Anteilen zwischen 43 und 69 % ist (gelbe Farbe). Die Protonen belegen Anteile von 2-11 %, es folgen als weitere Kationensäuren Eisen und Mangan mit Anteilen von jeweils unter 5 %. Das häufigste basisch wirkende Kation ist Calcium mit Anteilen an der Austauschkapazität zwischen 12 und 26 %. Deutlich geringere Anteile haben Magnesium mit Anteilen von 7-15 % 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 Kalkungsmaßnahmen, mit dem Vorkommen an organischer Substanz und einer damit verbundenen „Maskierung“ von Al-Kationen sowie mit der Aufnahme basisch wirkender Kationen aus tieferen Bodenschichten und Abgabe über den Streufall erklärt werden, der sogenannten „Basenpumpe“. Die Anteile basischer Kationen fallen in 5-10 cm Bodentiefe deutlich ab, nehmen darunter mit zunehmender Bodentiefe zu und erreichen maximale Werte in der

Tiefenstufe 60-90 cm. Im Unterboden bestimmen höhere Anteile von noch relativ wenig verwittertem Material mit hoher Basensättigung, hoher Pufferkapazität und geringer Versauerung die chemischen Bodeneigenschaften.

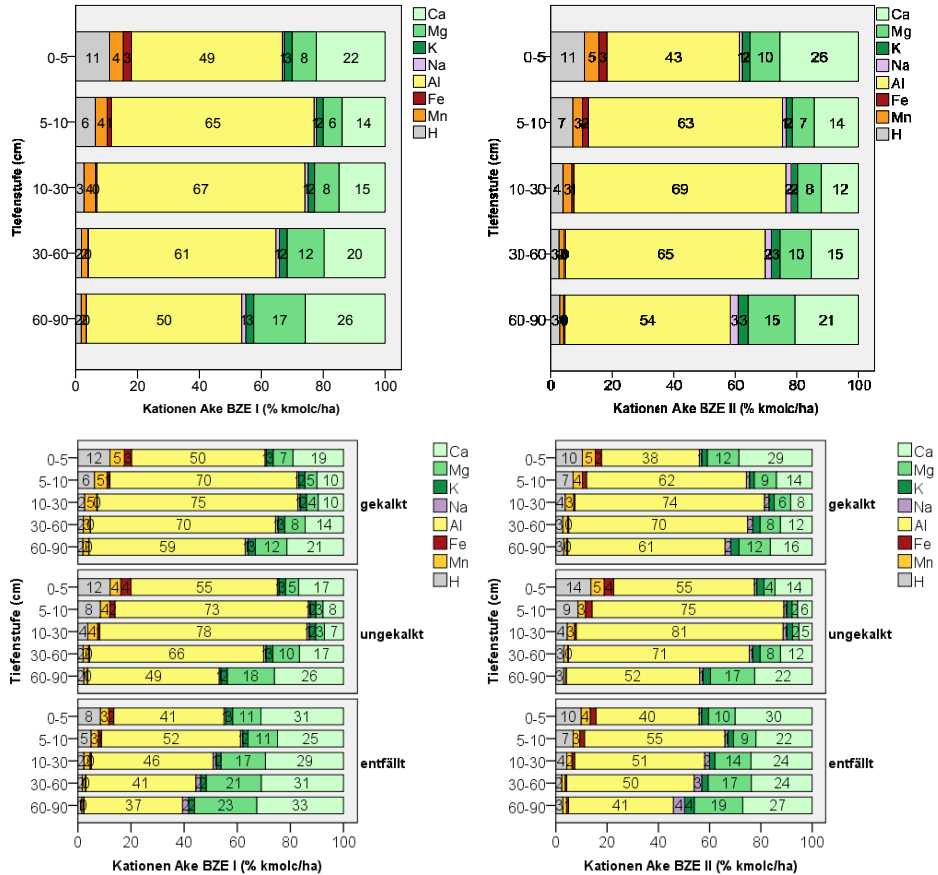


Abbildung 53: Mittlere prozentuale Verteilung der Kationen an der Austauschkapazität (Ake) der BZE I- (linke Spalte) und BZE II-Punkte (rechte Spalte) in Hessen für das Gesamtkollektiv (obere Zeile) sowie nach gekalkt, ungekalkt und entfällt (untere Zeile) (nicht in der Waldkalkungskulisse enthalten: Basalt, Diabas, Zechstein, Sand, Kalk)

Wird im Zeitvergleich (BZE I zu BZE II) das ganze Kollektiv unabhängig von der Waldkalkung betrachtet, so zeigt sich in den oberen Tiefenstufen eine leichte Zunahme der Anteile basischer Kationen und eine leichte Abnahme der Aluminium-Anteile. Ab 30 cm Bodentiefe nehmen die Kationensäuren am Austauscher prozentual zu. Calcium und Magnesium nehmen prozentual ab, Kalium und Natrium bleiben mit ihren geringen Anteilen relativ konstant. Dies gilt sowohl für die Anteile der Kationensäuren Eisen und Mangan als auch für die prozentualen Anteile der Protonen.

Wird das Gesamtkollektiv auf die Straten gekalkt, ungekalkt und entfällt (außerhalb der Kalkungskulisse) aufgeteilt, zeigt sich im gekalkten Kollektiv eine Erhöhung der Anteile an basischen Kationen bis in 10 cm Bodentiefe zwischen BZE I und II. Ab 10 cm Mineralbodentiefe verändern sich die Basengehalte nur unwesentlich.

Im ungekalkten Kollektiv nehmen die Anteile der sauren Kationen (Ma-Kationen: Aluminium, Eisen, Mangan sowie Protonen) in jeder Bodentiefe zwischen BZE I und II leicht zu, welches eine fortschreitende Versauerung zwischen der BZE I und BZE II anzeigt.

6.5.2 Basensättigung

Die Basensättigung ist ein zentraler Indikator für die Güte des chemischen Bodenzustandes. Sie kennzeichnet zusammenfassend die relative 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 Calcium, Magnesium und Kalium vom Austauscher durch die sauren Kationen Aluminium, Eisen, Mangan und Wasserstoff-Ionen verdrängt. Ein starkes Absinken der Basensättigung im Mineralboden ist eine Folge luftbürtiger versauernd wirkender Stoffeinträge.

Eine Basensättigung unterhalb von 20 % wird als gering, unter 7 % als sehr gering eingestuft. Diese Werte werden in den am stärksten versauerten Waldböden erreicht. Für Böden mittlerer Nährstoffgüte ist eine Basensättigung von 30 bis 50 % definiert und bei gut nährstoffversorgten Standorten erreicht die Basensättigung Werte von über 50 %.

Basensättigungen von unter 20 % zeigen an, dass diese Standorte nicht mehr über das Potential 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 wirkt in der Bodenlösung in höheren Konzentrationen zudem toxisch gegenüber Pflanzenwurzeln. 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 Säureeinträge 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 Hessen insgesamt und für die Substratgruppen aufgeführt. Für den Auflagehumus wird die Basensättigung nicht angegeben, da im Unterschied zum Mineralboden im Auflagehumus aus methodischen Gründen keine Protonenberechnung erfolgt.

Mit 41 % durchschnittlicher Basensättigung bis 90 cm Bodentiefe liegen die Waldböden in Hessen sowohl bei der BZE II als auch bei der BZE I im mittleren Bewertungsbereich für die Basensättigung im Hauptwurzelraum (s. Abb. 54, Teilgrafik c). Summiert über diese Bodentiefe und im Mittel für Hessen hat sich die Basensättigung demnach nicht verändert. Auch im Mittel über die Länder Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt hat sich die Basensättigung auf Profilebene nicht verändert. Das Mittel liegt mit 36 % etwas geringer, ist aber auch noch im mittleren Bewertungsbereich. Die höchsten Werte der Basensättigung mit Werten um 50 % finden sich in der Tiefenstufe 60-90 cm, gefolgt von der Tiefenstufe 0-5 cm mit Werten von 35 % bei der BZE I und 42 % bei der BZE II. Dieser Unterschied von 7 %-Punkten ist als einziger auf der Landesebene Hessen signifikant (s. Abb. 54, Teilgrafik a und b). Die durchschnittliche Basensättigung fällt dann in den Tiefenstufen 5-10 und 10-30 cm auf rund 27 % und steigt in der Tiefenstufe 30-60 cm auf knapp 40 % an (s. Abb. 54, Teilgrafik a). Diese Durchschnittswerte bieten eher eine allgemeine Orientierung, denn sie sind stark von den jeweiligen Substraten und ihren Anteilen abhängig. So liegen die Kalk-Standorte annähernd bei 100 % Basensättigung und die Quarzite, Granite und unverlehnten Sande bei unter 20 % durchschnittlicher Basensättigung. Die über das ganze Profil geringste Basensättigung hat in Hessen eine mäßig podsolierte Braunerde im Buntsandstein bei Raupach am Fichtelberg im Süden Hessens mit durchschnittlich 5 % Basensättigung. Noch niedrigere Werte für die Basensättigung finden sich nur bei den unverlehnten Sanden im niedersächsischen Tiefland.

Hinsichtlich der Waldkalkung ergibt sich bei den Durchschnittswerten der Basensättigung ein differenzierteres Bild (s. Abb. 54, Teilgrafiken e-j). In dieser Auswertung sind nur diejenigen Standorte enthalten, die in die Waldkalkungsplanung in Hessen einbezogen wurden. Da hierbei vor allem die Standorte mit hoher Basensättigung ausgenommen sind, liegt die durchschnittliche Basensättigung mit Werten um 30 % mit 10 %-Punkten unter dem Gesamtmittel, aber noch im mittleren Bereich (s. Abb. 54, Teilgrafiken h und i). Im ungekalkten Kollektiv ist die Basensättigung leicht gesunken, im gekalkten Kollektiv leicht angestiegen. Beide Differenzen sind signifikant (Teilgrafik j). Auf Ebene der Tiefenstufen (Teilgrafiken e-g) zeigt sich, dass die Basensättigung im gekalkten Kollektiv bis 10 cm Bodentiefe signifikant und deutlich zunimmt (+17 %-Punkte in 0-5 und +8 %-Punkte in 5-10 cm). Auch in Rheinland-Pfalz zeigt sich dieser signifikante Anstieg der Basensättigung infolge der Kalkung in den obersten Tiefenstufen (BLOCK u. GAUER 2012).

Im ungekalkten Kollektiv dagegen nimmt die Basensättigung tendenziell ab, signifikant ist dies nur in der Tiefenstufe 10-30 cm. Bereits zum Zeitpunkt der BZE I lag die Basensättigung bis 30 cm Bodentiefe im gekalkten Kollektiv höher als im ungekalkten. Im ungekalkten Kollektiv verschlechtert sich die Basensättigung zwischen den beiden BZE-Erhebungen weiter und erreicht für die Tiefenstufen 5-10 und 10-30 cm mit Werten unter 15 % relativ geringe Werte. Im gekalkten Kollektiv liegen die durchschnittlichen Werte der Basensättigung in der Regel bereits über 20 %.

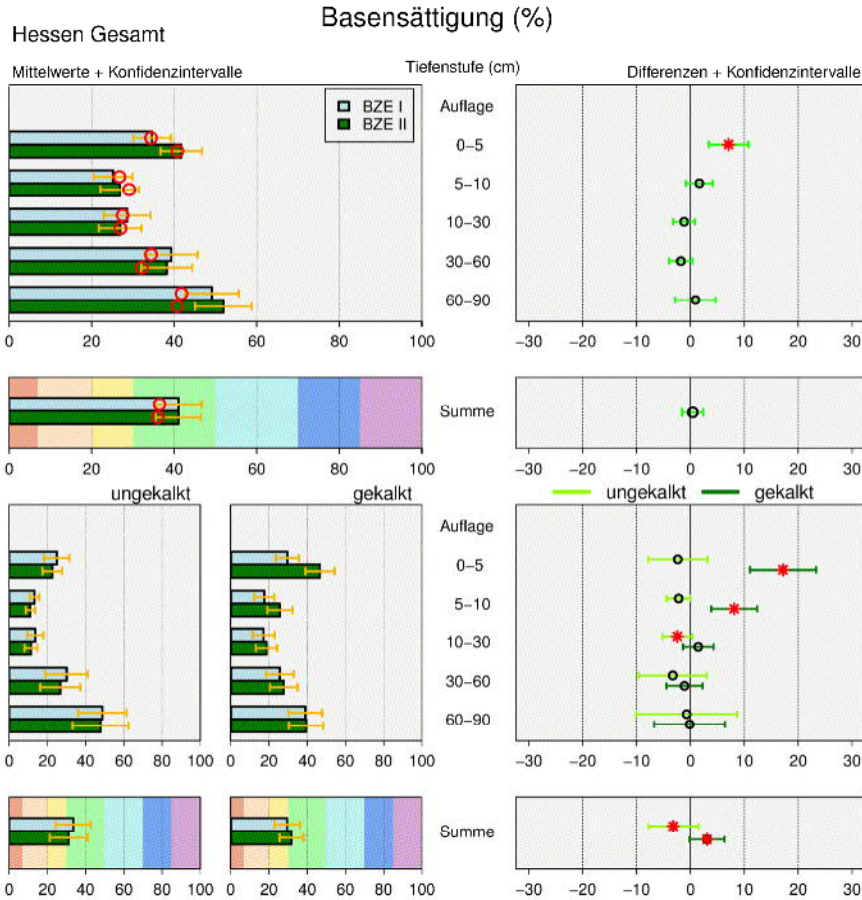


Abbildung 54: Basensättigung [%] in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

Über diese nach der Waldkalkung stratifizierte Auswertung lässt sich deutlich der Kalkungseinfluss mit erhöhten Werten der Basensättigung im gekalkten und geringeren im ungekalkten Kollektiv bereits auf Ebene des Landes Hessen nachweisen. Damit werden für Hessen die Ergebnisse aus Kalkungsversuchen auf Landesebene bestätigt (GUCKLAND et al. 2011).

6.5.2.1 *Basensättigung nach Substratgruppen*

Die Basensättigung in den Mineralböden der wichtigsten Substratgruppen in Hessens Waldböden zeigt bei hohen Streuungen in den einzelnen Substratgruppen typische Muster (s. Abb. 55, s. a. EVERS u. PAAR 2012): Sie reicht von rund 8 % im Median in der Substratgruppe Quarzit bis hin zu 100 % im Kalk. Relativ geringe Werte mit unter 20 % im Median berechnet bis 90 cm Bodentiefe finden sich in den Sanden und Buntsandsteinen. Der Buntsandstein in der tonigen Ausprägung liegt mit seinem Median zwar unter 20 %, viele BZE-Punkte dieser Substratgruppe reichen jedoch im Gegensatz zur sandigen Ausprägung des Buntsandsteins auch weit in den mittleren Bereich der Basensättigung mit Werten deutlich über 30 % hinein. Noch etwas höher liegen die Werte im Tonschiefer, der in seiner Verteilung dem tonigen Buntsandstein in etwa entspricht, aber im Median mit 25 % Basensättigung deutlich besser versorgt ist. Im Bereich der mittleren Versorgung hinsichtlich der Basensättigung (30-50 %) liegen die BZE-Punkte der Grauwacke und der Lehme, noch besser sind die BZE-Punkte der Substratgruppen Lösslehm und Ton(stein) ausgestattet. Im sehr hohen Bereich der Basensättigung liegen der Basalt/Diabas und der Kalk. Mit Ausnahme der Substratgruppen mit geringer durchschnittlicher Basensättigung (Quarz, Buntsandstein, Sande) und sehr hoher (Basalt/Diabas und Kalk) streuen die Wertebereiche der einzelnen BZE-Punkte innerhalb der jeweiligen Substratgruppen sehr stark.

Vereinzelt gibt es in einigen Substratgruppen Extreme. So findet sich im Buntsandstein der sandigen Ausprägung ein BZE-Punkt mit einer durchschnittlichen Basensättigung von über 70 %. Bei einem schwach verlehnten Sand mit Rheinweiß-Einlagerungen zeigt sich eine Basensättigung mit Werten nahe 100 % und bei einem Tonschiefer-Standort mit Basalt ähnlich hohe Werte. Ebenso gibt es untypisch geringe Werte der Basensättigung, so z. B. beim Basalt/Diabas mit Werten um 35 %, der Median liegt in dieser Substratgruppe bei über 90 %. Bei diesen BZE-Punkten sind relativ große Basaltsteine in flachgründigen Fließerden eingelagert. Die durch Lösslehm geprägten Fließerden sind schwächer mit Basen versorgt. Es zeigt sich an diesen Beispielen und den weiten vorkommenden Spannen der Basensättigung innerhalb der Substratgruppen, dass im Rahmen der BZE allgemeine Muster im Vordergrund stehen müssen. Daher kann die BZE eine fundierte Standortskartierung nur unterstützen, nicht jedoch ersetzen.

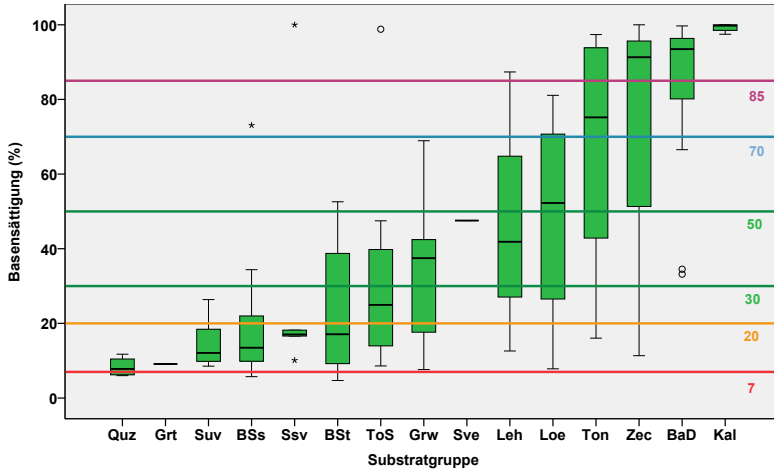


Abbildung 55: Durchschnittliche Basensättigung [%] im Mineralboden bei der BZE II nach Substratgruppen in hessischen Waldböden bis 90 cm Bodentiefe (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BSt: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzlit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer; Grenzwerte: s. Tab. 16, S. 123)

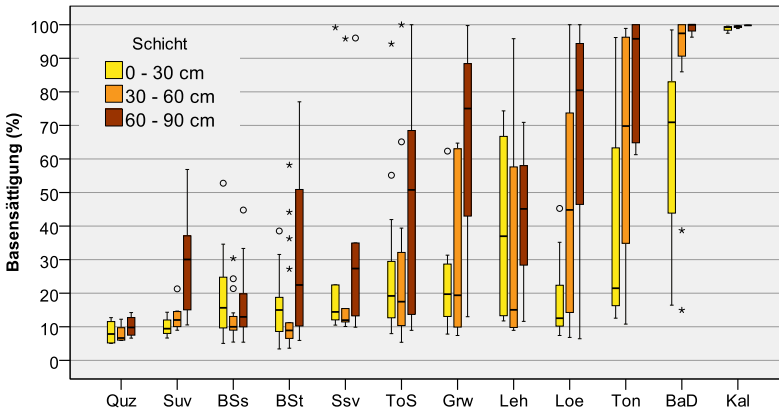


Abbildung 56: Basensättigung [%] BZE II (Hessen) in den Substratgruppen im Mineralboden nach Bodenschichten (0-30, 30-60, 60-90 cm), dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BSt: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzlit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

Die Verteilungen der Werte für die Basensättigung in den Bodenschichten 0-30, 30-60 und 60-90 cm (s. Abb. 56) geben noch detailliertere Informationen zu den Substratgruppen: geringe Werte kommen durchgängig bis 90 cm Bodentiefe nur innerhalb der Substratgruppen Quarz und Buntsandstein (sandige Ausprägung) vor. In allen anderen Substratgruppen liegen die Werte in der Bodenschicht 60-90 cm noch relativ hoch. Vom Quarzit, unverlehmten Sand, Buntsandstein (sandige und tonige Ausprägung), schwach verlehmtem Sand, Grauwacken bis zum Tonschiefer sind auch die Bodenschichten 30-60 cm relativ schlecht mit Basen versorgt, hier liegen die Mediane unter 20 % Basensättigung. Lehme, Lösslehm und Ton(stein)e sind auch im Oberboden besser versorgt, zeigen aber auch den deutlichen Anstieg der Basensättigung bis 90 cm. Nur die Basalt/Diabase und Kalke weisen konstant hohe Werte in allen Bodenschichten auf. Bei diesen wird der Einfluss höherer Steingehalte mit über die Mineralverwitterung nachgelieferten Basen in unteren Bodenschichten erkennbar, was die Basensättigung in allen Tiefenstufen relativ hoch hält. Dies ist vor allem bei reicheren Standorten der Fall, bei ärmeren Standorten fehlen diese Reserven.

Im Folgenden wird die Basensättigung für die Substratgruppen im Einzelnen beschrieben.

6.5.2.1.1 Buntsandstein

Mit auf Profilebene knapp 20 % liegen die Werte der durchschnittlichen Basensättigung in der Substratgruppe Buntsandstein bei der BZE II nur halb so hoch wie der Durchschnittswert aller BZE-Punkte in Hessen. Mit 16 % Basensättigung im Durchschnitt lagen die Werte der BZE I sogar noch geringer (s. Abb. 57, Teilgrafik c) und fallen in den geringen Bewertungsbereich. Die jeweils höchsten Werte bei der BZE I und II nach Tiefenstufen finden sich in 0-5 cm Bodentiefe, hier ist der Einfluss organischer Substanz und der Waldkalkung am höchsten (s. Abb. 57, Teilgrafik a). Mit der Bodentiefe sinken die Werte deutlich ab und liegen zwischen 10 und 17 %. In 60-90 cm Bodentiefe erreichen die durchschnittlichen Werte der Basensättigung mit 22 % den geringen-mittleren Bewertungsbereich. Dies steht im Zusammenhang mit günstigeren bodenchemischen Verhältnissen in dieser Tiefe, wie beispielsweise höherer Austauschkapazität und höheren pH-Werten.

Signifikante Veränderungen wurden in der Tiefe 0-5 cm Bodentiefe festgestellt, hier stieg die durchschnittliche Basensättigung um knapp 12 %-Punkte von der BZE I zur BZE II auf insgesamt 37 % an (s. Abb. 57, Teilgrafik b). Auf Profilebene änderte sich die durchschnittliche Basensättigung nicht signifikant, in der Tendenz wurden leicht höhere Werte festgestellt.

Im Hinblick auf den Faktor Waldkalkung zeigt sich bei den gekalkten Profilen auf Profilebene eine deutliche und signifikante Zunahme der durchschnittlichen Basensättigung um insgesamt knapp 9 %-Punkte auf 24 % und eine ebenso deutliche und signifikante Abnahme um 7 %-Punkte auf 10 % Basensättigung bei den

ungekalkten BZE-Punkten (s. Abb. 57, Teilgrafiken h-). In den einzelnen Tiefenstufen ist der Einfluss der Waldkalkung bis in 60 cm Bodentiefe mit signifikant höheren Werten der Basensättigung bei der BZE II im Vergleich zur BZE I feststellbar. In der Tiefenstufe 0-5 cm stieg die Basensättigung um 20 %-Punkte auf 44 % an und liegt damit im unkritischen mittleren Bewertungsbereich. Die Zunahmen werden mit zunehmender Bodentiefe geringer, sind aber bis 60 cm signifikant. In 60-90 cm sind die mittleren Zunahmen der Basensättigung nicht mehr signifikant (s. Abb. 57, Teilgrafik g). Im ungekalkten Kollektiv der BZE-Punkte in der Substratgruppe Buntsandstein dagegen nehmen die durchschnittlichen Werte der Basensättigung in den einzelnen Tiefenstufen weiter ab. In der Tiefenstufe 0-5 cm um 5 %-Punkte auf 20 % (nicht signifikant), in der Tiefenstufe 5-10 cm ebenfalls um 5 %-Punkte auf 8 % insgesamt und in 10-30 und 30-60 cm Bodentiefe jeweils um 3 %-Punkte auf 7 % Basensättigung (jeweils signifikant). Auch in 60-90 cm Bodentiefe sind deutlich geringere Werte im ungekalkten Kollektiv festzustellen, allerdings ist dieses Ergebnis wie im gekalkten Kollektiv nicht signifikant. Damit zeigt sich für die Substratgruppe Buntsandstein und den Parameter Basensättigung sehr deutlich, dass sich ohne eine Waldkalkung der schon kritische bodenchemische Zustand im Hauptwurzelraum bis 90 cm Bodentiefe weiter verschlechtert. Zum Zeitpunkt der BZE I lagen die Werte der durchschnittlichen Basensättigung nach Tiefenstufen im gekalkten und ungekalkten Kollektiv noch relativ eng beieinander. Bei der BZE II dagegen liegen die Werte im gekalkten Kollektiv deutlich höher und damit zumeist nicht mehr im besonders kritischen Bereich von unter 15 %. Im ungekalkten Kollektiv dagegen ging auch damals schon die Basensättigung bis 60 cm Bodentiefe weiter zurück.

In der sandigen Ausprägung des Buntsandsteins stiegen die Werte für die durchschnittliche Basensättigung in den Tiefenstufen 0-5 und 5-10 cm nur im gekalkten Kollektiv signifikant. Im ungekalkten Kollektiv nahm die Basensättigung leicht ab, dies war jedoch in keiner Tiefenstufe signifikant (s. Abb. 58). Auf Profilebene erhöhte sich die durchschnittliche Basensättigung nach Kalkung in der sandigen Fraktion um 7 %-Punkte und in der tonigen Fraktion um 10 %-Punkte, in beiden Fällen signifikant (s. Abb. 59). In den ungekalkten Kollektiven ergaben sich lediglich nicht signifikante Abnahmen. Im tonigen Buntsandstein erhöhten sich die durchschnittlichen Werte der Basensättigung im gekalkten Kollektiv, signifikant nur ab 30 cm Bodentiefe. Im ungekalkten Kollektiv dagegen verringerten sich die Werte in jeder Tiefenstufe, signifikant jedoch nur für 5-10 cm Bodentiefe. Damit zeigen sich für die sandige und tonige Fraktion des Buntsandsteins deutlich positive Effekte der Waldkalkung.

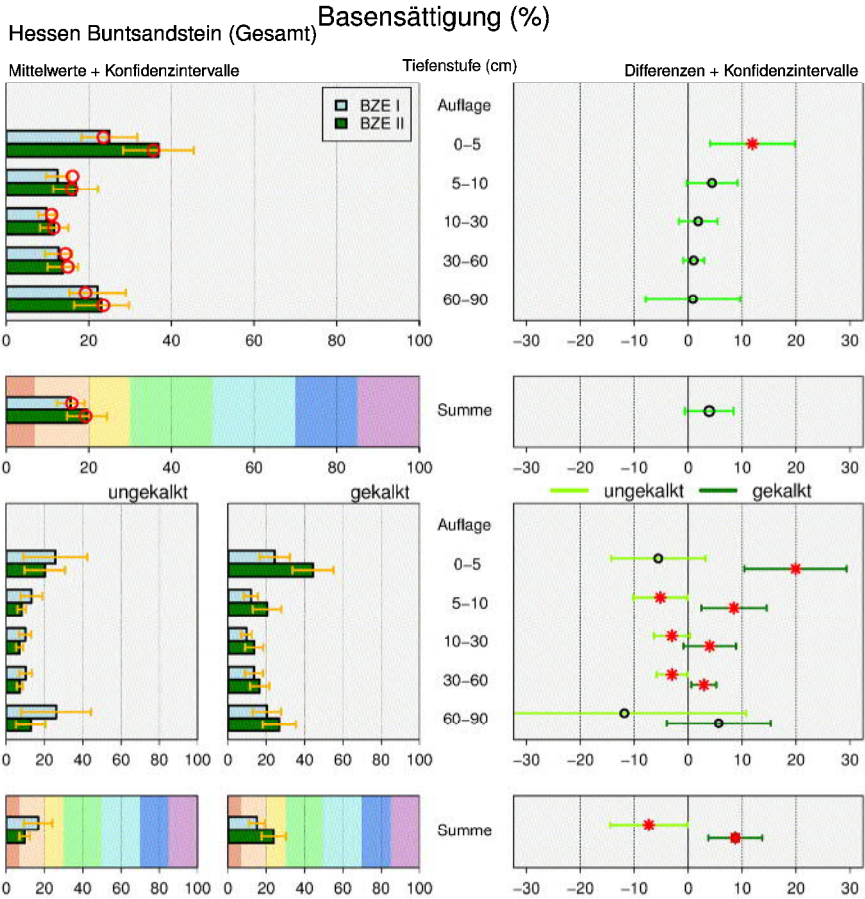


Abbildung 57: Basensättigung [%] der Substratgruppe Buntsandstein ($n = 39$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt ($n = 11$) / gekalkt ($n = 27$) (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

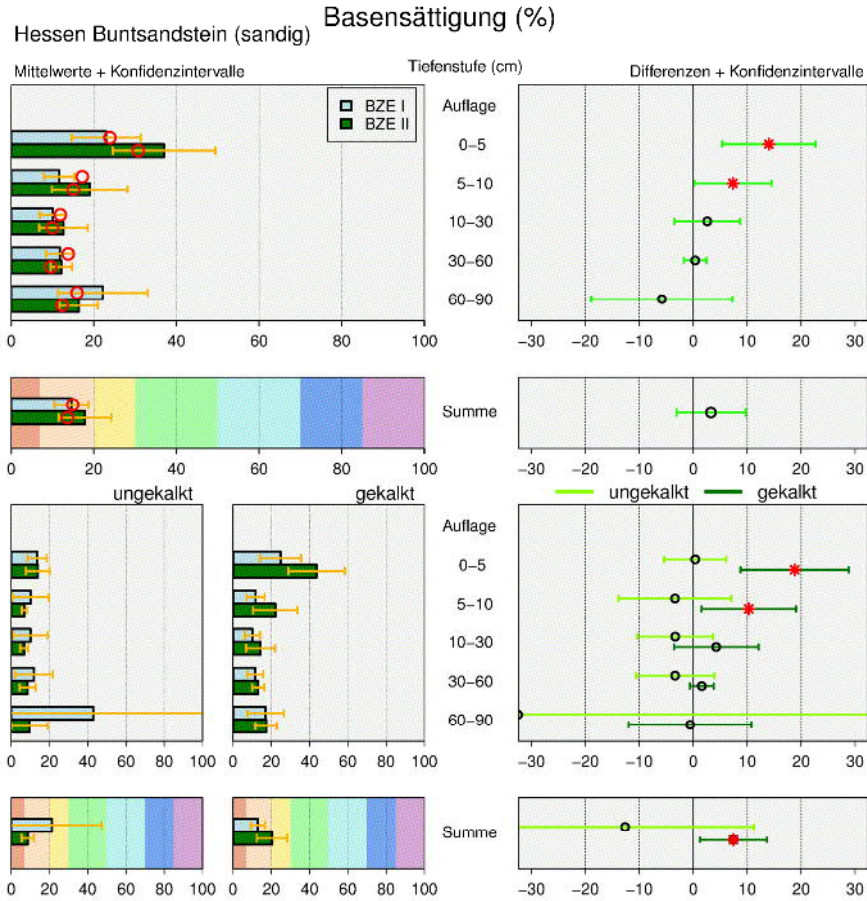


Abbildung 58: Basensättigung [%] der Substratgruppe Buntsandstein (sandig) ($n = 22$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt ($n = 4$) / gekalkt ($n = 17$) (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

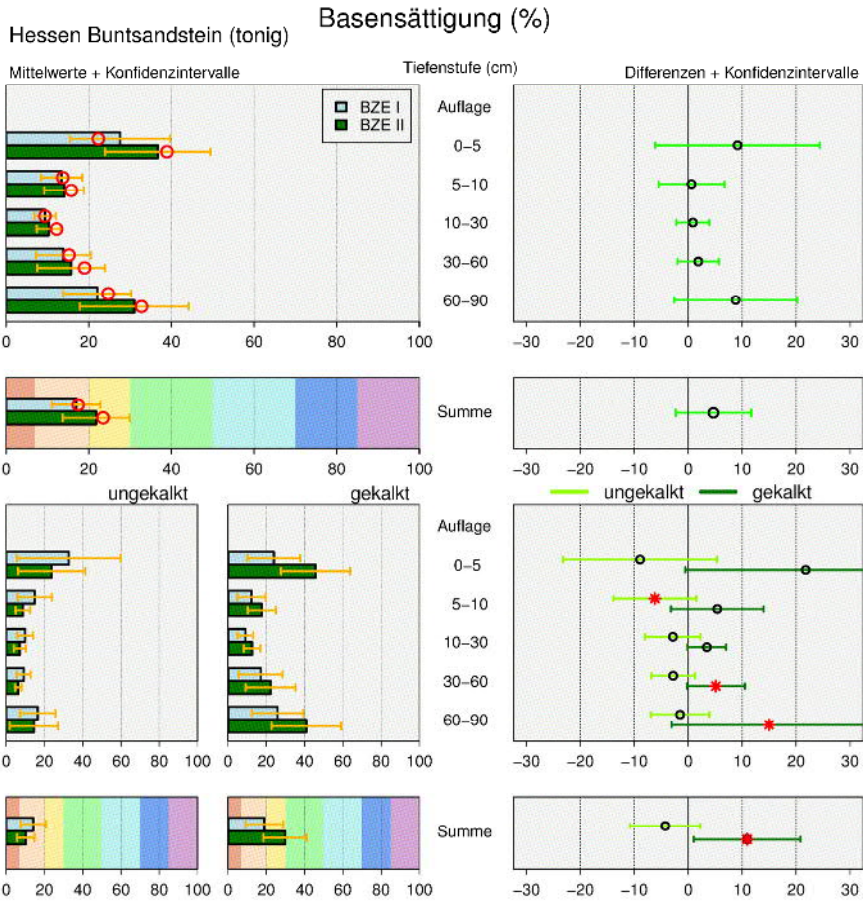


Abbildung 59: Basensättigung [%] der Substratgruppe Buntsandstein (tonig) (n = 17) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt (n = 7) / gekalkt (n = 10) (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.2.1.2 Lösslehm

Die durchschnittlichen Werte der Basensättigung für den Lösslehm sind in Abbildung 60 dargestellt. Im Mittel liegen die Lösslehme mit durchschnittlich 48 % Basensättigung an der Obergrenze des mittleren Bewertungsbereichs und damit über dem Mittel für Hessen. Die hohe durchschnittliche Basensättigung resultiert vor allem aus den hohen Werten in der Bodentiefe 30-60 und besonders 60-90 cm. In der letztgenannten Tiefe liegt bei der BZE II der Durchschnitt bei fast 70 %. Mit Werten um 15 % Basensättigung weisen die Tiefenstufen 5-10 und 10-30 cm trotz

relativ hoher Austauschkapazität auffallend geringe Werte für die Basensättigung auf. Es gibt in der Substratgruppe Lösslehm keine signifikanten Änderungen der durchschnittlichen Basensättigung zwischen der BZE I und BZE II.

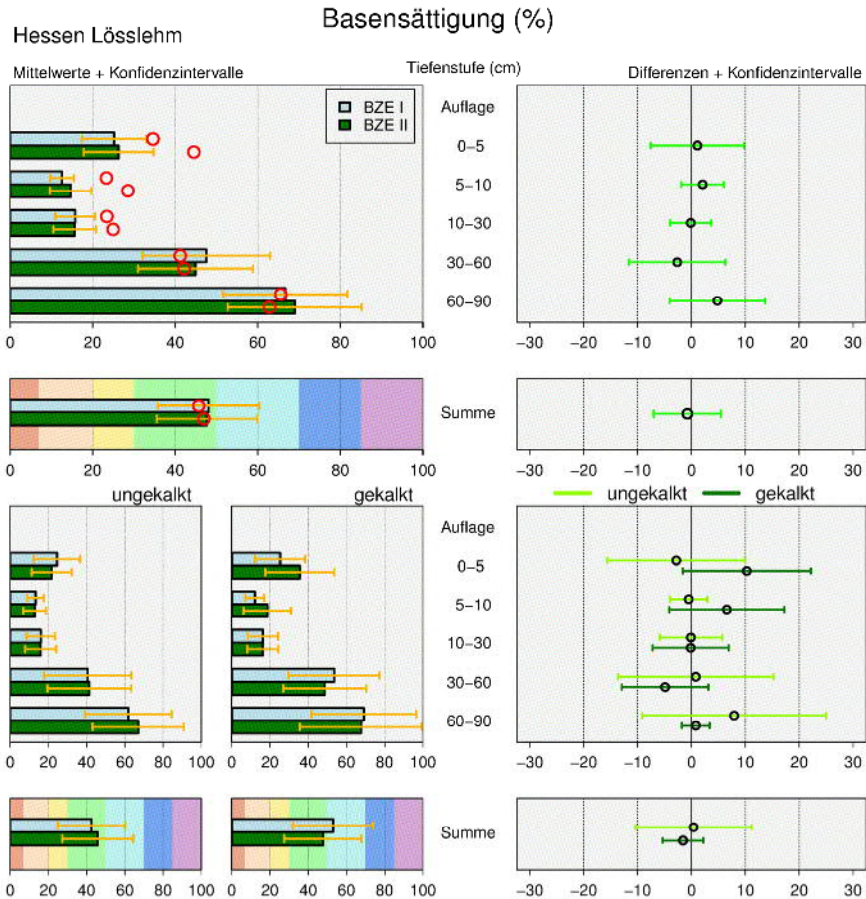


Abbildung 60: Basensättigung [%] der Substratgruppe Lösslehm ($n = 20$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt ($n = 12$) / gekalkt ($n = 7$) (untere 6 Grafiken). Für einen BZE-Punkt ließ sich der Kalkungsstatus nicht ermitteln; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

Im Hinblick auf die Waldkalkung zeigen sich beim Lösslehm ähnliche Muster wie im gekalkten Kollektiv des Buntsandsteins: Die Basensättigung nimmt in den oberen Tiefenstufen zwischen beiden Erhebungszeitpunkten in der Tendenz zu, diese Unterschiede sind jedoch beim Lösslehm im Vergleich zum Buntsandstein nicht

signifikant. Beim Vergleich aller Substratgruppen zählt der Lösslehm zu den Substraten mit den eher höheren Basensättigungen, allerdings auch zusammen mit den Ton(stein) zu den Substraten mit der weitesten Streuung bezogen auf das Profilmittel (vgl. Abb. 55). 50 % aller Werte liegen beim Lösslehm zwischen 28 und 70 % Basensättigung, in der Substratgruppe Buntsandstein (sandige Ausprägung) dagegen liegen 50 % der Werte nur zwischen 8 und 23 % Basensättigung.

6.5.2.1.3 Basalt/Diabas

Neben den reinen Kalk-Standorten zählen die BZE-Punkte mit Basalt oder Diabas als prägendem Ausgangssubstrat zu den Standorten mit den höchsten durchschnittlichen Werten der Basensättigung. Auf Profilebene liegt der Durchschnitt der BZE II bei 83 % und damit im hohen Bewertungsbereich. Auf Profilebene verringerten sich die Durchschnittswerte zwischen den BZE-Erhebungen leicht, doch ist dieser Unterschied nicht signifikant (s. Abb. 61, Teilgrafik c und d). Bis 10 cm Bodentiefe liegen die Durchschnittswerte der Basensättigung mit 47 bis 57 % im mittleren bis mittel-hohen Bewertungsbereich, in tieferen Bodenschichten dann mit Werten über 70 % Basensättigung im hohen bis sehr hohen Bewertungsbereich. Gegenüber der BZE I gab es negative Veränderungen in den Tiefenstufen 5-10 und 10-30 cm Bodentiefe, die für die erstgenannte signifikant waren. Dennoch bleiben diese Standorte in ihrer Bewertung im basenreichen und damit bodenchemisch im guten Versorgungsbereich.

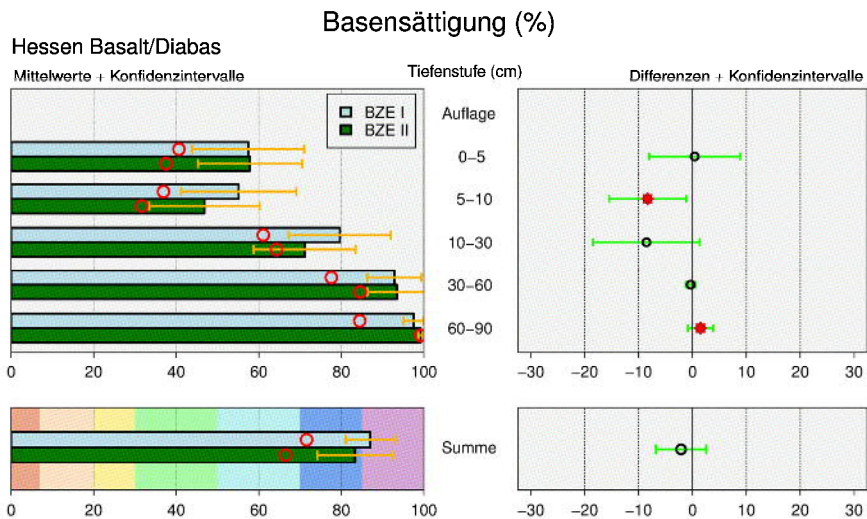


Abbildung 61: Basensättigung [%] der Substratgruppe Basalt/Diabas (n = 20) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.2.1.4 Tonschiefer

Auf Profilebene liegt die durchschnittliche Basensättigung bei den BZE-Punkten der Substratgruppe Tonschiefer bei der BZE II bei knapp 30 % und fällt damit in den gering-mittleren Bewertungsbereich. Im Mittel der BZE I lagen diese Standorte mit einer durchschnittlichen Basensättigung von 38 % im mittleren Bewertungsbereich, die Basensättigung hat sich somit durchschnittlich um 8 %-Punkte verschlechtert. Diese Abnahme lässt sich nicht signifikant absichern (s. Abb. 62, Teilgrafik c und d).

Die BZE-Punkte der Substratgruppe Tonschiefer sind mit Ausnahme von zwei Standorten gekalkt worden. Die Waldkalkung kann als plausible Erklärung für die signifikante Zunahme der Basensättigung um 17 %-Punkte in der Tiefenstufe 0-5 cm angesehen werden (s. Abb. 62, Teilgrafik b). Die deutliche Abnahme zwischen beiden BZE-Erhebungen in den Tiefenstufen 30-60 und 60-90 cm liegt an extremen Unterschieden von zwei Profilpunkten zwischen der BZE I und BZE II, ist daher zufällig und auf die hohe standörtliche Heterogenität dieser Substratgruppe zurückzuführen.

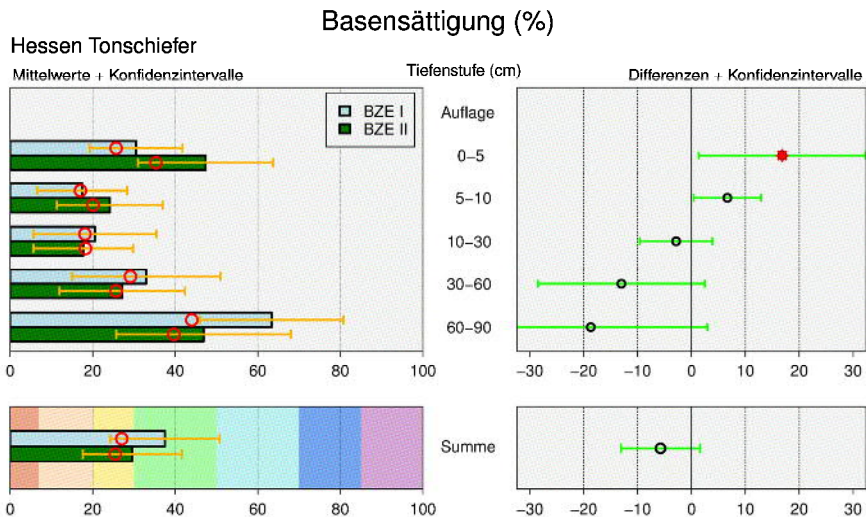


Abbildung 62: Basensättigung [%] der Substratgruppe Tonschiefer ($n = 16$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.2.1.5 Sande

Die durchschnittlichen Werte der Basensättigung bei den Sanden hängen stark vom Verlehmungsgrad und den Anteilen organischer Substanz ab. Die unverlehmten Sande zählen mit rund 15 % durchschnittlicher Basensättigung bis 90 cm Bodentiefe

zu den Standorten mit der geringsten Basenausstattung in Hessen. Diese Standorte fallen in den geringen Bewertungsbereich (s. Abb. 63, Teilgrafik c). Die durchschnittlichen Werte der Basensättigung haben sich tendenziell in den oberen 10 cm verschlechtert und in 60-90 cm hingegen verbessert. Signifikant waren diese Unterschiede in keinem Fall.

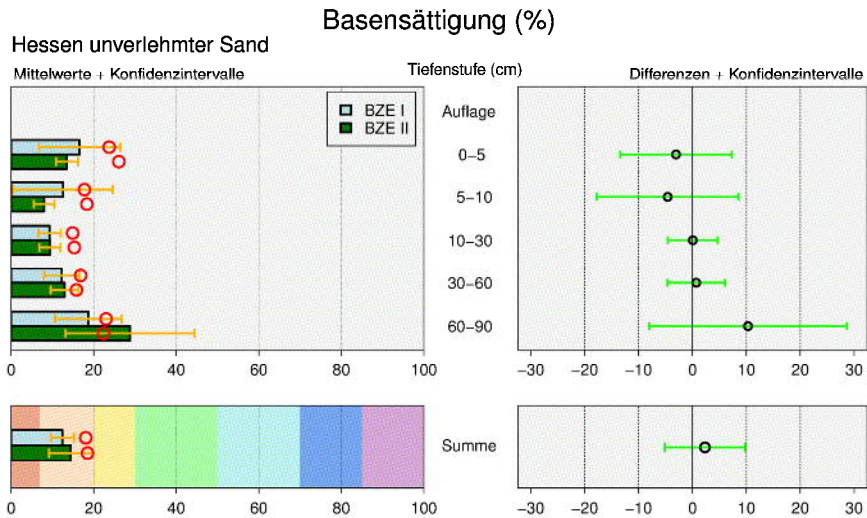


Abbildung 63: Basensättigung [%] der Substratgruppe unverlehmte Sande ($n = 8$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

Die schwach verlehmtten Sande in Hessen liegen mit durchschnittlich 32 % Basensättigung bis 90 cm Bodentiefe im mittleren Bewertungsbereich, streuen aber mit den Mittelwerten erheblich.

Nur einem BZE-Punkt in Hessen wurde die Substratgruppe verlehmter Sand zugewiesen. Dieser Standort liegt mit durchschnittlich 48 % Basensättigung an der Obergrenze des mittleren Bewertungsbereiches.

Die Sande werden in Hessen nicht gekalkt.

6.5.2.1.6 Grauwacke

Die BZE-Punkte in der Substratgruppe Grauwacke liegen mit durchschnittlich 33 % Basensättigung noch knapp im mittleren Bewertungsbereich (s. Abb. 64, Teilgrafik c). Signifikante Veränderungen zwischen beiden BZE-Erhebungen konnten nicht nachgewiesen werden. In der Substratgruppe Grauwacke sind die Konfidenzintervalle der Durchschnitte recht hoch, was vor allem auf den geringen Stichprobenumfang zurückzuführen ist.

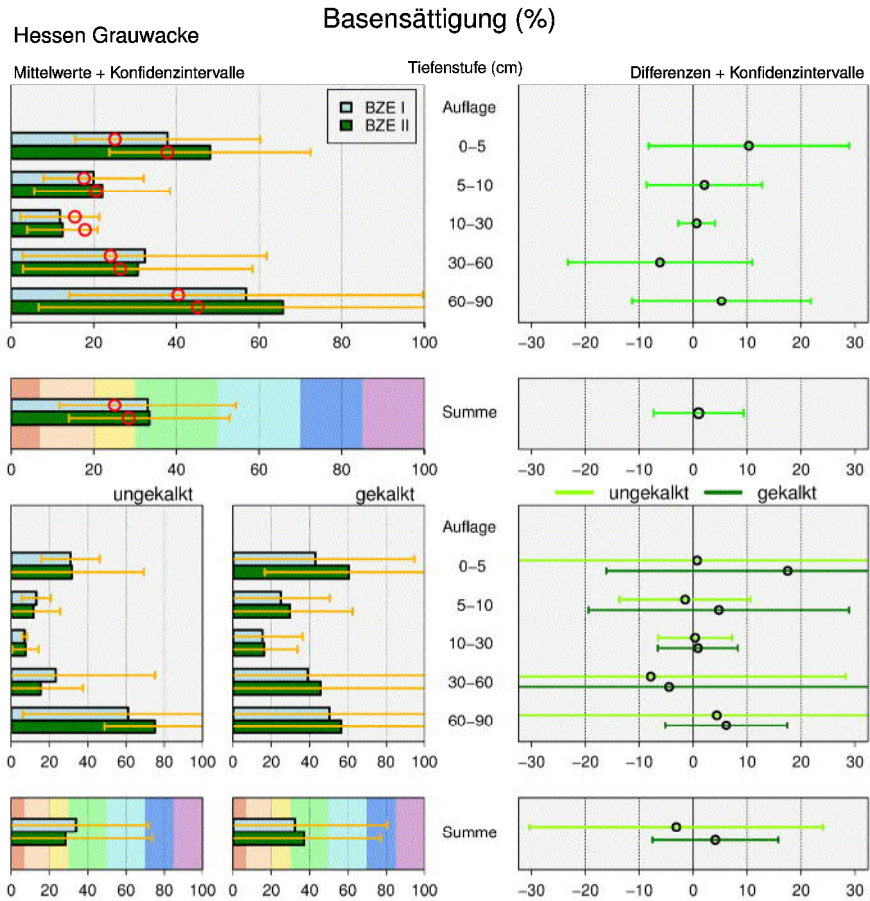


Abbildung 64: Basensättigung [%] der Substratgruppe Grauwacke (n = 7) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt (n = 3) / gekalkt (n = 4) (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.2.1.7 Ton(stein)

Mit über 65 % durchschnittlicher Basensättigung liegen die BZE-Punkte der Substratgruppe Ton(stein) im mittel-hohen Bewertungsbereich der Basensättigung und deutlich über dem Mittelwert von Hessen (s. Abb. 65, Teilgrafik c). Der Ton(stein) zählt im Allgemeinen zu den Standorten mit den höchsten Werten für die Basensättigung, es kommen aber auch stark tonige Substrate mit geringerer Basensättigung vor. Dies zeigt sich an den weiten Konfidenzintervallen in fast allen Teilgrafiken,

wobei die Stichprobe (n = 7) relativ klein ist. Signifikante Änderungen konnten für kein Kollektiv nachgewiesen werden.

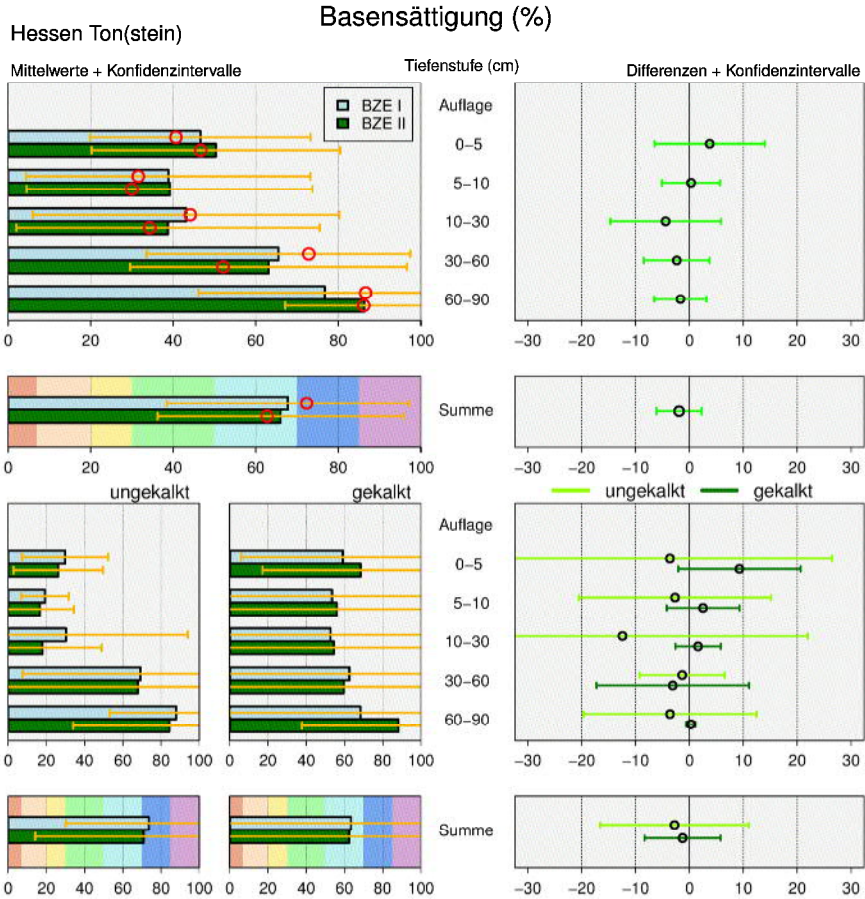


Abbildung 65: Basensättigung [%] der Substratgruppe Tonstein (n = 7) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt (n = 3) / gekalkt (n = 4) (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.2.1.8 Kalk

Mit annähernd 100 % Basensättigung über alle Tiefenstufen hinweg haben die Kalke die höchsten Werte. Signifikante Änderungen oder nennenswerte Tendenzen von der BZE I zur BZE II wurden nicht festgestellt (s. Abb. 66).

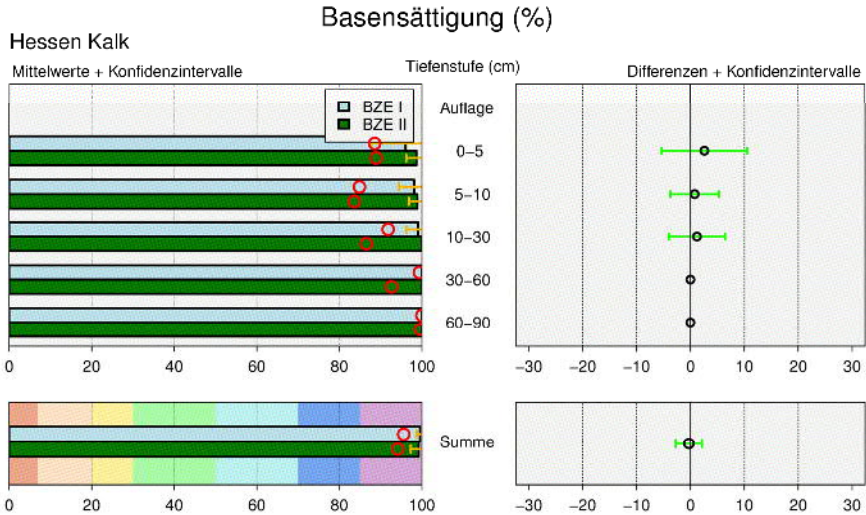


Abbildung 66: Basensättigung [%] der Substratgruppe Kalk ($n = 4$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

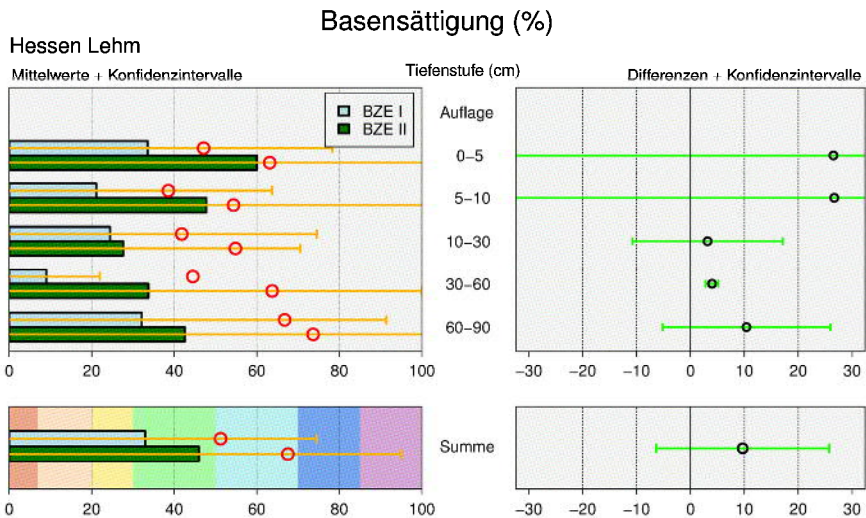


Abbildung 67: Basensättigung [%] der Substratgruppe Lehm ($n = 4$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.2.1.9 Lehm

Die vier BZE-Punkte der Substratgruppe Lehm liegen mit durchschnittlich 46 % Basensättigung im oberen mittlerem Bewertungsbereich (s. Abb. 67, Teilgrafik c). Der geringe Stichprobenumfang, die weiten Konfidenzintervalle und die hohe Heterogenität dieser Standorte lassen keine sinnvollen Aussagen zu Änderungen der Basensättigung zwischen den BZE-Erhebungen zu.

6.5.2.1.10 Quarzit

Mit durchschnittlich 8 % Basensättigung bis 90 cm Bodentiefe und geringen Werten über das ganze Profil zählen die vier BZE-Punkte der Substratgruppe Quarzit neben denen der unverlehmten Sande zu den Standorten mit der relativ geringsten Belegung des Austauschers mit Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium (s. Abb. 68). Diese BZE-Punkte fallen hinsichtlich ihrer Basensättigung in den geringen Bewertungsbereich. Trotz erfolgter Waldkalkung konnten keine Verbesserungen festgestellt werden.

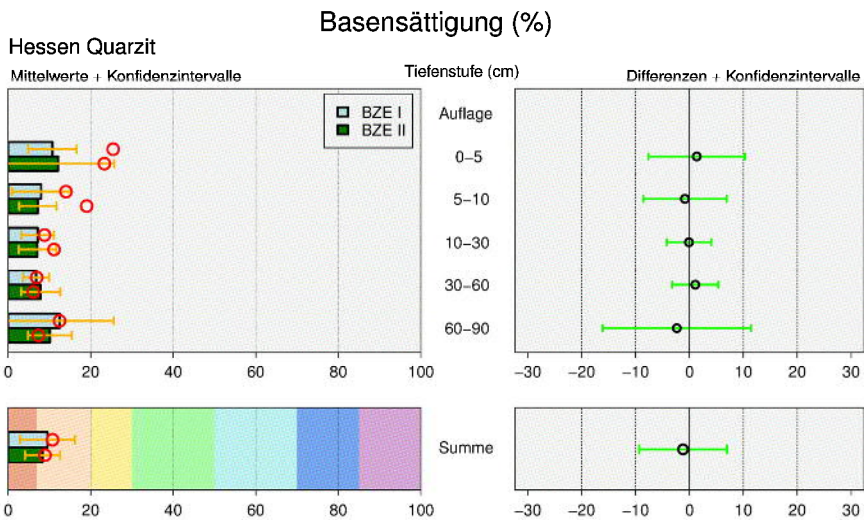


Abbildung 68: Basensättigung [%] der Substratgruppe Quarzit ($n = 4$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.2.1.11 Zechstein/Rotliegendes

Mit drei BZE-Punkten ist der Zechstein/Rotliegendes nur selten bei der BZE vertreten. Grundsätzlich sind diese Standorte eher besser nährstoffversorgt, die durchschnittliche Basensättigung liegt bei 68 % und damit im mittel-hohen Bewertungsbereich. Auffallende Veränderungen zur BZE I gab es nicht (s. Abb. 69).

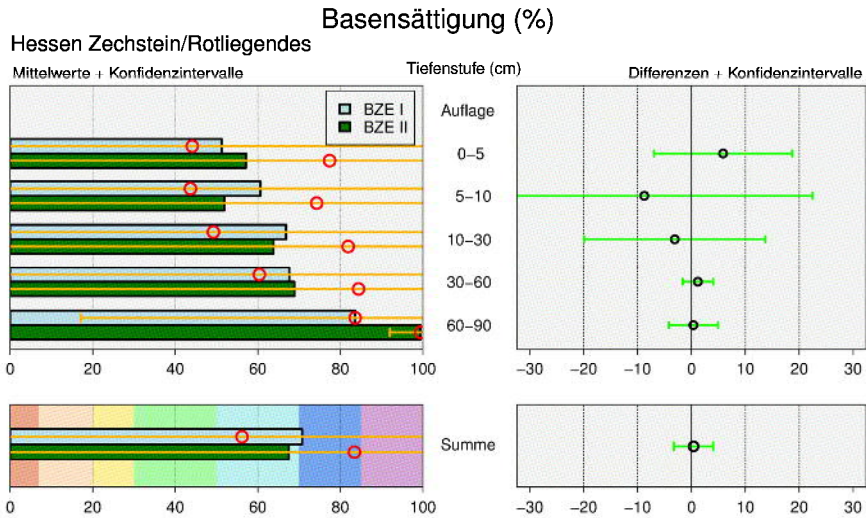


Abbildung 69: Basensättigung [%] der Substratgruppe Zechstein/Rotliegendes ($n = 3$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

6.5.2.1.12 Granit

Der Granit (nur ein BZE-Punkt in Hessen) ist mit durchschnittlich 9 % Basensättigung und ähnlich geringen Werten für die Basensättigung in den einzelnen Tiefenstufen mit dem Quarzit vergleichbar.

6.5.3 Austauschbare Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorräte

Neben den bodenchemischen Parametern Austauschkapazität und Basensättigung sind die einzelnen austauschbaren Nährelemente wichtige Indikatoren, um die Nährstoffversorgung der Waldbäume abzuschätzen. Die austauschbaren Vorräte dieser Hauptnährelemente sind für die Waldbäume leicht bis mittel verfügbar und bilden eine wichtige Versorgungsgrundlage. Die ausreichende Verfügbarkeit dieser Nährelemente ist für das Pflanzenwachstum und die Biomassebildung in größeren Mengen erforderlich. Calcium ist ein wichtiger Baustein für die Zellwände und an zentralen Prozessen wie z. B. Photosynthese, Atmung und Zellteilung beteiligt. Magnesium spielt als zentraler Baustein im Chlorophyll für die Photosynthese eine entscheidende Rolle, Kalium ist mit für die Osmoseregulation in den Zellen notwendig. Alle drei Elemente fördern die Aktivität von Enzymen und steuern die Eiweißsynthese, den Aufbau von Kohlehydraten und die Photosynthese. Die Nährele-

mente Calcium, Magnesium und vor allem Kalium werden im Zuge der Bodenversauerung von Aluminium vom Austauscher verdrängt und mit dem Sickerwasser zumeist zusammen mit Sulfat und Nitrat aus dem Hauptwurzelraum ausgewaschen. Neben der Auswaschung und über Entzüge mit der Holzernte sind die Einträge aus der Luft, Waldkalkungen sowie die Mineralverwitterung entscheidende Größen für den Stoffhaushalt. Analog zur Austauschkapazität und Basensättigung wurden diese drei Nährelemente für Hessen insgesamt und nach den Substratgruppen gegliedert berechnet. 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 Hessens Waldböden variieren die summierten Vorräte im Wurzelraum bis 90 cm Bodentiefe zusammen mit dem Auflagehumus zwischen 118 kg/ha bis über 50 t/ha. Diese große Spanne ist typisch für das weite Spektrum an Waldstandorten und deckt alle Bewertungsbereiche ab. Im ersten Fall handelt es sich um den Buntsandstein-Standort bei Raubach im Odenwald, der zugleich auch die geringste durchschnittliche Basensättigung von allen in Hessen erhobenen BZE-Punkten aufweist, im zweiten Fall um eine mächtige Fließerde mit Löss und Diabas mit hohen pH-Werten bei Dillenburg. Die Spanne in den Bundesländern Niedersachsen und Sachsen-Anhalt ist noch weiter, sie reicht von 100 kg bis 55 t Calcium je ha.

Mit rund 5.500 kg Calcium je ha (Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe) liegen die hessischen Waldstandorte im Mittel im hohen Bewertungsbereich. Zum Zeitpunkt der BZE I lagen die durchschnittlichen Vorräte bei rund 5.000 kg (s. Abb. 70, Teilgrafik c). Der Unterschied darf jedoch nicht als zeitliche Veränderung interpretiert werden. Zieht man die identischen Bodentiefen und jeweils vorhandene Angaben zum Auflagehumus heran, gibt es bei Calcium keine zeitliche Veränderung auf Profilebene für Hessen (s. Abb. 70, Teilgrafik d).

Im Hinblick auf die Veränderungen in den Tiefenstufen zeigt sich eine signifikante Abnahme im Auflagehumus um rund 150 kg von 360 auf 210 kg/ha, was einer Abnahme um gut 40 %-Punkte bezogen auf die BZE I entspricht (s. Abb. 70, Teilgrafik b). Dies kann nicht allein auf den Rückgang der Trockenmasse zurückgeführt werden, hier betrug der Rückgang gegenüber der BZE I lediglich 13 %. Damit ist Calcium entweder über die Wurzeln aufgenommen oder in den Mineralboden verlagert worden.

Tatsächlich findet sich in der Tiefenstufe 0-5 cm eine signifikante Zunahme um rund 100 kg Calcium je ha und eine leichte, nicht signifikante Zunahme von 20 kg/ha in der Tiefenstufe 5-10 cm. In den anschließenden Tiefenstufen 10-30 und 30-60 cm nehmen die mittleren Calciumvorräte jedoch um 55 und 167 kg/ha weiter

ab, die Abnahme in 30-60 cm ist signifikant. Dieser Wert wird in 60-90 cm Bodentiefe jedoch mit einer (nicht signifikanten) Zunahme von 166 kg/ha Calcium wieder ausgeglichen. Insgesamt verändert sich damit der Gesamtvorrat an austauschbarem Calcium auf Profilebene wenig, die Abnahme um 45 kg/ha zwischen beiden Erhebungen (Schnittmenge Profilsomme) ist nicht signifikant (s. Abb. 70, Teilgrafiken b und d).

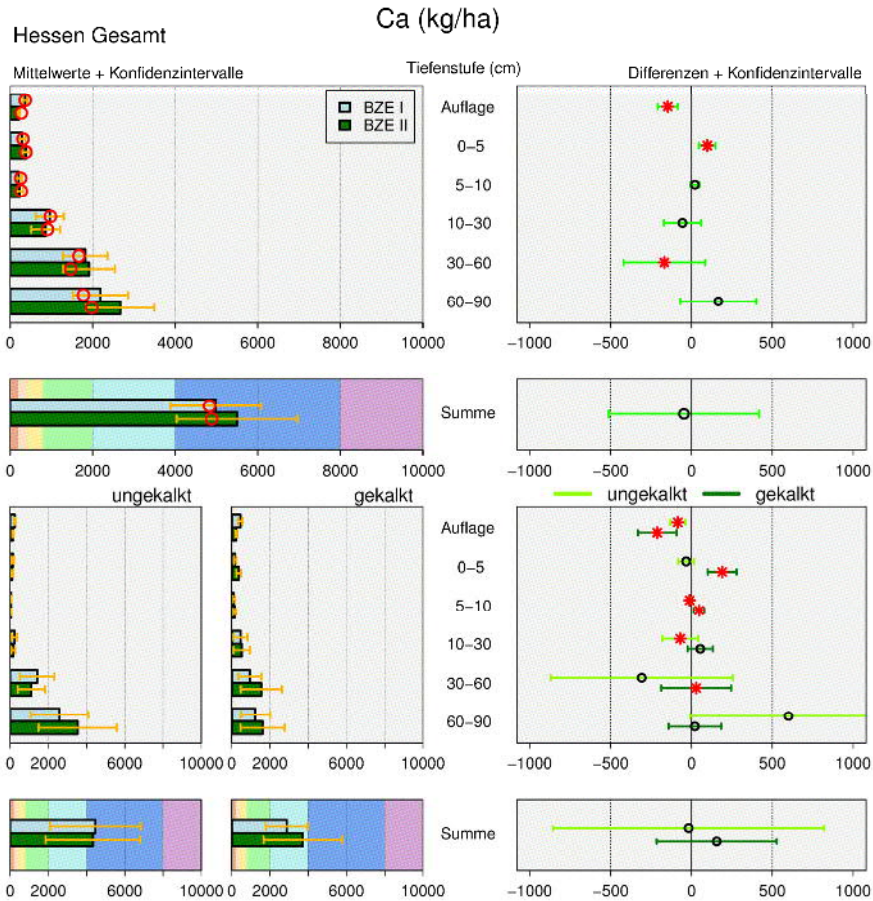


Abbildung 70: *Austauschbare Calciumvorräte [kg/ha] (n = 139) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126*

Die Waldkalkung hat auf die Veränderung der Calciumvorräte im Auflagehumus und im Mineralboden einen entscheidenden Einfluss. Dies ist in den Teilgrafiken e-j der Abbildung 70 dargestellt. Insgesamt zeigen sich im gekalkten Kollektiv eine

signifikante Abnahme im Auflagehumus (-211 kg/ha Calcium) und überwiegend signifikante Zunahmen im Mineralboden bis in 90 cm Bodentiefe, die bezogen auf das Gesamtprofil rund 160 kg/ha höhere Calcium-Vorräte ergeben.

Im ungekalkten Kollektiv kommt es ebenfalls zu einer signifikanten Abnahme im Auflagehumus, die allerdings mit rund 80 kg/ha Calcium deutlich geringer als im gekalkten Kollektiv ist. Die Calciumvorräte nehmen im ungekalkten Kollektiv jedoch im Gegensatz zum gekalkten Kollektiv bis in 60 cm Bodentiefe weiter ab, insgesamt um rund 500 kg/ha Calcium bis 60 cm Bodentiefe. In der Tiefenstufe 60-90 cm wurde jedoch im ungekalkten Kollektiv durchschnittlich 600 kg/ha mehr Calcium gefunden als im gekalkten. Die Differenz in dieser Tiefenstufe ist nicht signifikant. Damit ergibt sich auf Profilebene im ungekalkten Kollektiv keine Veränderung und im gekalkten Kollektiv eine leichte, nicht signifikante Zunahme.

Bei einer Waldkalkung mit 3 t/ha kohlen-saurem Magnesiumkalk werden ungefähr 600 kg/ha Calcium ausgebracht. Dieser Calciumvorrat findet sich im gekalkten Kollektiv auf Ebene des Landes Hessens mit 160 kg/ha höheren Calciumvorräten nur noch teilweise wieder.

Die Calciumvorräte im Auflagehumus und Mineralboden auf Profilebene sind stark von den Substratgruppen abhängig (s. Abb. 71):

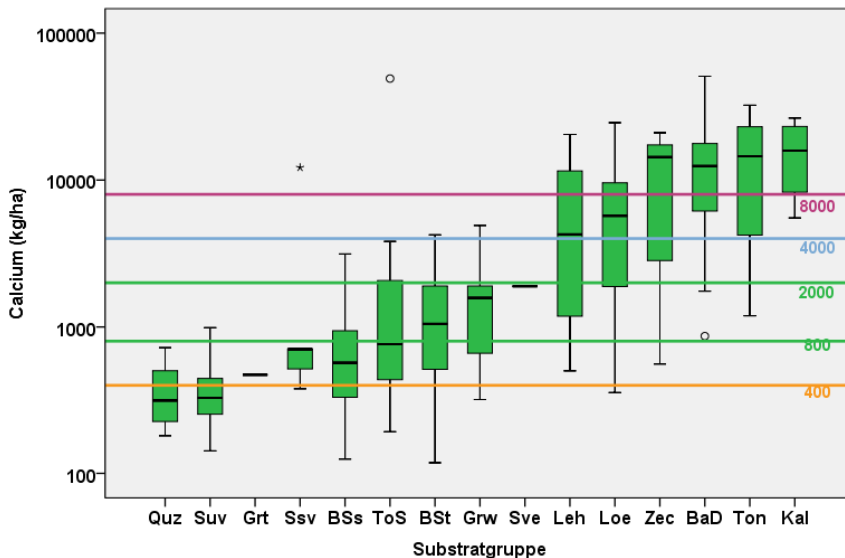


Abbildung 71: Verteilung der austauschbaren Calciumvorräte [kg/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in hessischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (Ordinate logarithmisch skaliert) (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BST: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Grt: Granit, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmter Sand, Sve: verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer, Zec: Zechstein)

Im eher geringen Bewertungsbereich unter 400 kg/ha Calcium liegen die Quarzite und die unverlehmten Sande. Der etwas bessere Bewertungsbereich zwischen 400 und 800 kg/ha Calcium ist mit dem Granit, den schwach verlehnten Sanden und Buntsandstein (sandige Ausprägung) belegt. Im mittleren Versorgungsbereich zwischen 800 und 2.000 kg/ha Calcium befinden sich die meisten BZE-Punkte der Substratgruppen Buntsandstein (tonige Ausprägung), Tonschiefer, Grauwacke und verlehmtter Sand. Bei den Substratgruppen Lösslehm, Lehm, Zechstein, Basalt/Diabas, Ton(stein) und Kalk liegen die durchschnittlichen Calciumvorräte bis 90 cm Bodentiefe im hohen bis sehr hohen Bewertungsbereich über 4.000 kg bzw. 8.000 kg Calcium.

In Abbildung 72 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.

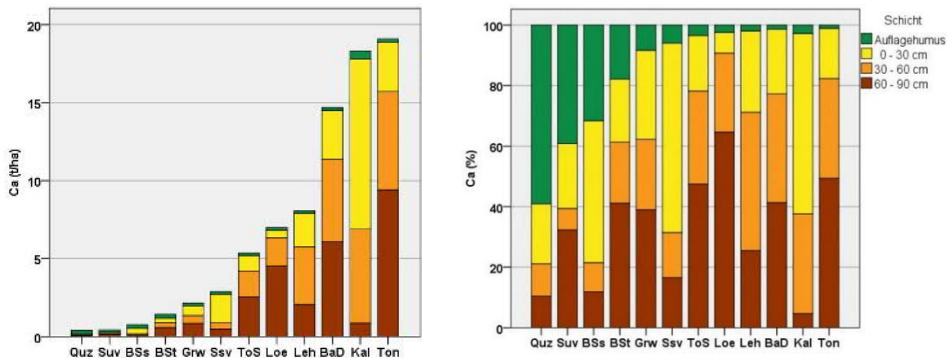


Abbildung 72: Austauschbare Calciumvorräte nach Substratgruppen im Auflagehumus und den Tiefenstufen der BZE II (0-30, 30-60, 60-90 cm) in t/ha (links) und % (rechts); dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BST: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

Bei den Substratgruppen mit eher geringen Calciumvorräten (Quarzit, unverlehmter Sand, Buntsandstein) nehmen mit abnehmenden Calciumvorräten insgesamt die relativen Anteile an Calcium im Auflagehumus zu. Bereits bei mittleren Calciumvorräten im Mineralboden liegen die im Auflagehumus gespeicherten Calciumvorräte deutlich unter 10 %. Die Verteilung der Calciumvorräte in den Tiefenstufen zeigt in den Substratgruppen typische Muster. Beispielsweise speichern die Tone Calcium überwiegend in den Tiefenstufen 30-60 und 60-90 cm, die Kalke dagegen 60 % des austauschbaren Calciums bis 30 cm Bodentiefe. Die Ursache ist vor allem der hohe Skelettgehalt in den unteren Tiefenstufen beim Kalk. Die Lösslehme haben prozentual die höchsten Calciumvorräte in der Tiefenstufe 60-90 cm (60 %). Dies verdeutlicht die hohen Vorratsreserven dieser Standorte aus tieferen Bodenschichten. Die Verteilung der Calciumvorräte im Profil unterscheidet sich deutlich bei der sandigen

Ausprägung des Buntsandsteins im Vergleich zur tonigen: Die tonige Ausprägung des Buntsandsteins enthält im Mittel mit 1.600 kg/ha doppelt so viel austauschbares Calcium wie der Buntsandstein der sandigen Ausprägung, und zwar 20 % in der Auflage und 40 % in der Tiefenstufe 60-90 cm. In der sandigen Ausprägung des Buntsandsteins sind dagegen 30 % des Calciums in der Auflage und nur 10 % in der Tiefenstufe 60-90 cm vorhanden.

Höhere Calciumvorräte bei der BZE II im Vergleich zur BZE I traten vor allem bei den Tonen (+12 %), Lehmen (+13 %) und schwach verlehmtten Sanden (+20 %) auf, geringere Calciumvorräte wurden bei Quarzit (-106 %), Buntsandstein (sandige Ausprägung: -24 %, tonige Ausprägung: -10 %) und den unverlehmtten Sanden (27 %) festgestellt. Diese Unterschiede waren jedoch auf Gesamtprofilebene in keinem Fall signifikant und sind nicht dargestellt.

Signifikant verringerte Calciumvorräte gab es jedoch in Schichten einzelner Substratgruppen: Im Auflagehumus sind dies die Substratgruppen Basalt/Diabas, Tonschiefer, sandige Ausprägung des Buntsandsteins, die Tone sowie die unverlehmtten Sande. Bei den unverlehmtten Sanden verringerten sich die Calciumvorräte im Auflagehumus um 40 % bezogen auf die BZE I. Dies sind 30 % des Gesamtvorrates auf Profilebene. Vereinzelt waren auch Verringerungen der Calciumvorräte im Mineralboden signifikant, so z. B. beim Tonschiefer mit Abnahmen in den Tiefenstufen 30-60 und 60-90 cm oder beim Buntsandstein (sandige Ausprägung) mit Verlusten in der Tiefenstufe 60-90 cm.

Im Hinblick auf die Waldkalkung konnten auf Ebene der Substratgruppen nur für die Substratgruppe Buntsandstein Unterschiede bei den Calciumvorräten abge sichert werden (s. Abb. 73).

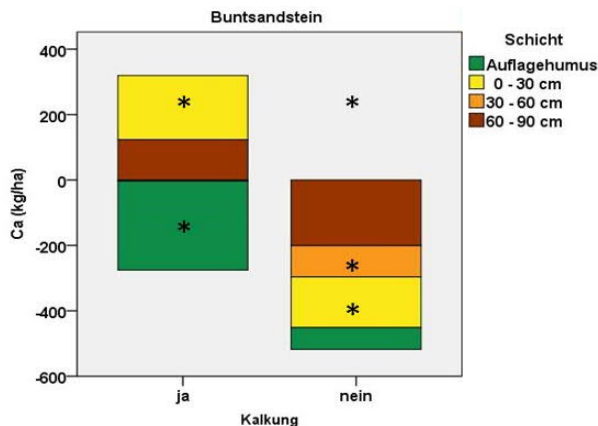


Abbildung 73: Differenzen der Calciumvorräte [kg/ha] zwischen BZE II und BZE I nach Tiefenstufen in der Substratgruppe Buntsandstein (gekalkt (n = 27) und ungekalkt (n = 11)) in Hessen

Bei den gekalkten BZE-Punkten der Substratgruppe Buntsandstein (gesamt) stiegen die Calciumvorräte auf Profilebene um 77 kg/ha leicht an (+6 %). Dieser Anstieg ist nicht signifikant. Dabei kam es zu einer deutlichen und signifikanten Abnahme der Calciumvorräte im Auflagehumus um 270 kg/ha (-47 %), was jedoch durch eine signifikante Zunahme im Mineralboden in 0-30 cm (+196 kg/ha, +89 %) und nicht signifikante Zunahme in 60-90 cm (+123 kg/ha, +48 %) kompensiert wurde. In der Tiefenstufe 30-60 cm blieben die Calciumvorräte mit rund 220 kg/ha nahezu konstant.

Im Gegensatz dazu verringerten sich die Calciumvorräte im Mittel der ungekalkten BZE-Punkte der Substratgruppe Buntsandstein deutlich: Bei der BZE I lagen die mittleren Vorräte dieser BZE-Punkte bei knapp 1.000 kg/ha Calcium, zum Zeitpunkt der BZE II waren nur noch knapp 500 kg/ha vorhanden. Dieser Rückgang ist sowohl auf Gesamtprofilebene als auch für die Tiefenstufen 0-30 und 30-60 cm signifikant. Im Auflagehumus verringerten sich die Calciumvorräte um 67 kg/ha (-27 %), in der Tiefenstufe 0-30 cm um 155 kg/ha (-51 %), in der Tiefenstufe 30-60 cm um 96 kg/ha (-68 %) und 60-90 cm um 200 kg/ha (-58 %) Calcium. Die hohen mittleren Calcium-Vorratsverluste zwischen den BZE-Erhebungen im Kollektiv der ungekalkten BZE-Punkte in der Substratgruppe Buntsandstein sind vor dem Hintergrund der ebenfalls sehr geringen Werte für die Basensättigung bedenklich. Dies bezieht sich sowohl auf den Status als auch die Dynamik, die sich aus dem für Waldökosysteme recht kurzen Betrachtungszeitraum von 15 Jahren ergibt.

Beim sandig ausgeprägten Buntsandstein liegen die mittleren Calciumvorräte im Auflagehumus nur noch bei 50 % bezogen auf die BZE I, dies wird jedoch durch Zunahmen im oberen Mineralboden bis 10 cm Bodentiefe teilweise ausgeglichen. Bezogen auf die Gesamtprofilebene ist die Abnahme um knapp 120 kg/ha Calcium von 920 auf 800 kg nicht mehr signifikant. Werden die sandig und tonig ausgeprägten Buntsandstein-Standorte nach gekalkten und ungekalkten Profilen stratifiziert, ergeben sich vergleichbare Muster mit hohen Abnahmen von Calcium in den ungekalkten Kollektiven und stabile Verhältnisse (sandiges Kollektiv) bis leichten Zunahmen (toniges Kollektiv) bei den gekalkten BZE-Punkten. Signifikant sind diese Unterschiede aber nicht, teilweise sind diese Straten auch nur mit wenigen BZE-Punkten belegt.

6.5.3.2 *Magnesium*

Magnesium hat im Vergleich zu Calcium deutlich geringere Anteile an den basischen austauschbaren Kationen. In Hessens Waldböden variieren die bis 90 cm Bodentiefe aufsummierten Vorräte zwischen 33 kg bis über 20 t je ha im Wurzelraum. Diese Spanne deckt alle Bewertungsbereiche ab. Die geringsten Magnesiumvorräte finden sich auf einem Buntsandstein-Standort mit Löss im Odenwald bei Raubach, die höchsten in einer mächtigen Fließerde mit Löss und Basalt bei Homberg, die auch die höchste Austauschkapazität in Hessen aufweist.

In Abbildung 74 sind die durchschnittlichen austauschbaren Magnesiumvorräte für Hessen dargestellt:

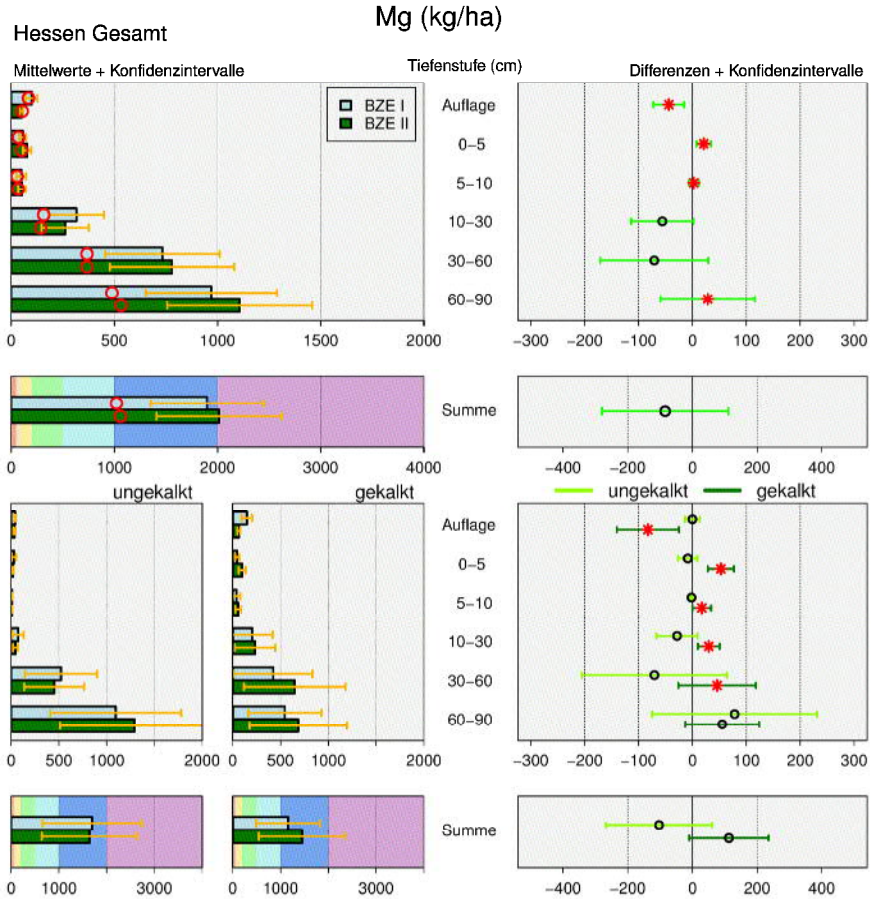


Abbildung 74: Austauschbare Magnesiumvorräte [kg/ha] (n = 139) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

Mit rund 2.000 kg/ha Magnesium in der Humusauflage und dem Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe sind die durchschnittlichen Vorräte in Hessens Waldböden sehr hoch und fast doppelt so hoch wie das Mittel der Bundesländer Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Hessen (s. Abb. 74, Teilgrafik c). Insgesamt gab es zwischen beiden BZE-Erhebungen auf Profilebene eine leichte Zunahme. Werden aber die

identischen Bodentiefen verglichen, haben die Magnesiumvorräte eher abgenommen. Das Ergebnis ist allerdings nicht signifikant (s. Abb. 74, Teilgrafik d). Die durchschnittlichen Magnesiumvorräte nehmen mit zunehmender Bodentiefe zu. Insgesamt sind im Auflagehumus zum Zeitpunkt der BZE II mit 51 kg/ha Magnesium nur 2,5 % des Gesamtvorrates bis 90 cm Bodentiefe gespeichert. Die Magnesiumvorräte im Auflagehumus haben sich zwischen den beiden BZE-Erhebungen im Mittel für Hessen halbiert (von 100 auf 50 kg/ha), dieser Unterschied ist signifikant. Dies ist analog zu Calcium nicht nur auf den Rückgang der Trockenmasse, sondern vor allem auf geringere Konzentrationen im Auflagehumus zurückzuführen. Teilweise wird dies durch (signifikant) höhere Vorräte in den Tiefenstufen 0-5 und 5-10 cm im Mineralboden ausgeglichen. Deutliche Abnahmen in 10-30 und 30-60 cm und leichte Zunahmen in 60-90 cm Bodentiefe ergeben auf Profilebene rechnerisch eine nicht signifikante Abnahme von 85 kg/ha Magnesium (Schnittmenge Profilsomme). Dies sind bezogen auf den Gesamtvorrat 5 % weniger als zum Zeitpunkt der BZE I.

Die Waldkalkung hat die Vorräte von Magnesium erheblich beeinflusst. In Abbildung 74, Teilgrafik g zeigen sich signifikante Veränderungen im gekalkten Kollektiv mit einem deutlichen Rückgang der Vorräte im Auflagehumus und Zunahmen im Mineralboden bis in 60 cm Bodentiefe. Auch in 60-90 cm nehmen die Magnesiumvorräte zu, allerdings nicht mehr signifikant. Im ungekalkten Kollektiv dagegen gibt es keine signifikanten Veränderungen.

Wie bei Calcium sind auf Profilebene die Zunahme im gekalkten Kollektiv von insgesamt 113 kg/ha (+9 %) und die Abnahme im ungekalkten Kollektiv (-3 %) nicht signifikant.

Auffallend sind die doppelt so hohen Magnesiumvorräte im ungekalkten Kollektiv in 60-90 cm Bodentiefe im Vergleich zu den gekalkten BZE-Punkten, was einen direkten Vergleich dieser Tiefe im Hinblick auf die Waldkalkung und damit die Betrachtung des Gesamtprofils einschränkt.

Die Magnesiumvorräte zeigen ähnlich wie die Calciumvorräte deutliche Unterschiede zwischen den Substratgruppen:

Vergleichbar mit Calcium fallen die unverlehnten Sande mit durchschnittlich 74 kg/ha Magnesiumvorrat im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm in den geringen Bewertungsbereich (s. Abb. 75). Etwas besser sind der Granit, die schwach verlehnten Sande, Quarzite und sandig ausgeprägte Buntsandsteine einzustufen. Diese Standorte liegen mit ihren Magnesiumvorräten überwiegend in der gering-mittleren Bewertungsstufe zwischen 100 und 200 kg/ha Magnesium, es kommen aber auch vereinzelt deutlich besser versorgte BZE-Punkte bis 1.000 kg/ha Magnesium vor. In den mittleren Bewertungsbereich zwischen 200 und 500 kg/ha Magnesium fallen im Median die BZE-Punkte der Substratgruppen Grauwacke, Zechstein, verlehmtter Sand, tonig ausgeprägter Buntsandstein und Tonschiefer. Auch hier gibt es weite Streuungen, im Zechstein kommen sehr gut mit Magnesium versorgte Standorte mit über 2.000 kg/ha vor. Wie bereits bei Calcium sind die BZE-Punkte

der Substratgruppen Kalk, Lösslehm, Lehm, Basalt/Diabas sowie Ton(stein) überwiegend mit hoch bis sehr hoch zu bewerten. Allerdings gibt es bei den Kalken, Lösslehm und Lehmen auch gering-mittel bis vereinzelt sogar gering versorgte Standorte.

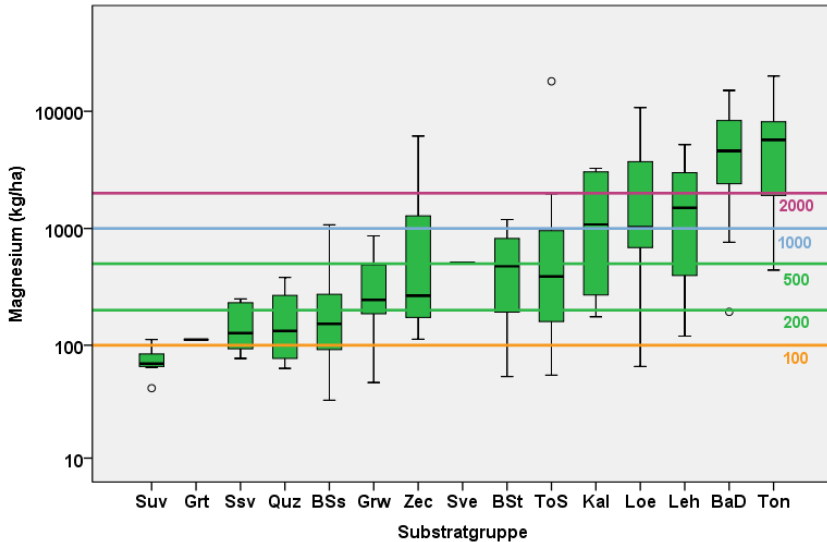


Abbildung 75: Verteilung der austauschbaren Magnesiumvorräte [kg/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in bessischen Waldböden als Summe Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (Ordinate logarithmisch skaliert) (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BSt: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Grt: Granit, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer, Zec: Zechstein; Grenzwerte: s. Tab. 16, S. 123)

Ähnlich der Verteilung der Calciumvorräte weisen auch die Magnesiumvorräte auf den eher ärmeren Standorten die höchsten Anteile von Magnesium im Auflagehumus auf (s. Abb. 76). Dies betrifft die Sande, Quarzit und die sandige Ausprägung des Buntsandsteins. Bei diesen Standorten liegen ca. 50 bis 80 % der Magnesiumvorräte im Auflagehumus und im Oberboden bis 30 cm Bodentiefe. Dies trifft auch auf die Kalke zu. Hier wird vor allem der hohe Skelettanteil in tieferen Bodenschichten für die geringen Magnesiumvorräte verantwortlich sein. Bei den tonig geprägten Substratgruppen Tonschiefer, Lehm und Lösslehme, Basalt/Diabas sowie Ton(stein) mit sehr hohen Magnesiumvorräten über 2 t/ha liegt dagegen der überwiegende Anteil des austauschbaren Magnesiums im mittleren und unteren Mineralboden unter 30 cm Bodentiefe. Auch Grauwacken und tonige Buntsandsteine weisen hohe Magnesiumvorräte in tieferen Bodenschichten auf.

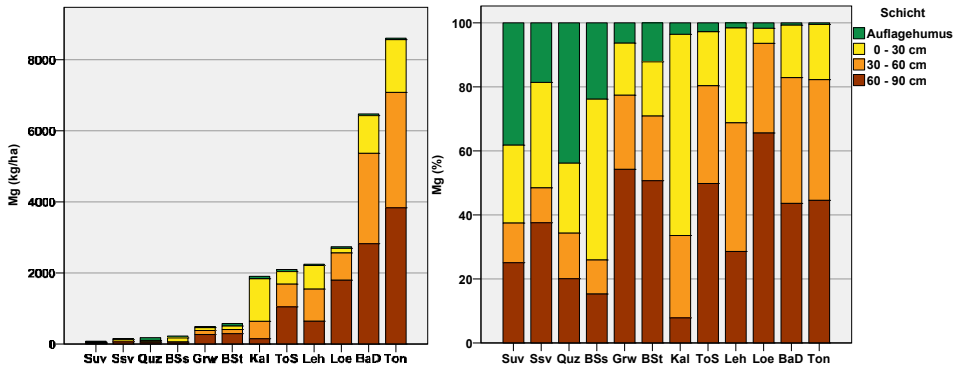


Abbildung 76: Austauschbare Magnesiumvorräte bei der BZE II in den Substratgruppen nach Auflagehumus und Tiefenstufen (0-30, 30-60, 60-90 cm) in kg/ha (links) und % (rechts), dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BS1: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzlit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

Hinsichtlich der zeitlichen Veränderungen der Magnesiumvorräte zeigen sich nur beim Buntsandstein (gesamt) ähnliche Muster wie für Hessen insgesamt. Dies wird aus Abbildung 77 ersichtlich:

Bei den Magnesiumvorräten im Buntsandstein zeigen sich deutliche, nicht signifikante Abnahmen der Magnesiumvorräte im Auflagehumus und signifikante Zunahmen im Mineralboden bis 60 cm (s. Abb. 77, Teilgrafik b). Diese Veränderungen können auf die Waldkalkung zurückgeführt werden, wie aus der Teilgrafik g ersichtlich wird. Die Veränderungen auf Ebene der BZE-Tiefenstufen im ungekalkten Kollektiv sind nicht signifikant, die Zunahmen der Magnesiumvorräte bis 60 cm Bodentiefe im gekalkten Kollektiv jedoch alle. Auf Profilebene zeigen sich lediglich nicht signifikante Tendenzen. Im gekalkten Kollektiv kommt es insgesamt zu einer Zunahme um knapp 20 %-Punkte, im ungekalkten Kollektiv zu einer Abnahme in ähnlicher Größenordnung.

Damit liegen die ungekalkten BZE-Punkte des Buntsandsteins zum Zeitpunkt der BZE II mit 234 kg/ha Magnesiumvorrat im unteren mittleren Bewertungsbereich und die gekalkten BZE-Punkte mit 435 kg/ha Magnesiumvorrat im oberen mittleren Bewertungsbereich. Bei der BZE I lagen diese Kollektive mit 305 kg/ha für die ungekalkten und 363 kg/ha Magnesiumvorrat für die gekalkten BZE-Punkte noch deutlich enger zusammen (s. Abb. 77, Teilgrafiken h und i). Die Veränderungen in der mehr sandigen und tonigen Fraktion des Buntsandsteins sind vergleichbar.

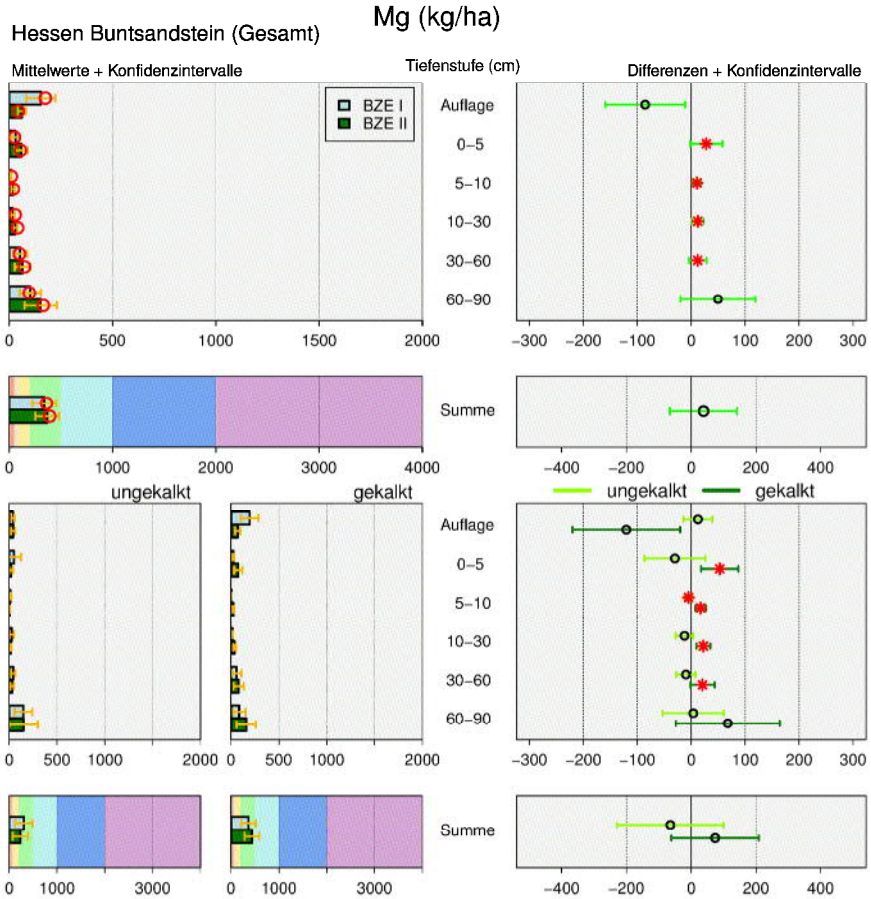


Abbildung 77: Austauschbare Magnesiumvorräte [kg/ha] der Substratgruppe Buntsandstein ($n = 39$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt ($n = 11$)/gekalkt ($n = 27$) (untere 6 Grafiken, der Kalkungsstatus eines Punktes konnte nicht geklärt werden); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

Noch deutlicher wird der Kalkungseinfluss auf die Magnesiumvorräte für die Substratgruppen Buntsandstein und Lösslehm in Abbildung 78. Die Veränderungen sind zwar in keinem Kollektiv auf Gesamtprofilebene signifikant, doch ergeben sich für die Kalkung typische Muster. Beim Buntsandstein im gekalkten Kollektiv ist zum Zeitpunkt der BZE II deutlich weniger Magnesium im Auflagehumus (-120 kg/ha, entsprechend -62 % bezogen auf die BZE I), dafür sind jedoch im Mineralboden die Vorräte in allen Schichten erhöht, in 0-30 cm und 30-60 cm signifikant. Die Vorräte

im Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe nahmen um 174 kg/ha (+91 %) signifikant zu. Durch die geringeren Vorräte im Auflagehumus ergibt sich im Mittel auf Profilebene eine Zunahme von 70 kg/ha, dies entspricht bezogen auf die BZE I einer Zunahme von rund 20 %. Im ungekalkten Kollektiv kommt es dagegen zu signifikanten Verlusten in der Bodenschicht 0-30 cm und leichten Verlusten in der Bodentiefe 30-60 cm, die insgesamt nicht durch die Zunahmen im Auflagehumus kompensiert werden. Mit einer Abnahme von 45 kg/ha auf Profilebene liegen die Magnesiumvorräte im ungekalkten Kollektiv des Buntsandsteins um 20 % niedriger bezogen auf die Vorräte der BZE I. Beim Lösslehm zeigt sich eine ähnliche Tendenz auf Profilebene, hier kam es im gekalkten Kollektiv zu höheren Magnesiumvorräten (+303 kg/ha, +19 %), im ungekalkten Kollektiv zu Abnahmen gegenüber der BZE I (-240 kg/ha, -19 %).

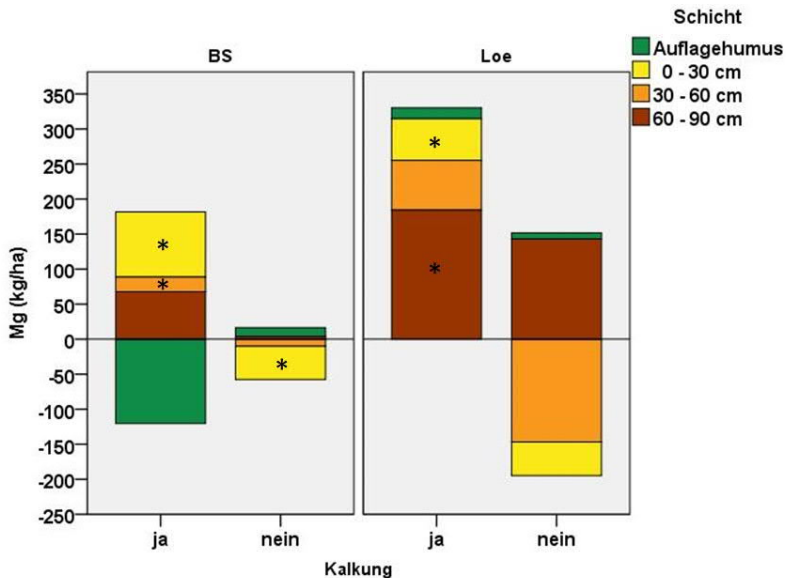


Abbildung 78: Differenzen der Magnesiumvorräte [kg/ha] zwischen BZE II und BZE I nach Tiefenstufen in den Substratgruppen Buntsandstein gesamt (gekalkt ($n = 27$) und ungekalkt ($n = 11$)) und Lösslehm (gekalkt ($n = 7$) und ungekalkt ($n = 12$)) in Hessen

In den anderen Substratgruppen treten in den Tiefenstufen vereinzelt signifikante Veränderungen auf. Im Tonschiefer, der zum überwiegenden Anteil auch gekalkt wurde, waren die Magnesiumvorräte in den Tiefenstufen 0-5, 5-10 und 0-30 cm des Mineralbodens signifikant erhöht. Dies ist auf Profilebene jedoch nicht mehr relevant. Für die Grauwacke und den Tonschiefer konnten ebenfalls für die oberen 30 cm des Mineralbodens signifikante Zunahmen abgesichert werden, auch hier wurden viele Standorte gekalkt. Die Unterschiede konnten jedoch aufgrund der geringen Stichprobengröße nicht abgesichert werden.

6.5.3.3 Kalium

Auch bei Kalium decken die an den BZE-Punkten vorkommenden Vorräte im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe das ganze Spektrum der Bewertungsskala ab. Die Spanne reicht von 36 kg/ha Kalium in einer Tonmergelteufelbeide bis 2.800 kg/ha in einer Parabraunerde aus Lösslehm mit Ton und Basaltbeimengung.

Die mittleren Vorräte und Veränderungen für Hessen sind nach Tiefenstufen in Abbildung 79 dargestellt:

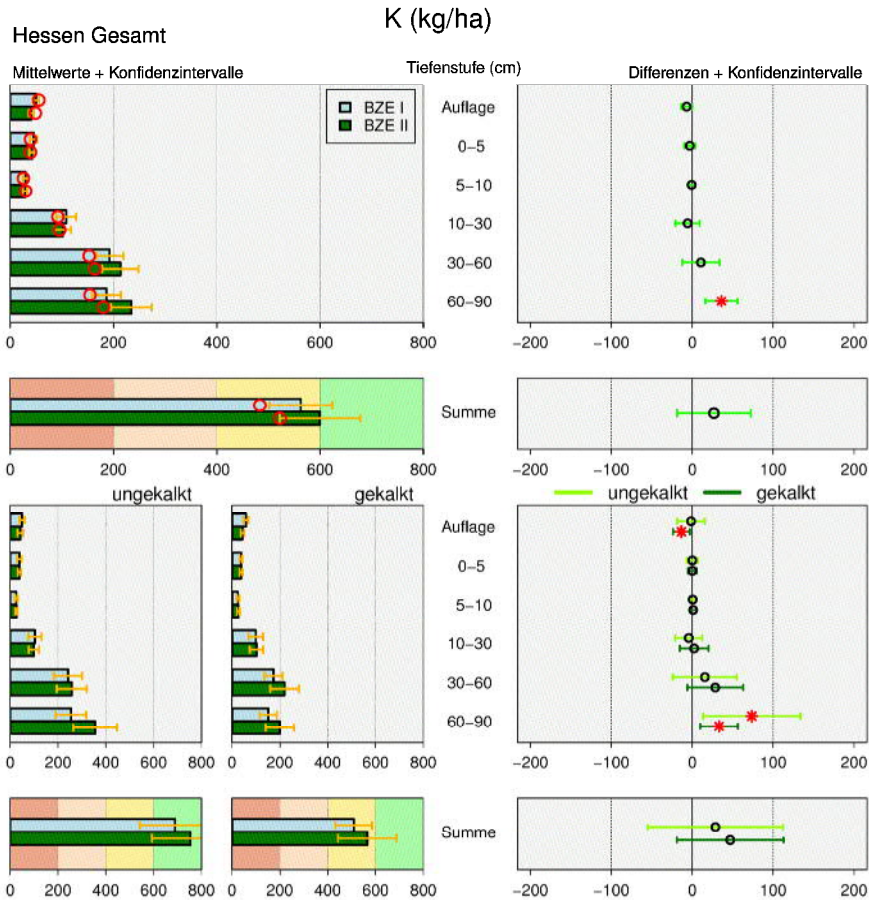


Abbildung 79: Austauschbare Kaliumvorräte [kg/ha] (n = 139) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

Mit 560 kg/ha Kalium bei der BZE I und 600 kg/ha bei der BZE II liegt die mittlere Versorgung von Kalium im Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe im oberen gering-mittleren Bewertungsbereich. Der um 40 kg/ha höhere Vorrat bei der BZE II im Vergleich zur BZE I auf Ebene des Gesamtprofils ist nicht signifikant.

Im Auflagehumus sind mit rund 40 kg/ha Kalium 7 % des Gesamtvorrates gespeichert, im Mineralboden sind die Vorräte relativ gleichmäßig bezogen auf gleiche Mächtigkeiten über alle Bodentiefen verteilt (s. Abb. 79, Teilgrafik a). Signifikante Veränderungen zur BZE I gab es bei der BZE II nur in der Tiefenstufe 60-90 cm mit einer Zunahme von rund 36 kg/ha Kalium, d. h. eine Zunahme um 19 % bezogen auf den Kaliumvorrat der BZE I.

Im Hinblick auf den Faktor Waldkalkung ergibt sich bei der BZE II auf Profilebene bei den ungekalkten BZE-Punkten ein mittlerer Vorrat um 700 kg/ha Kalium. Damit liegt dieses Kollektiv im mittleren Bewertungsbereich. Für das gekalkte Kollektiv dagegen liegt der mittlere Vorrat mit rund 530 kg/ha eine Bewertungsstufe darunter im gering-mittleren Bewertungsbereich. Wie schon bei der Austauschkapazität und Calcium zeigt sich, dass die Kollektive gekalkt und ungekalkt unterschiedlich sind. In beiden Kollektiven nehmen die durchschnittlichen K-Vorräte zwischen beiden Erhebungen zu, beide Zunahmen sind jedoch nicht signifikant (s. Abb. 79, Teilgrafiken h-j). Auf Ebene der einzelnen Tiefenstufen und des Auflagehumus (Teilgrafiken e-g) zeigt sich im Unterschied zur nicht stratifizierten Ebene (Teilgrafiken a und b) eine signifikante Abnahme im Auflagehumus im gekalkten Kollektiv. Absolut sind dies 13 kg/ha Kalium weniger im Auflagehumus der BZE II. Bezogen auf den Vorrat der BZE I ist dies eine Abnahme im Auflagehumus um 23 %-Punkte. Diese Abnahme wird bei weitem durch die signifikanten Zunahmen sowohl im gekalkten als auch ungekalkten Kollektiv in der Bodentiefe 60-90 cm kompensiert.

Im Unterschied zu den Calcium- und Magnesiumvorräten liegen die Kaliumvorräte in den Substratgruppen deutlich häufiger in geringen Bewertungsstufen. Sehr geringe bis geringe Vorräte kommen überwiegend bei den Kalken, den Sanden, den sandig ausgeprägten Buntsandsteinen, Grauwacken, Tonschiefern und Quarziten vor (s. Abb. 80). Etwas besser mit überwiegend gering-mittlerer bis mittlerer Bewertungsstufe ist die Versorgung mit Kalium beim Zechstein, Basalt/Diabas, dem tonig ausgeprägten Buntsandstein und den Lehmen. Aber auch bei diesen Standorten gibt es BZE-Punkte mit geringen oder sehr geringen Kaliumvorräten. Relativ hohe Vorräte in hohen bis sehr hohen Bewertungsstufen finden sich in den Substratgruppen Lösslehm und Ton(stein). Auffällig sind die weiten Spannen beim Zechstein, Ton(stein) und dem Tonschiefer, in den der BZE-Punkt mit dem höchsten Kaliumvorrat von über 2.500 kg/ha fällt.

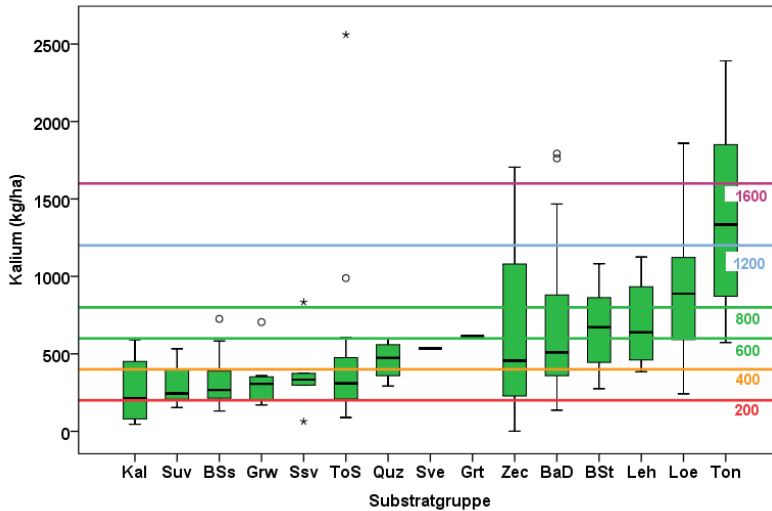


Abbildung 80: Verteilung der austauschbaren Kaliumvorräte [kg/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in bessischen Waldböden als Summe Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BST: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Grt: Granit, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer, Zec: Zechstein; Grenzwerte: s. Tab. 16, S. 123)

Im Unterschied zu Calcium und Magnesium zeigt sich beim austauschbaren Kalium mit Ausnahme der Kalke eine relativ ähnliche Verteilung in den Bodenschichten der verschiedenen Substratgruppen. Bezogen auf die einzelne Substratgruppe findet sich jeweils ungefähr ein Drittel in 0-30, 30-60 und 60-90 cm Bodentiefe (s. Abb. 81). In der Substratgruppe Kalk befinden sich ca. 20 % des Kaliums im Auflagehumus und annähernd 80 % in den oberen 30 cm Bodentiefe. Im Auflagehumus sind sonst in den Substratgruppen zwischen 14 % (Quarzit) und 2 % (Ton(stein)) Kalium gespeichert. In der Bodentiefe 0-30 cm haben die Lösslehme, der tonige Buntsandstein, Ton(stein) und Quarzit Kaliumanteile um 20 % am Gesamtkaliumvorrat im Profil. Höhere Anteile in dieser Tiefenstufe finden sich beispielsweise beim Buntsandstein (sandige Ausprägung) sowie den schwach verlehmtten Sanden. Die Kaliumanteile in der Tiefenstufe 30-60 cm liegen zwischen 27 und 40 %, in der Tiefenstufe 60-90 cm zwischen 28 und 41 %.

Signifikante Veränderungen auf Profilebene ergaben sich für Kalium in keiner Substratgruppe, auch nicht für gekalkte oder ungekalkte Teilkollektive. Die signifikante Zunahme der austauschbaren Kaliumvorräte in der Bodentiefe 60-90 cm zeigte sich auch beim Buntsandstein. Deutliche Zunahmen in dieser Bodentiefe wurden auch beim Lösslehm, Ton(stein) und unverlehmtten Sand festgestellt. Sie sind in keinem Fall signifikant.

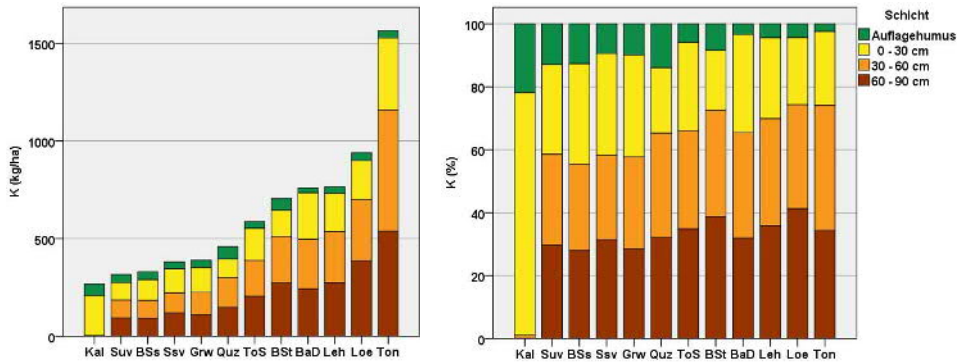


Abbildung 81: Austauschbare Kaliumvorräte bei der BZE II in den Substratgruppen nach Auflagehumus und Tiefenstufen (0-30, 30-60, 60-90 cm) in kg/ha (links) und % (rechts), dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BaD: Basalt/ Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BSt: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

6.5.4 Austauschbare Ma-Kationen-Vorräte

Die zeitliche Entwicklung der austauschbaren Ma-Kationen-Vorräte (s. Abb. 82 und Abb. 83) zeigt eine deutliche und ab 5 cm Bodentiefe signifikante Zunahme der Protonen und von Eisen. Eine signifikante Abnahme von Mangan wird ab 10 cm Bodentiefe festgestellt. Die Aluminiumvorräte nehmen in der Tiefenstufe 0-5 cm leicht signifikant ab, in 5-10 und 10-30 cm leicht signifikant zu, ab 30 cm sind die Veränderungen nicht signifikant. Diese Ergebnisse können auf weiter ablaufende Versauerungsprozesse im Mineralboden hinweisen. Zwar ist der pH(H₂O)-Wert in den meisten Bodenschichten bei der BZE II höher als bei der BZE I, doch liegen die pH(KCl)-Werte fast überall unter den Werten der BZE I. Die Zunahme der Protonen am Austauscher kann auch mit der Auflösung von Hydroxy-Sulfaten im Boden im Zusammenhang stehen.

Hinsichtlich der Belegung des Austauschers mit Ma-Kationen in Abhängigkeit von der Waldkalkung gibt es auf Vorratsebene keine eindeutigen Befunde. Tendenziell nehmen die Protonen am Austauscher im Unterboden im ungekalkten Kollektiv stärker zu als im gekalkten, Mangan nimmt ab 30 cm im ungekalkten Kollektiv stärker ab. Beides spricht für eine stärkere Versauerung im ungekalkten Kollektiv. Bei Aluminium und Eisen sind die Unterschiede hinsichtlich der Waldkalkung sehr heterogen und nicht signifikant. Deutliche Muster sind nicht erkennbar.

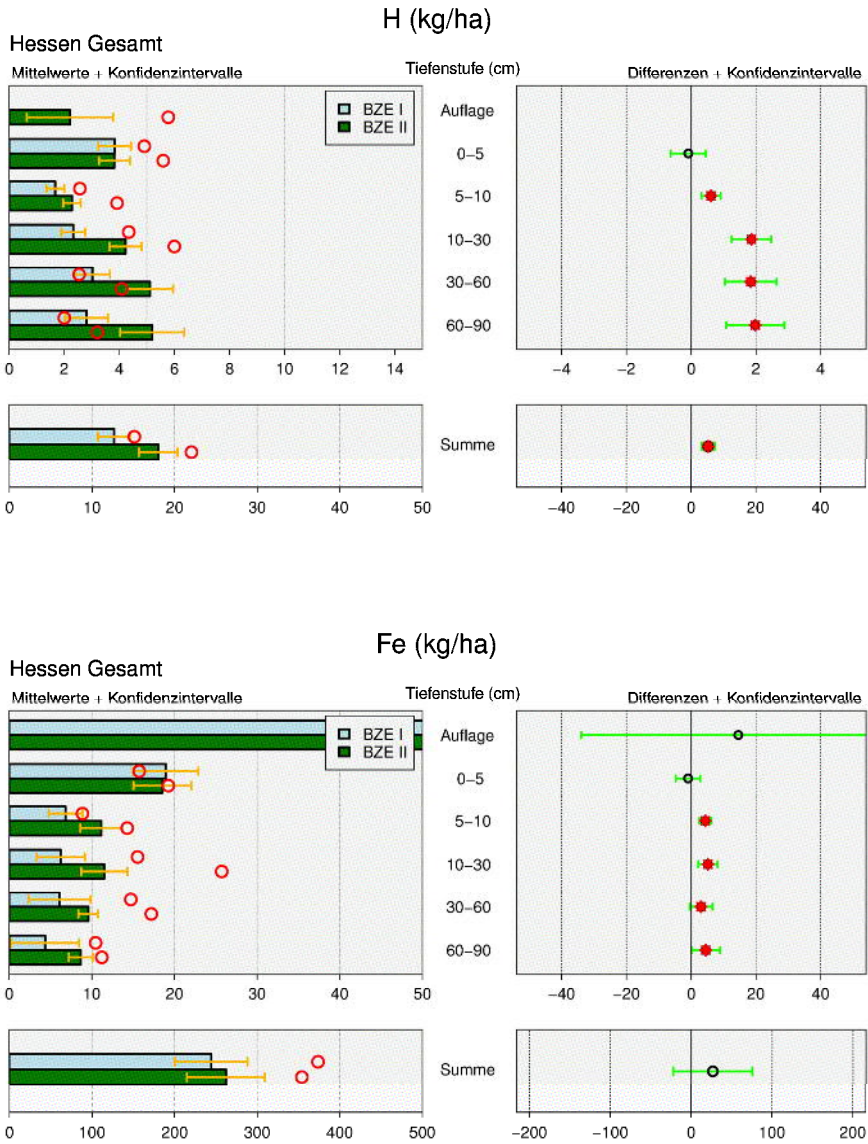


Abbildung 82: Vorräte [kg/ha] von Protonen (oben) und Eisen (unten) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

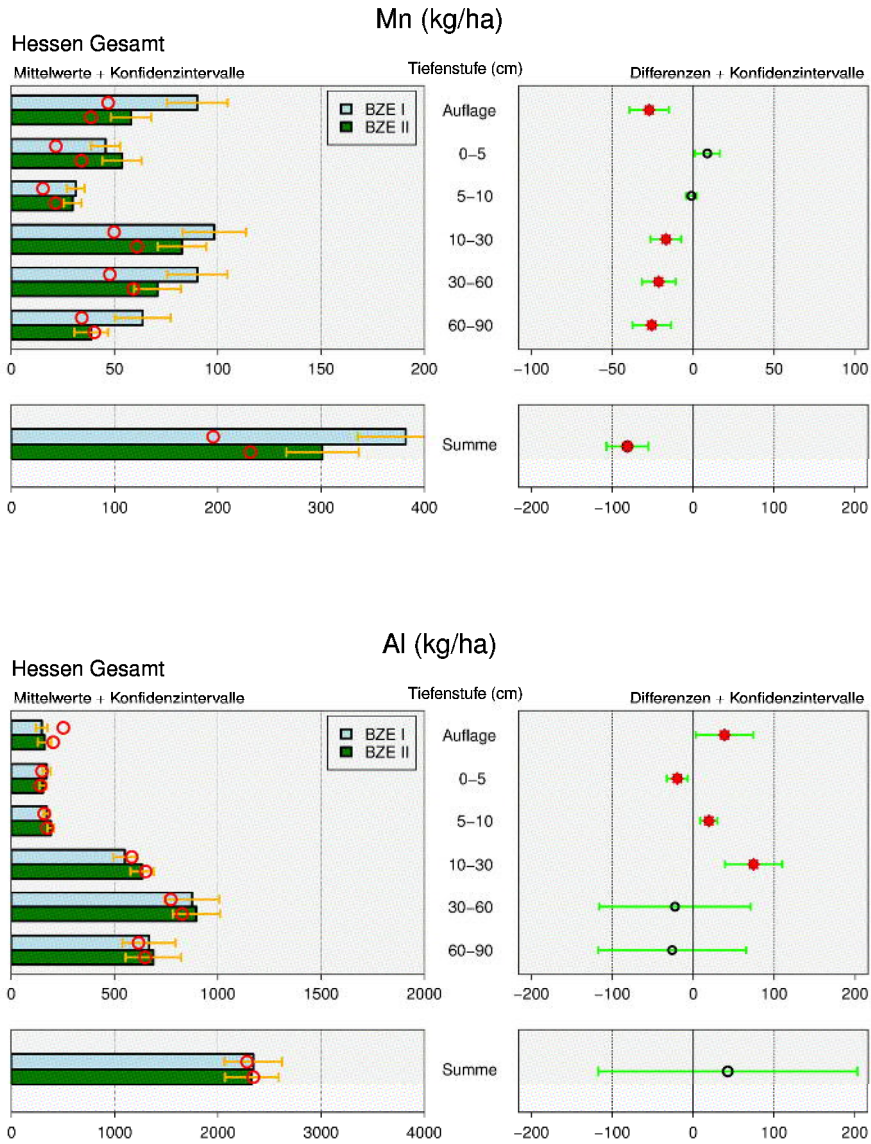


Abbildung 83: Vorräte [kg/ha] von Mangan (oben) und Aluminium (unten) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen und Summe bis 90 cm; die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

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 (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 (KCl) und (CaCl_2) erfassen dagegen auch die unterschiedlich stark am Austauscher 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 sog. Pufferbereiche (s. Tab. 17), die eine Gliederung des chemischen Bodenzustandes und Rückschlüsse auf die Stabilität der Waldökosysteme zulassen (ULRICH 1981, 1986). Ein Puffersystem puffert bei Protonenzufuhr die Protonen ab und hält damit den pH-Wert der Bodenlösung 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, z. B. zwischen Austauscher- und Aluminium-Pufferbereich (ULRICH 1983). Die Silikatverwitterung und die damit verbundene Protonenkonsorption findet bei höheren und 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 17: 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"> - Vorherrschende Pufferreaktion: Kalkauflösung - Humusform: Mull, rasche Streuumsetzung - Bodenbildungsprozess: Entkalkung, stabiles Bodengefüge, evtl. ungünstiges Ca/K-Verhältnis, Auswaschung von Calcium - keine Behinderung des Wurzelwachstums oder der Zersetzeraktivität aufgrund bodenchemischer Bedingungen, gute Wachstumsbedingungen seitens der Bodenchemie
Kohlensäure-Silikat ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ zwischen 6,2 und 5,0)
<ul style="list-style-type: none"> - Vorherrschende Pufferreaktion: Verwitterung der primären Silikate unter Freisetzung von Nährstoffkationen - Humusform: Mull und Mullartiger Moder - Bodenbildungsprozess: Verbraunung und Tonverlagerung - optimale Nährstoffverfügbarkeit und ökologisches Optimum aus bodenchemischer Sicht
Austauscher ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ zwischen 5,0 und 4,2)
<ul style="list-style-type: none"> - 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 - Humusform: Mullartiger Moder und Moder - Rückgang der Austauschkapazität und der biologischen Aktivität, Verbraunung des Bodens - Konkurrenzkraft anspruchsvoller Pflanzenarten geht zurück
Aluminium ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ zwischen 4,2 und 3,8)
<ul style="list-style-type: none"> - Pufferung: Auflösung der Aluminium-Hydroxo Kationen und sekundärer Tonminerale, Tonzerstörung, Freisetzung von Aluminium-Ionen und Protonen in die Bodenlösung, - Humusform: Moder und Rohhumus - Podsoligkeit, geringe Basensättigung - zunehmende Einschränkung der Wuchsleistung durch den bodenchemischen Zustand
Aluminium-Eisen (zwischen $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 3,8 und 3,0)
<ul style="list-style-type: none"> - 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 - Humusform: schlechte Moderhumusformen, Rohhumus - stärkere Podsoligkeit, Podsolierung - Wachstumsstörungen der Bäume
Eisen ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O}) < 3,0$)
<ul style="list-style-type: none"> - Pufferung: über Eisenhydroxidauflösung, hohe Kationensäurekonzentrationen in der Bodenlösung, sehr geringe Basensättigung am Austauscher - Humusform: Rohhumus, Hochmoortorf - starke Podsolierung - Wachstumsstörungen der Bäume

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 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 pH -Werte in salzhaltiger Suspension auch im Boden gespeicherte Kationensäuren einbeziehen, bilden diese pH -Werte auch abgelaufene, historische Versauerungsschübe ab und geben Hinweise auf Säurebelastungen, denen der untersuchte Boden einmal ausgesetzt war. Damit werden bei den 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, da diese beiden Werte sowohl in der ersten als auch in der zweiten BZE gemessen wurden und Veränderungen berechnet werden können. Der pH -Wert in 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 84 sind die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte des Auflagehumus und nach Tiefenstufen des Mineralbodens 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 4,3 und 5,3 und befinden sich damit in Hessen überwiegend im Austausch- und teilweise im Silikat-Pufferbereich.

Die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte der Auflage sind von durchschnittlich 4,9 bei der BZE I auf 4,7 bei der BZE II um 0,2 pH gesunken. Dies ist für Hessen insgesamt signifikant. Die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in der Tiefenstufe 0-5 cm liegen mit durchschnittlich 4,3 (BZE I) und 4,6 (BZE II) deutlich niedriger als im Auflagehumus, steigen aber mit zunehmender Bodentiefe auf Werte von über 5,0 in der Tiefenstufe 60-90 cm. Mit Ausnahme der Tiefenstufe 10-30 cm sind die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte bei der BZE II signifikant höher als bei der BZE I, die wässrige Bodenlösung ist aktuell leicht weniger sauer.

Im Hinblick auf die Waldkalkung zeigt sich, dass die Abnahme der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte von der BZE I zur BZE II im Auflagehumus nur im ungekalkten Kollektiv signifikant ist, obwohl die Werte auch im gekalkten Kollektiv gegenüber der BZE I geringer sind. Im gekalkten Kollektiv lassen sich steigende $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte für die

Tiefenstufen 0-5, 5-10 und 30-60 cm absichern, im ungekalkten Kollektiv in den Tiefenstufen 0-5 und 60-90 cm. Die Zunahme in der Tiefenstufe 0-5 cm ist im gekalkten Kollektiv deutlich höher als im ungekalkten. Damit lässt sich auf eine Abschwächung weiterer Versauerung im Auflagehumus und eine Verminderung der Bodenazidität im Mineralbodens in wässriger Lösung durch die Waldkalkung schließen. Auch ohne eine Waldkalkung ist die Bodenazidität geringer als zum Zeitpunkt der BZE I, allerdings weniger ausgeprägt.

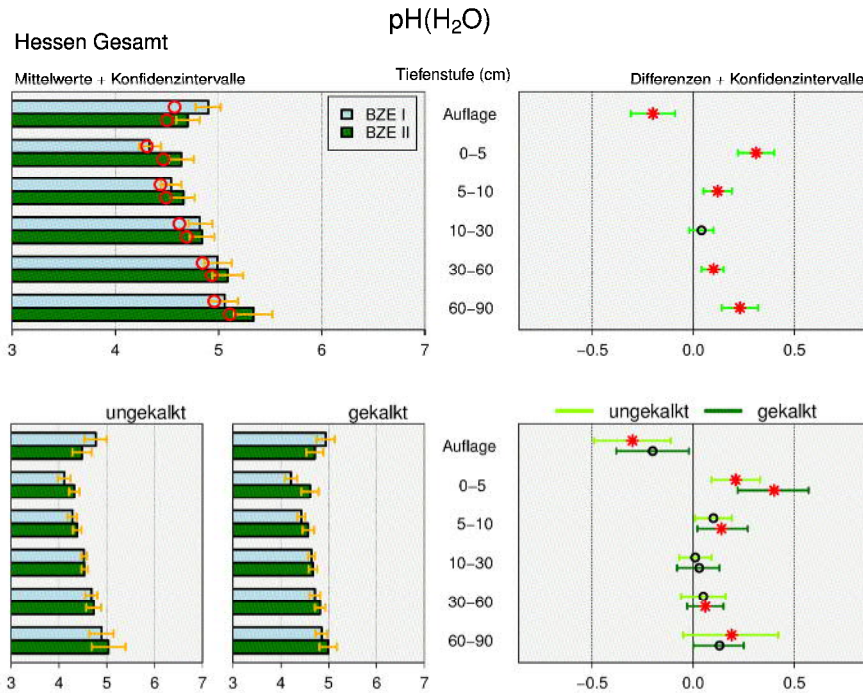


Abbildung 84: pH(H₂O)-Werte ($n = 139$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen (obere 2 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 2 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

Die pH(H₂O)-Werte der BZE II sind in Abbildung 85 nach Substratgruppe, Auflagehumus und Tiefenstufe dargestellt. Die pH-Werte sind nach Bodenschicht und Substrat sehr verschieden, auch innerhalb eines Bodenprofils. Dennoch zeigen sich typische Muster:

Die geringsten pH(H₂O)-Werte finden sich erwartungsgemäß in den Substratgruppen der basenarmen Silikatgesteine wie Quarzit, Buntsandstein und den Sanden. Die tonig ausgeprägte Fraktion des Buntsandsteins liegt im ähnlichen pH(H₂O)-Bereich wie die sandige Fraktion, nur in den Tiefenstufen 0-5 cm und 60-90 cm umfasst die tonige Fraktion ein weiteres pH(H₂O)-Spektrum. Auffällig ist ein BZE-

Punkt bei Darmstadt in der Substratgruppe schwach verlehmtter Sand mit sehr hohen $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten in allen Tiefenstufen, die auf Rheinweiß-Einlagerungen zurückzuführen sind.

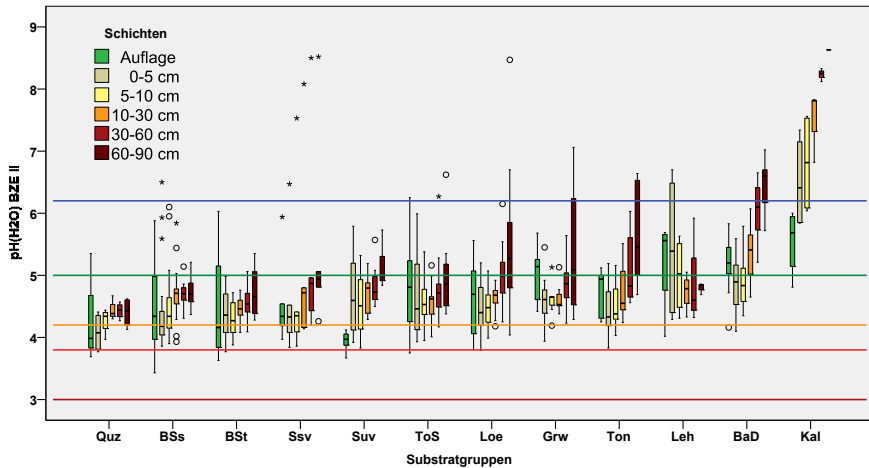


Abbildung 85: $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen für die BZE II in Hessen nach Substratgruppen und Pufferbereichen (farbige Linien); dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BSt: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzlit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer; Grenzwerte: s. Tab. 16, S. 123)

Etwas höhere $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte treten im Tonschiefer, den Lösslehmen, Grauwacken und Ton(stein)en sowie Lehmen auf. Die höchsten $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte mit deutlich über $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 5,0 finden sich bei den Basalt/Diabas-, Zechstein- und Kalk-Standorten.

Grundsätzlich steigen die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte mit zunehmender Bodentiefe in den unteren Tiefenstufen 10-30, 30-60 und 60-90 cm kontinuierlich an, ein deutliches Zeichen zunehmender Säureneutralisierungskapazität in tieferen Bodenschichten. Dennoch ist auffällig, dass über weite Spannen der forstlichen Standorte und Bodentiefen die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte sich im Austausch-Pufferbereich zwischen 4,2 und 5,0 befinden, einem relativ engen Wertebereich. 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 fast allen Tiefenstufen der Substratgruppen angestiegen (s. Abb. 86). Am deutlichsten und auch signifikant ist dies in den Substratgruppen Basalt/Diabas und Lösslehm in den Tiefenstufen ab 30 cm und in der Tiefenstufe 0-5 cm im Buntsandstein (gesamt). Ansonsten sind die Anstiege im Trend positiv, aber nur in Ausnahmen signifikant.

Im Quarzit und Tonschiefer nehmen die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte dagegen ab. Dies ist aber in keinem Fall signifikant.

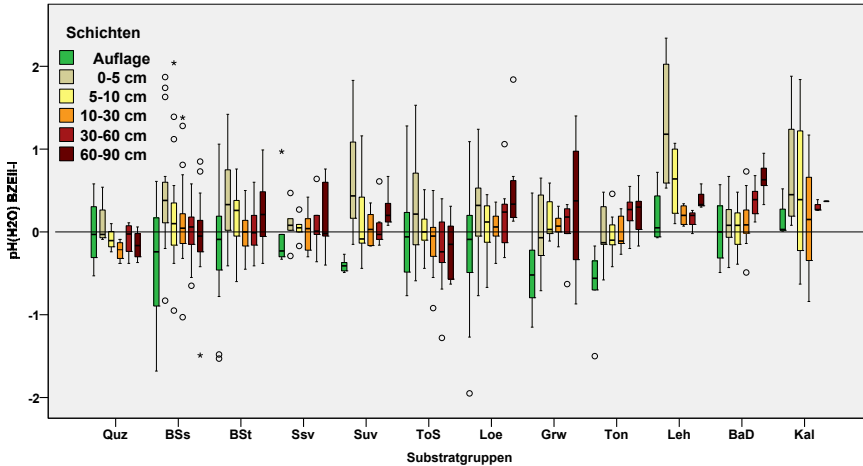


Abbildung 86: Differenzen (BZE II - BZE I) der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Auflagehumus und Mineralboden in Tiefenstufen in Hessen nach Substratgruppen, dargestellt sind nur Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BaD: Basalt/Diabas, Bss: Buntsandstein (sandig), Bst: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

Insgesamt nehmen in Hessen die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte im Auflagehumus dagegen signifikant ab. In den einzelnen Substratgruppen ist dies jedoch überwiegend nur als nicht signifikanter Trend zu erkennen. Ausnahmen sind die Substratgruppen unverlehmtter Sand, Ton(stein) und Buntsandstein (sandige Fraktion, Kollektiv gekalkt). Hier sind die Abnahmen im Unterschied zu den anderen Substratgruppen signifikant. Im Trend zugenommen haben die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in den Substratgruppen Kalk, Lehm und Zechstein, allerdings in keinem Fall signifikant.

Der Einfluss von kleinräumig, saisonal und standörtlich unterschiedlich wirkenden Faktoren auf die Höhe des $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -wertes und die damit verbundenen Schwankungen erschweren den Nachweis von signifikanten Veränderungen. Zusätzlich ist in den einzelnen Substratgruppen die Anzahl der BZE-Punkte relativ gering. Dies zeigen die weiten Spannen der Verteilungen sowohl bei den $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten nach Substratgruppen als auch bei den Veränderungen zur BZE I. Im Gegensatz dazu sind die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte stabiler.

Abbildung 87 zeigt die Zuordnung der Pufferbereiche (nach ULRICH 1981) in Prozent zu den einzelnen Tiefenstufen im Mineralboden getrennt für die BZE I und BZE II sowie für die Kollektive gekalkt und ungekalkt:

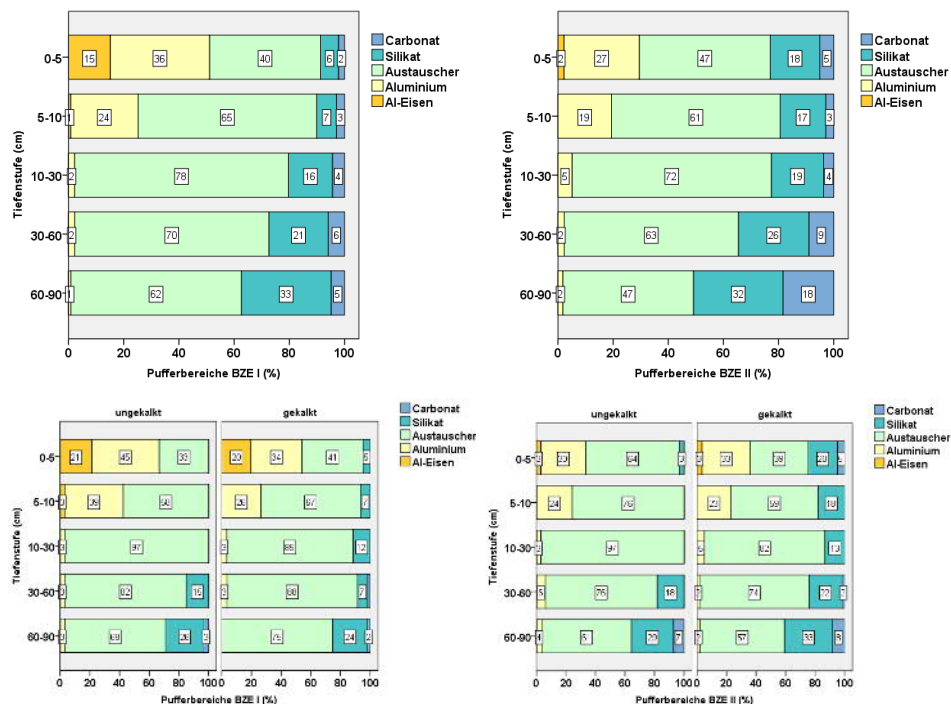


Abbildung 87: Mittlere Häufigkeiten der Pufferbereiche pH(H₂O) in Prozent (nach ULRICH 1981) in hessischen Waldböden für die BZE I (linke Spalte) und BZE II (rechte Spalte) nach Tiefenstufen [cm] und nach gekalkt/ungekalkt (untere 2 Grafiken)

Zum Zeitpunkt der BZE I befanden sich rund 50 % der oberen 5 cm des Mineralbodens aller BZE-Punkte in Hessen im Aluminium-Pufferbereich (pH(H₂O)) oder Aluminium-Eisen-Pufferbereich, in der Bodentiefe 5-10 cm waren es 25 %. Bei der BZE II sind die Anteile dieser Pufferbereiche deutlich zurückgegangen, in den oberen 5 cm des Mineralbodens waren noch knapp 30 %, in der Tiefenstufe 5-10 cm noch knapp 20 % aller Waldböden diesen Pufferbereichen zuzuordnen. Die Anteile im Aluminium-Eisen-Pufferbereich gingen zwischen beiden Erhebungen in der Tiefenstufe 0-5 cm von 15 auf 2 % zurück. Entsprechend nahmen die Anteile im Silikat-Pufferbereich bei der BZE II in diesen Tiefenstufen im Vergleich zur BZE I deutlich zu, von 6 auf 18 % in 0-5 cm und von 7 auf 17 % in der Tiefenstufe 5-10 cm. In den anschließenden Tiefenstufen 10-30 cm und 30-60 cm gab es von der BZE I zur BZE II nur leichte Verschiebungen zu den günstigeren Pufferbereichen. In der Tiefenstufe 60-90 cm liegt mit 18 % bei der BZE II ein deutlich höherer Anteil der BZE-Punkte im Carbonat-Pufferbereich, bei der BZE I fielen nur 5 % dieser Tiefenstufe in diesen Pufferbereich.

Im Hinblick auf die Verteilung der Pufferbereiche nach dem pH(H₂O)-Wert zeichnet sich demnach für Hessen eine deutliche Verbesserung des boden-

chemischen Zustandes ab. Die Anteile des ökologisch ungünstig zu beurteilenden Aluminium-Pufferbereiches haben im oberen Mineralboden zugunsten des Austauscher- und Silikat-Pufferbereiches abgenommen. Die höheren Anteile im Carbonat-Pufferbereich in der untersten Tiefenstufe der BZE II im Vergleich zur BZE I sind vor allem auf die signifikante Zunahme der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in den Substratgruppen Basalt/Diabas und Lösslehm zurückzuführen.

Die Verteilung der Pufferbereiche in den Tiefenstufen wird durch die Waldkalkung wesentlich beeinflusst. Im gekalkten Kollektiv zeigt sich sowohl bei der BZE I als auch bei der BZE II eine günstigere Verteilung der Pufferbereiche. Bei der BZE II haben die Anteile des Silikat-Pufferbereiches über $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 5,0 im gekalkten Kollektiv in allen Tiefenstufen höhere Anteile (s. Abb. 88, beispielhaft für die Tiefenstufe 0-5 cm). Zum Zeitpunkt der BZE I, wo bereits viele BZE-Punkte gekalkt waren, liegen in der Tiefenstufe 0-5 cm im gekalkten Kollektiv deutlich weniger BZE-Punkte im Aluminium- und Aluminium-Eisen-Pufferbereich als im ungekalkten Kollektiv. Auffällig sind die deutlich geringeren Anteile im Aluminium- und Aluminium-Eisen-Pufferbereich der oberen Tiefenstufe bei der BZE II im Vergleich zur BZE I sowohl im gekalkten als auch im ungekalkten Kollektiv. Dies kann mit deutlich verminderten atmosphärischen Säureeinträgen erklärt werden, was sich sowohl im gekalkten als auch dem ungekalkten Kollektiv mit höheren $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten im oberen Mineralboden widerspiegelt.

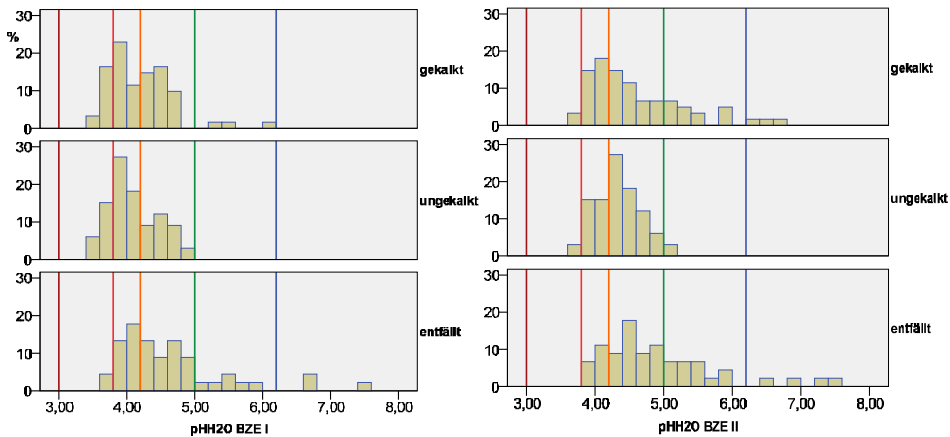


Abbildung 88: Prozentuale Verteilung der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte der BZE I (links) und BZE II (rechts) in Hessen in der Tiefenstufe 0-5 cm nach gekalkt, ungekalkt und entfällt (alle Punkte, die sich nicht in der Waldkalkungskulisse befinden); mit senkrechten Linien sind die Pufferbereiche (s. Tab. 16, S. 123) gekennzeichnet

Werden die Verteilungen der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in der Tiefenstufe 0-5 cm der BZE I und BZE II in den Kollektiven gekalkt, ungekalkt und den Punkten, die sich nicht

in der Waldkalkungskulisse befinden (Kollektiv entfällt, wie z. B. Kalke, Basalt/Diabas, Sande) verglichen, so sind die Anteile von $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten über 4,2 in allen Kollektiven bei der BZE II im Vergleich zur BZE I deutlich angestiegen (s. Abb. 88). Im Kollektiv gekalkt nähert sich die Verteilung im Histogramm dem Kollektiv entfällt an, die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte reichen bis pH 6,8. Im ungekalkten Kollektiv dagegen ist nur eine leichte Verschiebung zu höheren $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten um 0,2-0,4 pH -Einheiten festzustellen. Das Maximum verschob sich jedoch vom Aluminium- in den Austauscher-Pufferbereich. Damit zeigt sich, dass die Waldkalkung zu höheren $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten geführt hat. Dennoch ist immer noch ein erheblicher Teil der BZE-Punkte im ungünstigen Aluminium-Pufferbereich.

Ein ähnliches Bild wie in der Tiefenstufe 0-5 cm zeigt sich in den Tiefenstufen 5-10 cm und 10-30 cm mit abnehmenden Unterschied im Hinblick auf die Waldkalkung. In den Tiefen 30-60 cm und 60-90 cm kann der Einfluss der Waldkalkung am $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert nicht mehr festgestellt werden.

6.5.5.2 $\text{pH}(\text{KCl})$

Die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte liegen erwartungsgemäß deutlich niedriger als die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte. Im Gegensatz zu den $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten sind die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte in Hessen bei der BZE II im Vergleich zur BZE I deutlich geringer. Dies ist für den Auflagehumus und für alle Tiefenstufen signifikant (s. Abb. 89).

Die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte in der Auflage sind von durchschnittlich 4,4 bei der BZE I auf 4,1 bei der BZE II gesunken. Die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte in der Tiefenstufe 0-5 cm haben sich mit durchschnittlich 3,77 (BZE I) und 3,75 (BZE II) nur unwesentlich verringert, wobei der Unterschied signifikant ist. Mit zunehmender Bodentiefe steigen die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte kontinuierlich an, in der Tiefenstufe 60-90 cm bis auf durchschnittlich 4,2 bei der BZE II. Die signifikanten Abnahmen im Vergleich zur BZE I betragen in der Tiefenstufe 5-10 cm 0,2 pH -Stufen Einheiten, in den tieferen Schichten 0,3. Damit sind am Austauscher und der organischen Substanz bei der BZE II deutlich mehr Protonen gebunden als bei der BZE I.

Im Hinblick auf die Waldkalkung zeigt sich ein ähnliches Bild. Sowohl für das gekalkte als auch das ungekalkte Kollektiv verringerten sich die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte bei der BZE II im Auflagehumus und in jeder Tiefenstufe. Die einzige Ausnahme bildet die Tiefenstufe 0-5 cm im gekalkten Kollektiv, hier gab es im Trend eine durchschnittliche Zunahme der $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte. Im ungekalkten Kollektiv nahmen die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte dagegen signifikant um 0,13 ab. Auch ist die Verringerung der $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte in der Auflage im gekalkten Kollektiv geringer als im ungekalkten Kollektiv. Dieses und die (nicht signifikante) Zunahme der $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte in der Tiefenstufe 0-5 cm kann als leicht positiver Kalkungseinfluss auf die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte gedeutet werden, in den anderen Tiefenstufen bestehen keine relevanten Unterschiede.

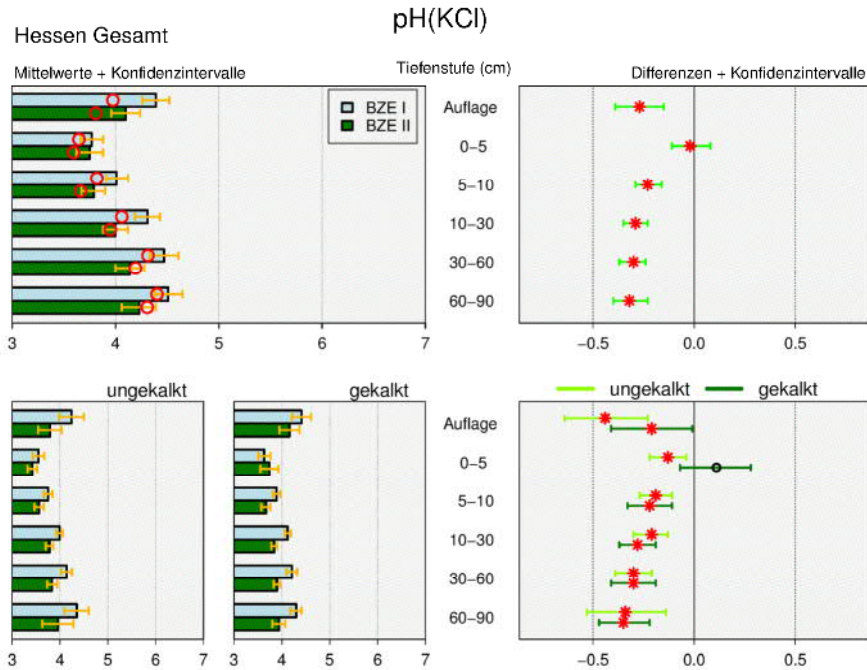


Abbildung 89: $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte ($n = 139$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Tiefenstufen (obere 2 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 2 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

Die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte nach Substratgruppe sind in Abbildung 90 für den Auflagehumus und die Tiefenstufen dargestellt. Auffällig sind die sehr ähnlichen Werte über eine weite standörtliche Amplitude: Vom Quarzit bis zum Ton(stein) liegen die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte im Mineralboden überwiegend unter 4,2. Höhere $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte finden sich in den Substratgruppen Basalt/Diabas, Zechstein und Kalk, teilweise auch hier erst ab 30 cm Bodentiefe. Vereinzelt liegen auch tiefere Schichten anderer Substratgruppen zwischen 4,2 und 5, so z. B. bei den unverlehmten Sanden und Grauwacken. Wie bereits bei den $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werten steigt im Allgemeinen auch der $\text{pH}(\text{KCl})$ -Wert mit zunehmender Bodentiefe an, allerdings nicht so stark und mit weniger Streuung. Die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte im Auflagehumus sind im Median deutlich höher als im Mineralboden.

Bei den $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werten der BZE II zeigt sich noch deutlicher als beim $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wert eine Nivellierung des bodenchemischen Zustandes sowohl bezüglich der unterschiedlichen Standorte als auch unterschiedlicher Tiefenstufen. Nur wenige, in der Regel gut versorgte Standorte mit hoher Austauschkapazität und Basensättigung, weisen $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte über 4,2 im Mineralboden auf.

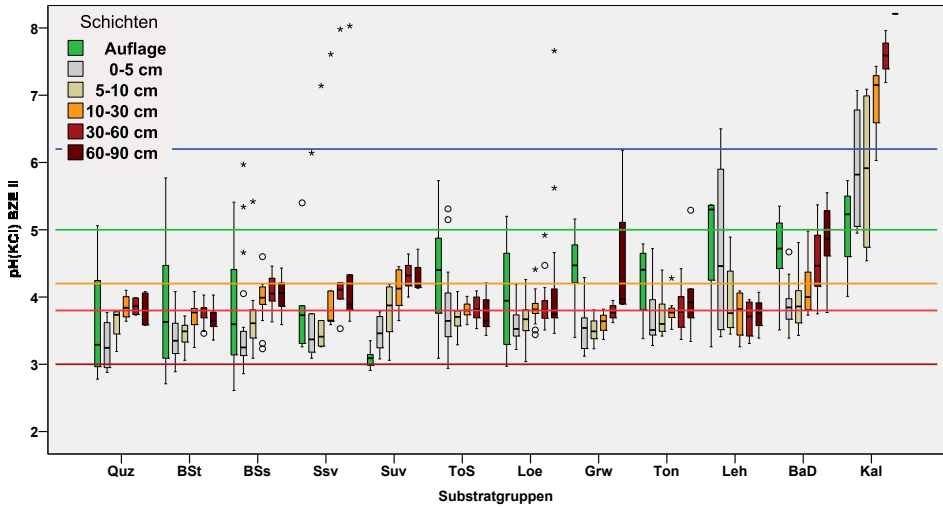


Abbildung 90: $pH(KCl)$ -Werte im Auflagehumus und im Mineralboden in Tiefenstufen für die BZE II in Hessen nach Substratgruppen u. Pufferbereichen (farbige Linien, s. Tab. 16, S. 123); Darstellung nur für Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten

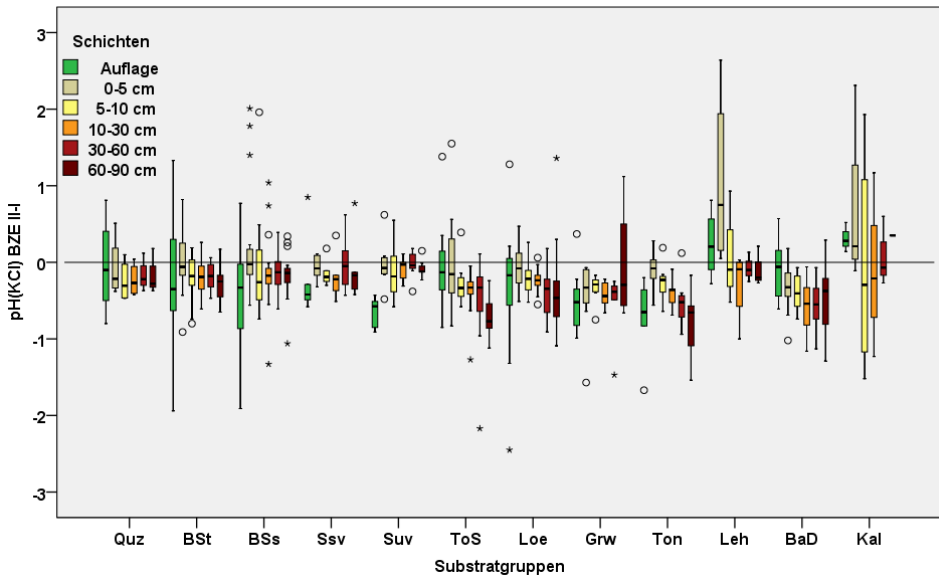


Abbildung 91: Differenzen (BZE II - BZE I) der $pH(KCl)$ -Werte im Auflagehumus und im Mineralboden in Tiefenstufen in Hessen nach Substratgruppen, Darstellung nur für Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BaD: Basalt/Diabas, BSt: Buntsandstein (sandig), BSt: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzlit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

Die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte der BZE II sind im Vergleich zur BZE I in fast allen Substratgruppen und Tiefenstufen niedriger. Besonders deutlich ist dies für die tieferen Bodenschichten des Tonschiefers (z. B. -0,7 in 60-90 cm), der Lösslehme (-0,63 in 60-90 cm) und des Ton(stein)s (0,81 in 60-90 cm). Die Unterschiede zur BZE I sind in den meisten Fällen auch signifikant. Damit hat sich die Nivellierung hinsichtlich der Azidität zwischen den beiden Bodenzustandserhebungen weiter fortgesetzt. Nur bei den Lehmen und Kalken liegen die Mediane der Differenzen zur BZE I über Null, diese Differenzen sind jedoch nicht signifikant (s. Abb. 91).

Die in den meisten Bodenschichten über viele Standorte hinweg ansteigenden $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte können als Reaktion auf die deutlich verringerte Säurebelastung über atmogene Säureeinträge mit der Deposition interpretiert werden. Dennoch ist die aktuelle Säurebelastung noch so hoch, dass der Austauscher über ablaufende Pufferreaktionen weiter protoniert wird. Dies belegen die ebenfalls über eine weite Standortsamplitude und Bodenschichten festgestellten niedrigeren $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte. Dies ist beispielhaft in der Abbildung 92 für die Substratgruppen Basalt/Diabas und Buntsandstein für die Tiefenstufen dargestellt.

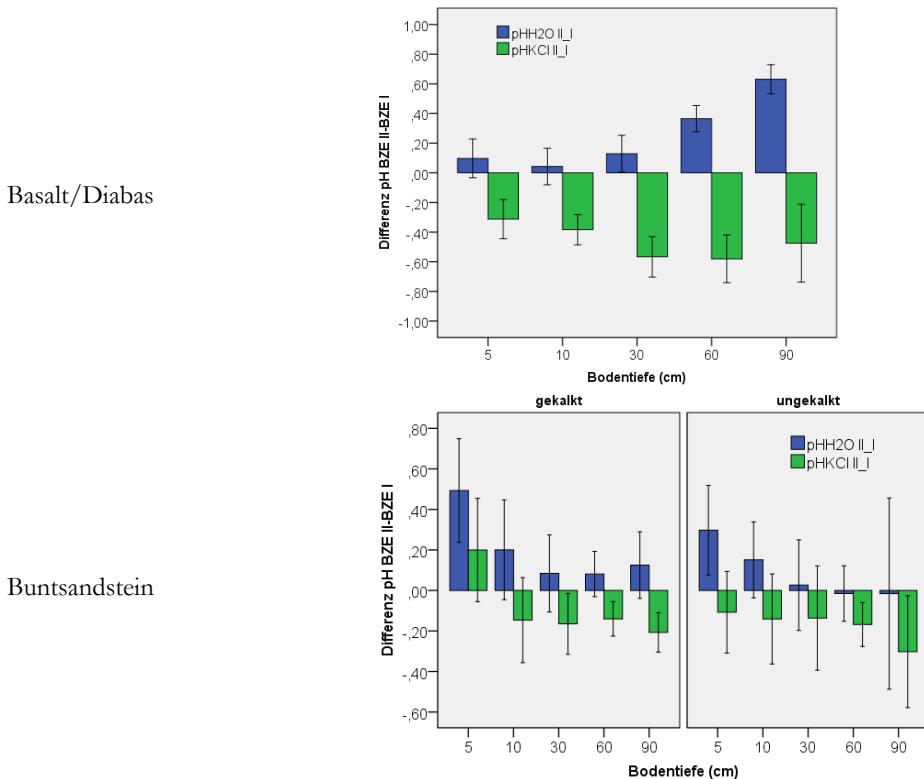


Abbildung 92: Differenzen der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ - und $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte der BZE II zur BZE I nach Tiefenstufen der Substratgruppen Basalt/Diabas ($n = 20$) und Buntsandstein (gekalkt ($n = 27$) und ungekalkt ($n = 11$)) in Hessen

In der Substratgruppe Basalt/Diabas steigen die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte von der BZE I zur BZE II mit zunehmender Bodentiefe deutlich an, die $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte verringern sich jedoch in jeder Bodentiefe bis 60-90 cm. Da die pH -Werte grundsätzlich mit zunehmender Bodentiefe steigen, sind die Veränderungen bei gleicher Säurefracht aufgrund der logarithmischen Skalierung in den unteren Tiefenstufen höher.

Die Böden der Substratgruppe Buntsandstein sind deutlich saurer als die der Substratgruppe Basalt, auch hier zeigt sich überwiegend ein Anstieg der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ - und ein Absinken der $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte von der BZE I zur BZE II. Der Effekt der Waldkalkung ist im gekalkten Kollektiv in der Tiefenstufe 0-5 cm gut zu erkennen, die $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ - und $\text{pH}(\text{KCl})$ -Werte sind beide bei der BZE II höher (s. Abb. 92).

Die Anlagerung von Sulfat an Tonmineralen und Oxiden sowie die Bildung von Aluminium-Hydroxo-Sulfaten sind Pufferreaktionen im Boden, die Sulfat aus der Bodenlösung binden und somit die Sulfatfracht im Sickerwasser unter Protonenverbrauch mindern. Diese Reaktion findet überwiegend im Austauscher-Pufferbereich statt, in dem sich die meisten Bodenschichten in Hessen befinden (MEIWES et al. 1980, KHANNA et al. 1987, ALEWELL 1995, PRIETZEL u. KÖLLING 1999). Diese Reaktionen führen zu teilweise erheblichen Schwefelakkumulationen in Böden, wenn die Schwefeldeposition und damit die Sulfatfracht im Sickerwasser langanhaltend hoch sind. Bei verminderter Sulfatfracht und in der Folge ansteigenden pH -Werten ist diese Reaktion teilweise reversibel. Sulfat und Protonen gelangen in das Bodenwasser, Sulfat wird mit dem Sickerwasser verlagert, Protonen gelangen über Pufferreaktionen an den Austauscher. Dies erklärt auch, warum die Sulfatfrachten im Sickerwasser trotz zurückgehender Schwefeleinträge weiterhin auf hohem Niveau bleiben. Entsprechend werden Kationen wie Calcium, Magnesium und Kalium mit ausgewaschen. Vor allem Sulfat kann dabei vor Nitrat den Nährstoffaustrag steuern und ist daher als Altlast des „sauren Regens“ anzusehen (LÜKEWILLE 1995, NAGEL et al. 2014).

Da die atmosphären Schwefeleinträge und damit die Säurebelastung der Böden großflächig abgenommen haben, sind höhere $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte bei der BZE II im Vergleich zur BZE I im wässrigen Bodenextrakt plausibel. Die damit einhergehende Auflösung von Aluminium-Hydroxo-Sulfaten bzw. die Ablösung von adsorbiertem Sulfat am Austauscher, die damit verbundene Protonenproduktion und eine Bindung am Austauscher könnte eine mögliche Erklärung dafür sein, dass sich im $\text{pH}(\text{KCl})$ -Wert geringere Werte bei der BZE II einstellen.

Dafür spricht, dass sich der überwiegende Teil der untersuchten Bodenschichten zum Zeitpunkt der BZE I in dem pH -Bereich befand, in dem die Sulfatfestlegung hoch ist, nämlich dem Austauscher-Pufferbereich (LÜKEWILLE 1995). Die Sulfatfestlegung hat ihr Maximum in einer sauren Braunerde bei $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 4. Bei einer Verringerung des Sulfatgehaltes in der Bodenlösung wird Sulfat wieder gelöst (MEIWES et al. 1980).

6.5.6 Kohlenstoff

Kohlenstoff 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 carbonatischer 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 in der Regel hoch, der Boden ist dort aber auch relativ locker, in den unteren Bodenschichten ist es umgekehrt. Im Schnitt enthält daher das obere Drittel des Mineralbodens ungefähr zwei Drittel des Kohlenstoffvorrates des gesamten BZE-Profiles bis 90 cm Bodentiefe. Die höchsten Kohlenstoffvorräte enthalten Moorböden (über 500 t/ha), die aber in Hessen nicht im BZE-Kollektiv vorkommen. Die im Auflagehumus gespeicherten Kohlenstoffvorräte sind ebenfalls sehr variabel und hängen stark von der jeweiligen Baumartenzusammensetzung und den Zersetzungsbedingungen ab. Der Auflagehumus hat durchschnittlich einen Anteil zwischen 15 und 20 % an den Gesamtkohlenstoffvorräten (Mineralboden bis 90 cm und Auflagehumus). In Abbildung 93 sind die durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte für alle Waldböden in Hessen nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Gesamtprofil bis 90 cm Bodentiefe dargestellt.

Die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus und in den Waldböden Hessens liegen mit durchschnittlich gut 80 t/ha zum Zeitpunkt der BZE II im geringen Bewertungsbereich. Dabei hat der Auflagehumus mit 14 t/ha einen Anteil von 17 %. Im Vergleich zu den Bundesländern Niedersachsen und Sachsen-Anhalt sind die Kohlenstoffvorräte in Hessen geringer, was auf insgesamt geringere Feinboden-vorräte zurückzuführen ist. Die Kohlenstoffvorräte reichen von 30 t/ha bei einem flachgründigen Ranker bis knapp 200 t/ha bei einem stark verbraunten, unverlehmten Sand mit relativ hohen Kohlenstoffkonzentrationen bis 60 cm (s. Abb. 95).

Bei der BZE II sind in den oberen 30 cm des Mineralbodens mit 54 t/ha Kohlenstoffvorrat 63 % des gesamten Kohlenstoffs bis 90 cm Bodentiefe gespeichert, in der Tiefenstufe 30-60 cm sind es mit 12 t/ha 14 % und zwischen 60-90 cm mit 5 t/ha 6 %. Dies liegt an den stark abfallenden Kohlenstoffkonzentrationen und den zunehmenden Skelettgehalten mit zunehmender Bodentiefe. Bei der BZE I war die Verteilung sehr ähnlich, hier waren jedoch die Anteile des Auflagehumus mit 21 % (17 t/ha) um 5 Prozentpunkte höher und die Anteile des oberen Mineralbodens bis 30 cm mit 56 % (45 t/ha) um 8 Prozentpunkte geringer. Die Anteile der Kohlenstoffvorräte bis 90 cm Bodentiefe in den unteren Tiefenstufen 30-60 und 60-90 cm waren bei der BZE I mit 16 und 7 % mit denen der BZE II

vergleichbar (s. Abb. 93, Teilgrafik a). An dieser Verteilung zeigt sich, dass sich von der BZE I zur BZE II die Kohlenstoffvorräte bei einer moderaten Zunahme insgesamt vom Auflagehumus in den oberen Mineralboden verlagert haben. Unterhalb von 30 cm Bodentiefe gab es keine gerichteten Veränderungen.

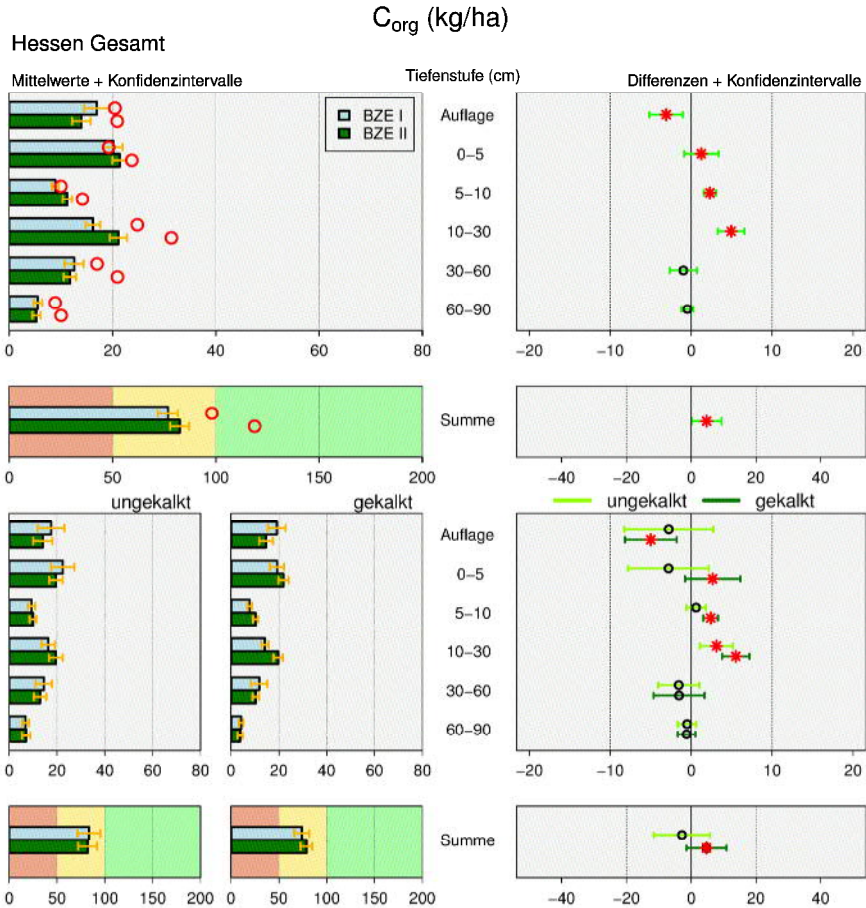


Abbildung 93: Kohlenstoffvorräte [kg/ha] (n = 139) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

Im Vergleich zur BZE I erhöhten sich die durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte in den Waldböden Hessens bis 90 cm Bodentiefe um 4,76 t/ha (6 %), was einer jährlichen Speicherrate von rund 300 kg/ha entspricht. Diese Zunahme ist auf Profil-

ebene signifikant (s. Abb. 93, Teilgrafik d). Die Profilebene ergibt sich aus der Summe der Veränderungen des jeweiligen Auflagehumus und den einzelnen Tiefenstufen. Dabei hat im Gegensatz zur Profilsomme der Kohlenstoffvorrat im Auflagehumus sogar um 3 t/ha (-18 %) signifikant für Hessen abgenommen. Dies wird aber deutlich kompensiert durch die signifikanten Zunahmen in der Tiefenstufe 0-5 cm mit 1,25 t/ha (+6 %), 2,32 t/ha in 5-10 cm (+26 %) und 4,94 t/ha (+30 %) in 10-30 cm Bodentiefe im Mineralboden (s. Abb. 93, Teilgrafik b). Eine detailliertere Darstellung der Kohlenstoffvorräte in Hessens Waldböden findet sich in EVERS et al. 2011.

Ein deutlicher Anstieg der Kohlenstoffvorräte im Boden wurde im Rahmen der BZE-Auswertungen auch für Mecklenburg Vorpommern nachgewiesen, wobei hier der C-Vorrat in der Auflage konstant geblieben ist (RUSS et al. 2011). Die Bodenzustandserhebungen in Rheinland-Pfalz belegen eine Abnahme der Kohlenstoffgehalte in der Humusaufgabe bei einer Kohlenstoffzunahme in den obersten Mineralbodentiefen. Allerdings wurden hier keine signifikanten Abweichungen im Wurzelraum für Kohlenstoff festgestellt.

Sowohl im ungekalkten als auch im gekalkten Kollektiv verringerten sich in Hessen die Kohlenstoffvorräte in der Auflage. Während sich im oberen Mineralboden bis 30 cm die Kohlenstoffvorräte im ungekalkten Kollektiv in 0-5 cm tendenziell verringerten, in 5-10 cm nahezu gleichblieben und sich nur in der Tiefe 10-30 cm signifikant erhöhten, sind für das gekalkte Kollektiv für alle 3 Tiefenstufen signifikante Kohlenstoffanreicherungen festzustellen. Unterhalb von 30 cm gab es keine Unterschiede zwischen dem gekalkten und ungekalkten Kollektiv. In beiden Kollektiven kam es zu nicht signifikanten, leichten Abnahmen um 10 % bezogen auf die BZE I (s. Abb. 93, Teilgrafik g). Bezogen auf das Gesamtprofil kam es damit im ungekalkten Kollektiv zu einer nicht signifikanten Abnahme von 86,5 t/ha bei der BZE I auf 83,6 t/ha bei der BZE II (-2,9 t/ha, -3,3 %) und einer signifikanten Zunahme im gekalkten Kollektiv in Höhe von 4,7 t/ha (+6,6 %) von 72 auf 76,7 t/ha Kohlenstoff (s. Abb. 93, Teilgrafik j).

Damit zeigt sich, dass die Waldkalkung hinsichtlich der Kohlenstoffspeicherung ein wichtiger Faktor ist. Zwar wird offenbar durch die Waldkalkung der Humusabbau deutlich angeregt, insgesamt werden jedoch diese Kohlenstoffverluste über Anreicherungen im oberen Mineralboden mehr als kompensiert. Auch im ungekalkten Kollektiv kommt es tendenziell zu einem Abbau des Auflagehumus und zusätzlich zu Verlusten von Kohlenstoff in der Tiefenstufe 0-5 cm, die in Verbindung mit den geringeren Kohlenstoffzunahmen im Vergleich zum gekalkten Kollektiv in 5-30 cm auf Profilebene zu insgesamt geringeren Kohlenstoffvorräten bei der BZE II führen. Da aber diese Veränderungen relativ gering und nicht signifikant sind, können im ungekalkten Kollektiv die Kohlenstoffvorräte insgesamt als relativ stabil angesehen werden.

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 ungefähr 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 pro Jahr und Hektar 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 über 80 t/ha in Hessens Waldböden zeugen von dieser langfristigen Nettospeicherung. Dabei wird es immer wieder auch Phasen von Kohlenstoffverlusten gegeben haben, z. B. durch intensive Holz- und Streunutzung, Waldbrand oder -rodung. Auf Profilebene bis 90 cm Bodentiefe sind Änderungen der Kohlenstoffvorräte nur schwer zu belegen. Die nicht signifikante, rechnerische Abnahme von knapp 3 t Kohlenstoff je ha im ungekalkten Kollektiv (entspricht einer jährlichen Abnahme von knapp 200 kg Kohlenstoff) zeigt dies beispielhaft.

Werden jedoch die einzelnen Tiefenstufen und der Auflagehumus für sich betrachtet, ergeben sich auffällige Muster, die auf eine relativ hohe Kohlenstoffdynamik zwischen der BZE I und BZE II (15 Jahre) schließen lassen. Dies wird in Abbildung 93 bereits an der signifikanten Abnahme von Kohlenstoff im Auflagehumus und der Zunahme im oberen Mineralboden deutlich. Auf Gesamtprofilebene können sich diese gegensätzlichen Tendenzen teilweise ausgleichen.

In Abbildung 94 sind die Veränderungen der Kohlenstoffvorräte im Hinblick auf die Waldkalkung und die nicht zur Waldkalkung vorgesehenen Standorte (Kollektiv entfällt) dargestellt. Die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus verringerten sich im gekalkten Kollektiv um 5 t/ha (von 19 auf 14 t/ha), dies entspricht einem Rückgang um rund 25 %. Im Gegensatz dazu nahmen die Kohlenstoffvorräte im oberen Mineralboden bis 30 cm um rund 10,5 t/ha zu (von 41 auf 51,5 t/ha). Dies entspricht ebenfalls ungefähr 25 %. Trotz der nicht signifikanten Abnahmen in den Tiefenstufen 30-60 und 60-90 cm haben im gekalkten Kollektiv die Kohlenstoffvorräte zugenommen. Im ungekalkten Kollektiv kam es zu keinen signifikanten Veränderungen. Im Kollektiv der grundsätzlich nicht für eine Kalkung vorgesehenen BZE-Punkte haben die Kohlenstoffvorräte im oberen Mineralboden (0-30 cm) mit rund 11 t/ha deutlich zugenommen. Dies entspricht einer signifikanten Zunahme von 23 %. In den anderen Tiefenstufen sowie im Auflagehumus traten kaum Veränderungen auf.

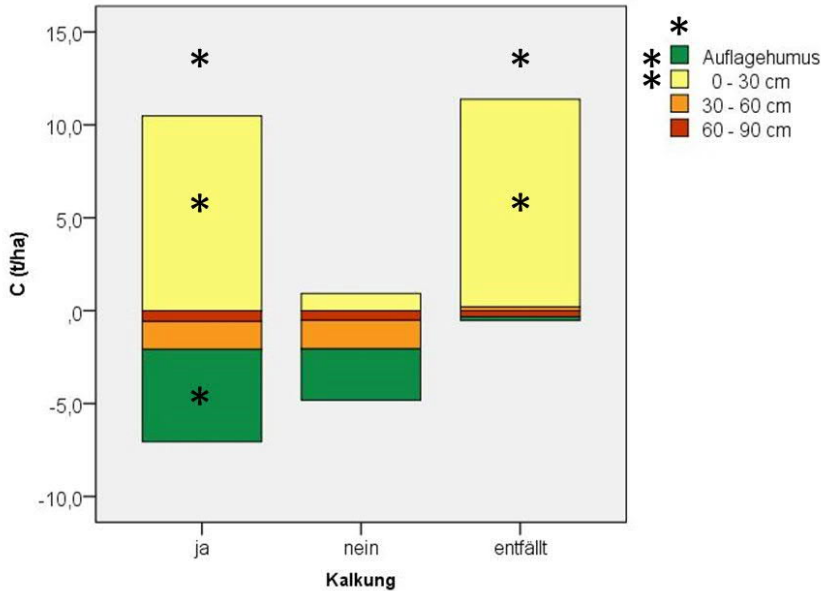


Abbildung 94: Änderungen der Kohlenstoffvorräte [t/ha] (BZE II - BZE I) im Auflagehumus und Mineralboden für gekalkte (ja) und ungekalkte (nein) BZE-Punkte sowie nicht zur Kalkungskulisse gehörende BZE-Punkte (entfällt) in Hessen, (* signifikant auf dem 0.05 % Niveau, Wilcoxon; für die jeweiligen Tiefenstufen (in den Balken), für das jeweilige Kollektiv (oberhalb der Balken), über die Kollektive hinweg in der jeweiligen Tiefenstufe (links der Legende) und über alle Profile hinweg (oberhalb der Legende))

6.5.6.1 Kohlenstoffvorräte nach Substratgruppen

Wird die Verteilung der Kohlenstoffvorräte in den Substratgruppen betrachtet, ergibt sich folgendes Bild (s. Abb. 95).

Die Verteilung der Kohlenstoffvorräte liegt bei fast allen Substratgruppen im geringen Bewertungsbereich zwischen 50 und 100 t C/ha. Die höchsten Kohlenstoffvorräte um 100 t C/ha finden sich bei den unverlehmten Sanden, den Kalken und den Quarziten, die geringsten beim verlehmtten Sand und dem Granit (jeweils nur 1 Profil) mit Werten um 60 t C/ha. Mit Kohlenstoffvorräten um 70 t C/ha liegen die Lehme, Grauwacken und Tonschiefer etwas höher. Beim Ton, Zechstein, Buntsandstein, Basalt/Diabas, schwach verlehmttem Sand und Lösslehm streuen die Kohlenstoffvorräte um 80 t C/ha. Von einzelnen Profilen abgesehen ist die Streuung der Kohlenstoffvorräte auf Profilebene bei weitem geringer als bei den Hauptnährstoffen Calcium, Magnesium und Kalium.

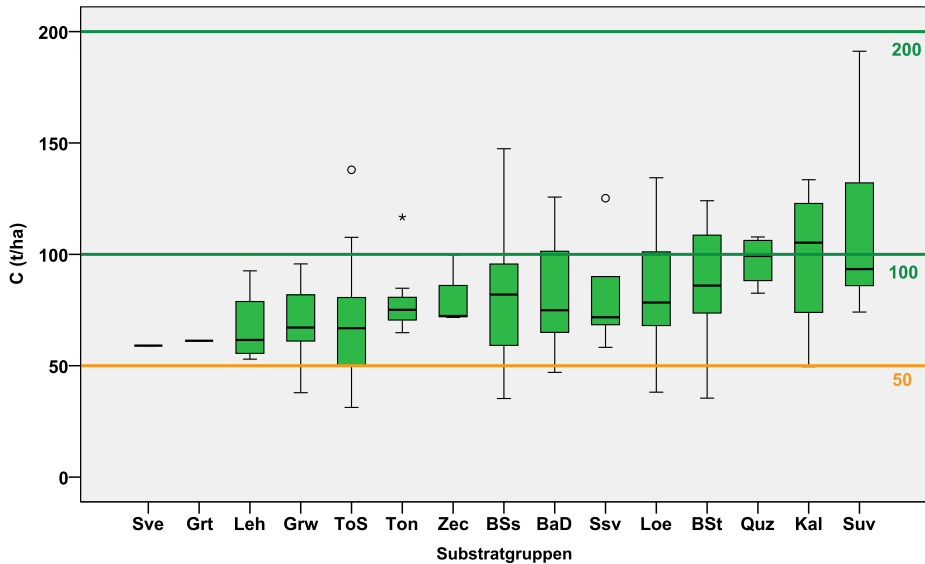


Abbildung 95: Verteilungen der Kohlenstoffvorräte [t/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in bessi-schen Waldböden als Summe Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BST: Buntsandstein (tonig), Grw: Grau-wacke, Grt: Granit, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer, Zec: Zechstein; farbige Linien: s. Tab. 16, S. 123)

Im Auflagehumus weisen die BZE-Punkte in den Substratgruppen Basalt/Diabas und Lehm mit Vorräten um 7,5 t C je ha die geringsten Kohlenstoffvorräte auf (s. Abb. 96). Es folgen die BZE-Punkte in der Substratgruppe Grau-wacke mit rund 10 t C je ha und die BZE-Punkte der Substratgruppen Tonschiefer, Ton(stein), Lösslehm, Kalk und schwach verlehmtter Sand mit Werten zwischen 12-14 t C je ha. Noch höhere Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus mit Werten zwischen 17-18 t C je ha weisen die BZE-Punkte in der Substratgruppe Buntsandstein (sowohl sandige als auch tonige Fraktion) auf. Die höchsten Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus finden sich bei den ärmsten Standorten Quarzit und unverlehmte Sande mit Werten zwischen 21-24 t C je ha. Die jeweiligen Streuungen innerhalb der Substratgruppen sind beträchtlich, dennoch sind die Muster typisch: je reicher die Standorte, desto besser die Humusform und desto geringer die Kohlenstoffvorräte.

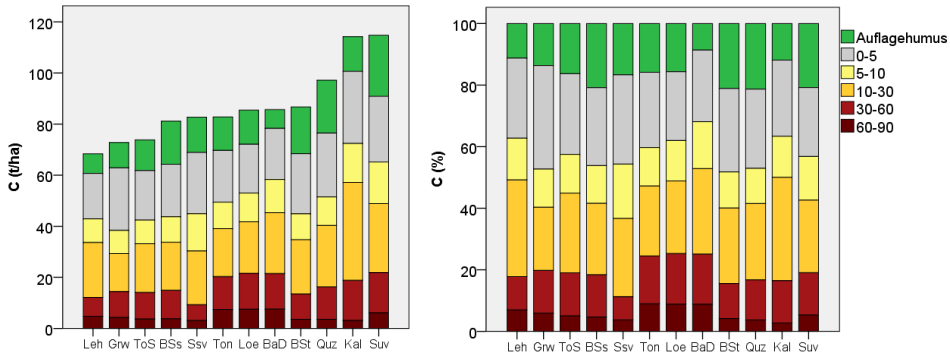


Abbildung 96: Kohlenstoffvorräte bei der BZE II nach Substratgruppen, unterteilt nach Auflagehumus und Tiefenstufen, links absolute Werte [t/ha], rechts in Prozent (Darstellung nur für Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten) (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BST: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

In diesem Zusammenhang spielt der aufstockende Bestand eine Rolle. Je höher der Nadelholzanteil, desto höher sind die Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus. Dies wird in der Abbildung 97 ersichtlich. Die geringsten Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus fanden sich bei den Laubholzbeständen Eiche (6,4 t/ha), Buche (8,6 t/ha) und sonstigem Laubholz (7,5 t/ha), die höchsten Vorräte unter Kiefer (17,8 t/ha), sonstigem Nadelholz (19,5 t/ha) und Fichte (22 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.

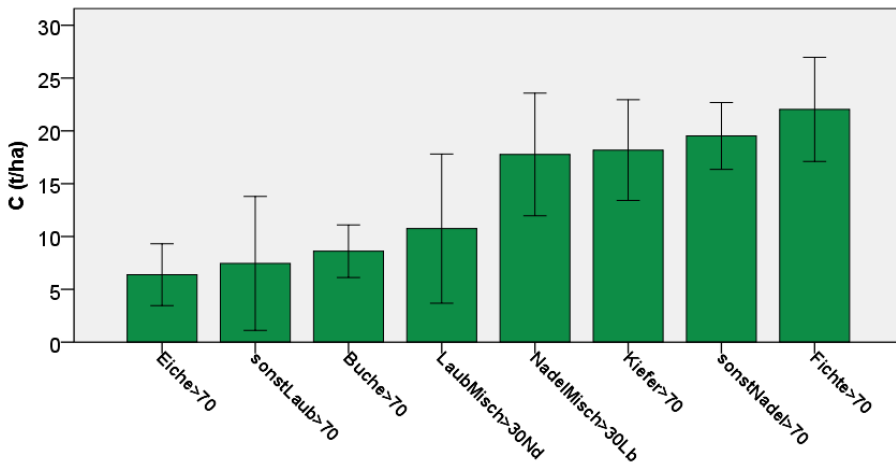


Abbildung 97: Kohlenstoffvorräte [t/ha] im Auflagehumus in Abhängigkeit von der Bestandeszusammensetzung (>70 = Bestandesanteil größer als 70%; Nd = Nadelholz; Lb = Laubholz)

Werden die unterschiedlichen Kohlenstoffvorräte im Mineralboden nach Substratgruppen verglichen (s. Abb. 96), so treten zwar Unterschiede zwischen den Substratgruppen auf, diese sind aber deutlich geringer als im Auflagehumus. Die geringsten Kohlenstoffvorräte im Mineralboden mit Werten zwischen 58 und 64 t/ha bis 90 cm Bodentiefe haben die Substratgruppen Lehm, Grauwacke, Tonschiefer und Buntsandstein (sandige Ausprägung), im mittleren Bereich mit Werten zwischen 68 und 73 t/ha liegen die Substratgruppen Buntsandstein (tonige Ausprägung), Ton(stein), schwach verlehmtter Sand und Lösslehm und im höheren Bereich dann die Substratgruppen Basalt/Diabas und Quarzit mit Werten um 76 t/ha. Die Kalke haben mit rund 85 t/ha und die unverlehmtten Sande mit 90 t/ha die höchsten Kohlenstoffvorräte. Da die Kohlenstoffvorräte neben der Gründigkeit des Profils von der Kohlenstoffkonzentration, der Trockenrohddichte des Feinbodens und des Skelettgehaltes in den jeweiligen Schichten abhängen, sind die Unterschiede in den Substratgruppen von der Ausprägung dieser Größen bestimmt. So hat der Kalk zwar sehr hohe Skelettgehalte, doch ist seine Kohlenstoffkonzentration relativ hoch. Bei den unverlehmtten Sanden sind die Skelettgehalte gering, dafür sind die Trockenrohddichten deutlich höher als bei den Kalken und damit die Kohlenstoffvorräte zwischen den Kalken und unverlehmtten Sanden recht ähnlich.

Für die einzelnen Substratgruppen ist die prozentuale Verteilung der Kohlenstoffvorräte auf den Auflagehumus und die Tiefenstufen relativ ähnlich (s. Abb. 96). So entfallen auf die Tiefenstufe 0-5 cm zwischen 22 % (Lösslehm) und 34 % (Grauwacke) der Kohlenstoffvorräte, auf die Tiefenstufe 5-10 cm 11 % (Quarzit) bis 18 % (schwach verlehmtter Sand) und auf die Tiefenstufe 10-30 cm 20 % (Grauwacke) bis 34 % (Kalk). Die Anteile der Tiefenstufen 30-60 cm und 60-90 cm liegen zwischen 12 % (schwach verlehmtter Sand) und 25 % (Ton(stein), Lösslehm und Basalt/Diabas).

Die Veränderungen der Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus und Mineralboden nach Substratgruppen ergeben folgendes Bild: In den meisten Substratgruppen ist ein Rückgang der Kohlenstoffvorräte im Auflagehumus und die Zunahme im oberen Mineralboden bis 30 cm erkennbar (s. Abb. 98). Die Kohlenstoffvorratsänderungen in den Tiefenstufen 30-60 cm und 60-90 cm sind nur geringfügig. Signifikante Veränderungen sind eher die Ausnahme. In den Substratgruppen mit relativ vielen BZE-Punkten (z. B. Buntsandstein, Tonschiefer, Lösslehm) gibt es vereinzelt signifikante Unterschiede in einzelnen Bodenschichten. Nur in der Substratgruppe Grauwacke sind auch auf Ebene der Substratgruppe die Kohlenstoffvorratszunahmen signifikant.

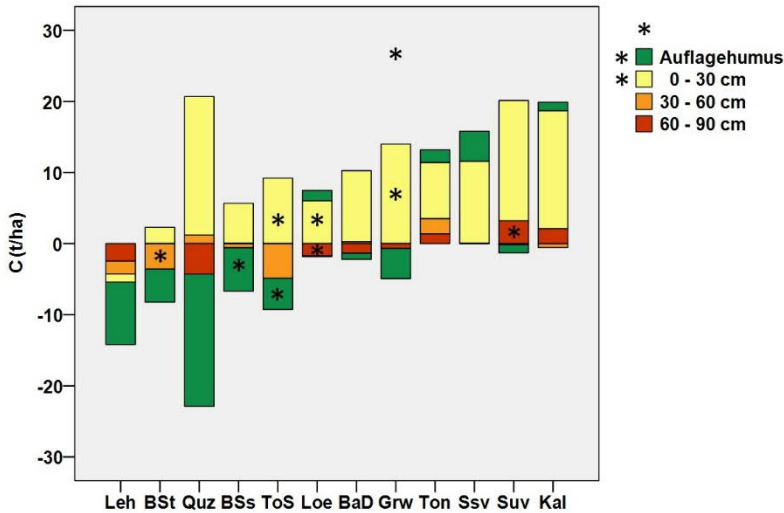


Abbildung 98: Veränderungen der Kohlenstoffvorräte [t/ha] zwischen der BZE I und BZE II nach Substratgruppen und Tiefenstufen (* signifikant auf dem 0.05 % Niveau, Wilcoxon; für die jeweiligen Tiefenstufen (in den Balken), für das jeweilige Kollektiv (oberhalb der Balken), über die Kollektive hinweg in der jeweiligen Tiefenstufe (links der Legende) und über alle Profile hinweg (oberhalb der Legende)), Darstellung nur für Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BST: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzlit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

6.5.7 Stickstoff

Stickstoff (N) als einer der wichtigen Makronährstoffe ist von Natur aus in Wald-ökosystemen mit wenigen Ausnahmen nur in geringen Mengen vorhanden und damit zumeist wachstumslimitierend. Stickstoff kommt kaum in Gesteinen vor, reichert sich aber im Laufe der Zeit über 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. Im Zuge der relativ hohen atmosphärischen 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 mittlerweile je nach Standort und Region zu Austrägen mit dem

Sickerwasser in das Grundwasser oder zu gasförmigen Verlusten kommen. Der Eintrag von Ammonium-Stickstoff hat versauernde Wirkung, der Nitrataustrag belastet das Grundwasser und führt zudem zu einem Verlust an basischen Kationen. Überhöhte Stickstoffeinträge haben ebenfalls bereits zu einer Verschiebung der Artenzusammensetzung in der Waldbodenvegetation geführt.

In Abbildung 99 sind die durchschnittlichen Stickstoffvorräte für alle Waldböden in Hessen nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Gesamtprofil bis 90 cm Bodentiefe dargestellt:

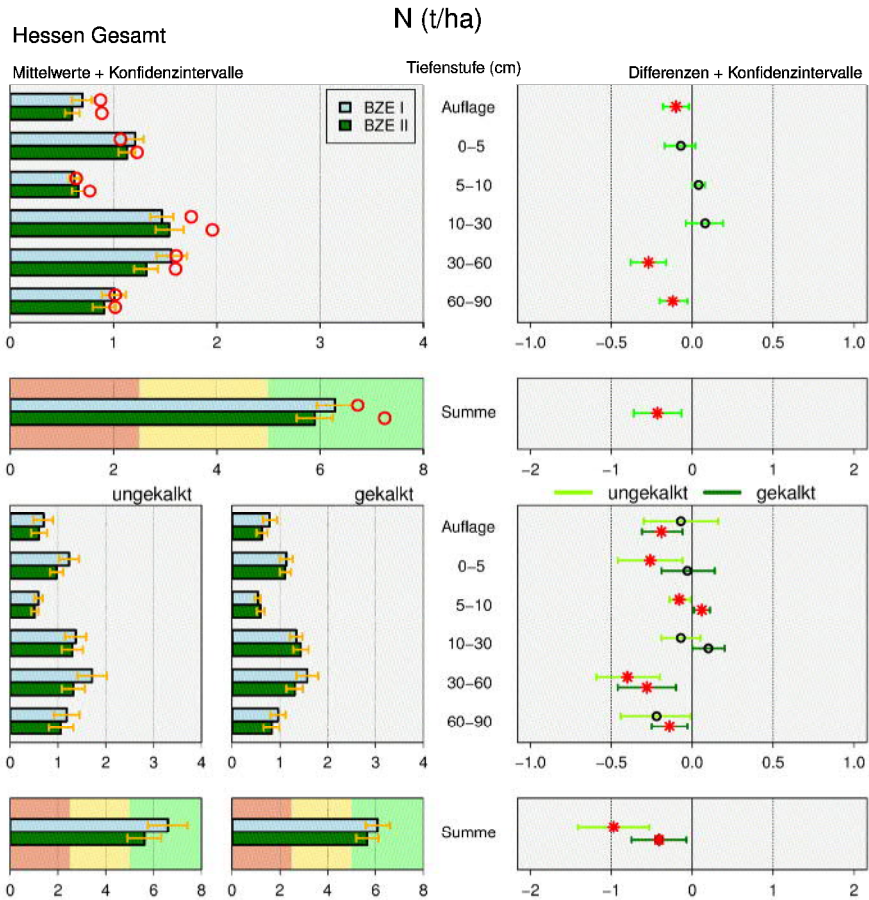


Abbildung 99: Stickstoffvorräte [t/ha] (n = 139) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

Die Stickstoffvorräte im Auflagehumus und in den Waldböden Hessens bis 90 cm Bodentiefe liegen bei der BZE II mit durchschnittlich rund 5,9 t/ha Stickstoff an der unteren Grenze des mittleren Bewertungsbereichs nach der Forstlichen Standortaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003; s. Tab. 16, S. 123). Der Auflagehumus hat mit 0,6 t/ha Stickstoff dabei einen Anteil von 10 %. Im Vergleich zu den Bundesländern Niedersachsen und Sachsen-Anhalt liegen die Stickstoffvorräte in Hessen etwas niedriger, was, analog zum Kohlenstoff, auf die geringeren Auflage- und Feinbodenvorräte in Hessen zurückgeführt werden kann. Die summierten Stickstoffvorräte vom Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe der verschiedenen BZE-Punkte streuen zwischen 1,7 t/ha bis zu über 12 t/ha Stickstoff. Dies sind die Profile des flachgründigen Rankers und des stark verbräunten Sandes, die auch hinsichtlich Kohlenstoff die Extreme darstellten.

Ähnlich wie beim Kohlenstoffvorrat sind in den oberen 30 cm Mineralboden (Auflagehumus eingeschlossen) mit rund 4 t/ha Stickstoff insgesamt 64 % der Stickstoffvorräte bis 90 cm Bodentiefe gespeichert. Stickstoff ist vor allem 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 15 % nicht unbedeutend. Die Tiefenverteilung war bei der BZE I recht ähnlich: In den oberen 30 cm des Mineralbodens (Auflagehumus eingeschlossen) waren es 61 %, in der Tiefenstufe 30-60 cm 24 % und in 60-90 cm 15 %.

Signifikante Veränderungen im Vergleich zur BZE I gab es im Auflagehumus und in den Tiefenstufen 30-60 und 60-90 cm. Der Stickstoffvorrat im Auflagehumus verringerte sich um durchschnittlich 100 kg/ha, bezogen auf den Vorrat der BZE I sind dies 14 % weniger. Dies entspricht der mittleren Reduktion der durchschnittlichen Trockenmasse beim Auflagehumus von knapp 6 t/ha (-13 %) zwischen der BZE I und BZE II (s. Tab. 13). Im oberen Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe kam es zu keinen signifikanten Veränderungen. Der Stickstoffvorrat in der Tiefenstufe 0-5 cm nahm um 6 % bezogen auf die BZE I ab, in der Tiefenstufe 5-10 cm gab es Zunahmen von 6 % und in der Tiefenstufe 10-30 cm von 5 %. Die (nicht signifikanten) Zunahmen in den Tiefenstufen 5-10 cm und 10-30 cm gleichen die (signifikante) Abnahme im Auflagehumus und die (nicht signifikante) Abnahme in der Tiefenstufe 0-5 cm aus. In der Summe lagen die Stickstoffvorräte bei der BZE I und BZE II im Auflagehumus und Mineralboden bis 30 cm jeweils bei rund 3,9 t/ha. Die Differenzen ergeben keine signifikanten Unterschiede, auch nicht, wenn nur die Stickstoffvorräte im Mineralboden von 0-30 cm betrachtet werden. Damit zeigt sich, wie bereits bei den Kohlenstoffvorräten, die Tendenz einer Verlagerung der Stickstoffvorräte aus den bodenbiologisch aktivsten Bodenschichten Auflagehumus und oberster Mineralbodenbereich (0-5 cm) in den tieferen Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe. Im Gegensatz zu Kohlenstoff gleicht sich der Stickstoffverlust im Auflagehumus mit den Zunahmen im Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe jedoch rechnerisch aus. Weiterhin wurden ebenfalls im Unterschied zu den Kohlenstoffvorräten

unterhalb von 30 cm bei der BZE II deutlich geringere Stickstoffvorräte festgestellt als bei der BZE I. In der Tiefenstufe 30-60 cm verringerte sich der Stickstoffvorrat signifikant von 1,56 auf 1,32 t/ha (-17 %) und in der Tiefenstufe 60-90 cm signifikant von 1,0 auf 0,9 t/ha (-12 %) (s. Abb. 99, Teilgrafik b).

Im Gegensatz zu Kohlenstoff verringerten sich somit die Stickstoffvorräte auf Gesamtprofilebene um rund 400 kg/ha (-7 %). Dieser Unterschied ist signifikant (s. Abb. 99, Teilgrafik d) und entspricht rechnerisch einem jährlichen Verlust von 27 kg/ha und Jahr. Dieser Vorratsrückgang deckt sich in der Größenordnung mit modellierten Austragsraten für Stickstoff aus Messdaten des Intensiven Monitorings in Hessen. Hier wurden zwischen 1 und 46 kg Stickstoff je Hektar und Jahr ausgetragen (Mittel 11,6 kg/ha und Jahr, $n = 12$) (KLINCK 2015, mdl. Mittl.). Auch im überregionalen Bereich liegen diese aus den Vorratsdifferenzen abgeleiteten Stickstoffverluste aus den beiden Bodenzustandserhebungen in realistischen Größenordnungen (BEISECKER u. EVERS 2012).

Bei der Betrachtung des Einflusses der Waldkalkung auf die Veränderung der Stickstoffvorräte zeigt sich im gekalkten Kollektiv ein deutlich stärkerer Stickstoffverlust im Auflagehumus als im ungekalkten (s. Abb. 99, Teilgrafik g). Dieser Unterschied ist im gekalkten Kollektiv signifikant, im ungekalkten bei gleicher Tendenz nicht. Dies deckt sich mit den Ergebnissen bei der Vorratsänderung für Kohlenstoff und den Trockenmassen im Auflagehumus. Mit zunehmender Bodentiefe zeigt sich im gekalkten Kollektiv bis 30 cm Bodentiefe eine leichte Zunahme von Stickstoff, die nur für die Tiefenstufe 5-10 cm, nicht jedoch für die Summe von 0-30 cm Bodentiefe signifikant ist. Die Verluste im Auflagehumus werden durch die Zunahmen im Mineralboden ausgeglichen. Im ungekalkten Kollektiv dagegen zeigen sich signifikante Abnahmen von Stickstoff in den Tiefenstufen 0-5 cm von 1,23 auf 0,97 t/ha (-21 %) und in der Tiefenstufe 5-10 cm von 0,59 auf 0,51 t/ha (-14 %). Die Abnahme um 0,7 t/ha (von 1,37 auf 1,30 t/ha; -5 %) in der Tiefenstufe 10-30 cm ist nicht signifikant.

Insgesamt verringerten sich die Stickstoffvorräte im oberen Mineralboden von 0-30 cm im ungekalkten Kollektiv signifikant um 0,4 t/ha (von 3,2 auf 2,8 t/ha). Dies entspricht einem um 13 %-Punkten geringeren Vorrat im Vergleich zur BZE I. In 30-60 cm Bodentiefe sind die Stickstoffvorräte in beiden Kollektiven bei der BZE II signifikant geringer, in der Bodentiefe 60-90 cm signifikant nur im gekalkten Kollektiv. Auch im ungekalkten Kollektiv sind die Stickstoffvorräte in der Tiefenstufe 60-90 cm geringer, allerdings nicht signifikant (s. Abb. 100). Im Kollektiv der BZE-Punkte, die grundsätzlich in Hessen nicht gekalkt werden sollen (Kollektiv entfällt), gibt es keine signifikanten Veränderungen zwischen den beiden BZE-Erhebungen, weder auf Ebene der Tiefenstufen noch auf Profilebene.

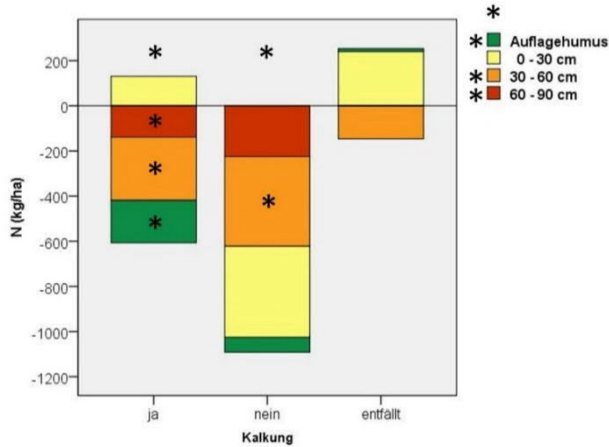


Abbildung 100: Änderungen der Stickstoffvorräte [kg/ha] (BZE II - BZE I) im Auflagehumus und Mineralboden für gekalkte (ja) und ungekalkte (nein) BZE-Punkte sowie nicht zur Kalkungskulisse gehörende BZE-Punkte (entfällt); (* signifikant auf dem 0.05 % Niveau, Wilcoxon; für die jeweiligen Tiefstufen (in den Balken), für das jeweilige Kollektiv (oberhalb der Balken), über die Kollektive hinweg in der jeweiligen Tiefenstufe (links der Legende) und über alle Profile hinweg (oberhalb der Legende))

6.5.7.1 Stickstoffvorräte nach Substratgruppen

Die Verteilung der Stickstoffvorräte nach Substratgruppen ist in Abbildung 101 dargestellt.

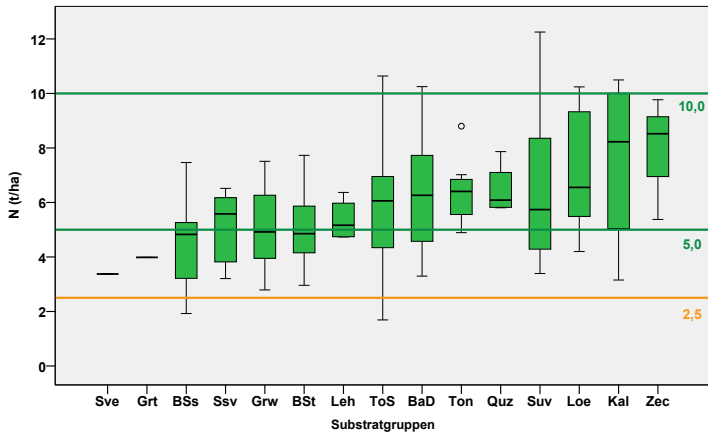


Abbildung 101: Verteilungen der Stickstoffvorräte [t/ha] bei der BZE II nach Substratgruppen in besischen Waldböden als Summe von Auflagehumus und Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BST: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Grt: Granit, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Sve: verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer, Zec: Zechstein; farbige Linien: s. Tab. 16, S. 123)

Die Stickstoffvorräte nach Substratgruppen fallen bis auf wenige Ausnahmen in die geringen bis mittleren Bewertungsbereiche. Wie bei den Kohlenstoffvorräten haben auch die Einzelprofile des verlehmtten Sandes und Granits die geringsten Stickstoffvorräte (unter 4 t N/ha). Der Buntsandstein in der sandigen Ausprägung liegt mit 4,5 t N/ha ebenfalls noch im geringen Bewertungsbereich, aber etwas höher. Mit Vorräten zwischen 5 und 5,5 t N/ha erreichen die schwach verlehmtten Sande, die Grauwacken, der tonige Buntsandstein und die Lehme den mittleren Bewertungsbereich. Der Tonschiefer hat mit 5,9 t N/ha noch höhere Stickstoffvorräte gefolgt vom Basalt/Diabas, Ton(stein), Quarzit und unverlehmtten Sand, die höhere Stickstoffvorräte um 6,4 t N/ha aufweisen. Die höchsten Stickstoffvorräte mit Werten zwischen 7,2 und knapp 8 t N/ha werden vom Lösslehm, den Kalken und Zechsteinen erreicht, bei den letzten beiden Substratgruppen mit sehr hohen Streuungen innerhalb der Substratgruppe. Damit ist die Spanne der mittleren Stickstoffvorräte bezogen auf die Substratgruppen etwas weiter als bei den Kohlenstoffvorräten, aber immer noch wesentlich geringer als bei den Nährelementen Calcium, Magnesium und Kalium. Im Unterschied zu den Kohlenstoffvorräten liegen die quarzreichen Substratgruppen Buntsandstein und schwach verlehmtter Sand bei Stickstoff im geringeren Bewertungsbereich, während die Substratgruppen Lehm, Grauwacke und Tonschiefer bei Kohlenstoff im unteren und bei Stickstoff im mittleren Bereich liegen.

Die Verteilung der Stickstoffvorräte im Auflagehumus und Mineralboden wird aus Abbildung 102 ersichtlich.

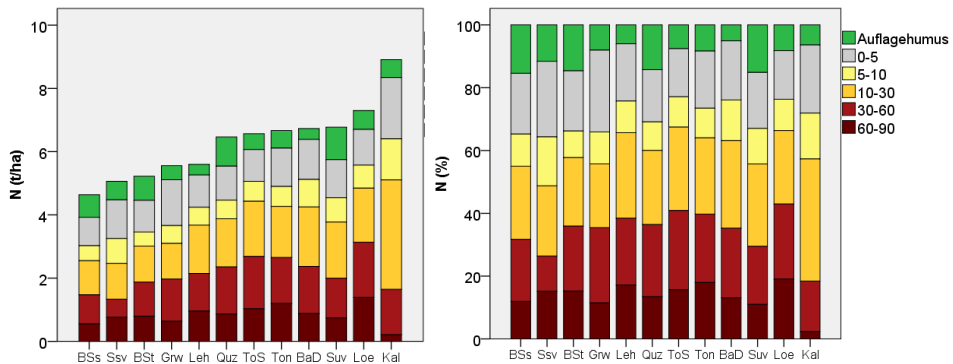


Abbildung 102: Stickstoffvorräte der BZE II nach Substratgruppen, unterteilt nach Auflagehumus und Tiefenstufen, links absolute Werte [t/ha], rechts in Prozent, Darstellung nur für Substratgruppen mit mindestens 4 BZE-Punkten (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BST: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzit, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

Die Substratgruppen mit den schlechteren Humusformen weisen, wie bei den Kohlenstoffvorräten auch, bei den Stickstoffvorräten im Auflagehumus die höchsten Werte auf, so z. B. im Auflagehumus bei den unverlehmten Sanden und Quarziten mit rund 1 t/ha. Die geringsten Stickstoffvorräte im Auflagehumus finden sich in den Substratgruppen Basalt/Diabas und Lehmen mit rund 0,35 t/ha. Der weitaus überwiegende Teil der Stickstoffvorräte (rund 60 %) ist bei allen Substratgruppen im Auflagehumus und Mineralboden bis 30 cm Bodentiefe gebunden, bei den Kalken sind es sogar 80 %. Die prozentuale Verteilung auf die Tiefenstufen ist mit Ausnahme der Kalke recht ähnlich.

Der Stickstoffvorrat wird wie bei Kohlenstoff durch den aufstockenden Bestand beeinflusst. Je höher der Nadelholzanteil im aufstockenden Bestand ist, desto höher sind auch die Stickstoffvorräte im Auflagehumus (s. Abb. 103).

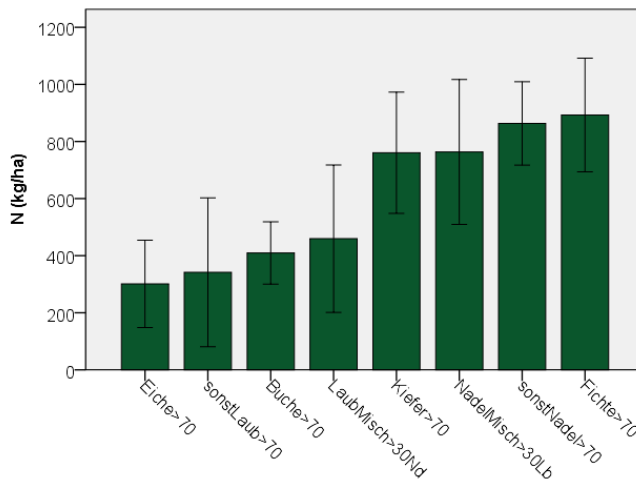


Abbildung 103: Stickstoffvorräte [kg/ha] im Auflagehumus in Abhängigkeit von der Bestandeszusammensetzung (>70 = Bestandesanteil größer als 70 %; Nd= Nadelholz; Lb = Laubholz)

Die Abnahmen der Stickstoffvorräte für das BZE-Gesamtkollektiv im Auflagehumus und den Tiefenstufen 30-60 cm und 60-90 cm waren in den Substratgruppen nur vereinzelt signifikant. In der tonigen und sandigen Fraktion des Buntsandsteins waren die Stickstoff-Vorratsdifferenzen insgesamt und für die Tiefenstufe 30-60 cm, im Lösslehm in der Tiefenstufe 30-60 cm und im Tonschiefer für den Auflagehumus signifikant. In allen anderen Substratgruppen konnten keine signifikanten Veränderungen nachgewiesen werden. Dennoch zeigt sich in der Gesamttendenz bei fast allen Substratgruppen eine Abnahme der Stickstoffvorräte von der BZE I zur BZE II (s. Abb. 104). Die deutlichsten Abnahmen wurden bei den Substratgruppen Buntsandstein, Quarzit, Lehm und Ton(stein) mit Abnahmen bis 90 cm Bodentiefe zwischen 12 und 15 % der gesamten Stickstoffvorräte festgestellt. Bei den Substratgruppen Basalt/Diabas, Lösslehm und Tonschiefer waren die Abnahmen des Stickstoffvorrates mit Werten zwischen 4 und 6 % bezogen auf den Vorrat der BZE I

bis 90 cm Bodentiefe wesentlich geringer. Zunahmen zwischen 8 und 12 % wurden in den Substratgruppen Grauwacke, schwach- und unverlehmter Sand sowie Kalk festgestellt.

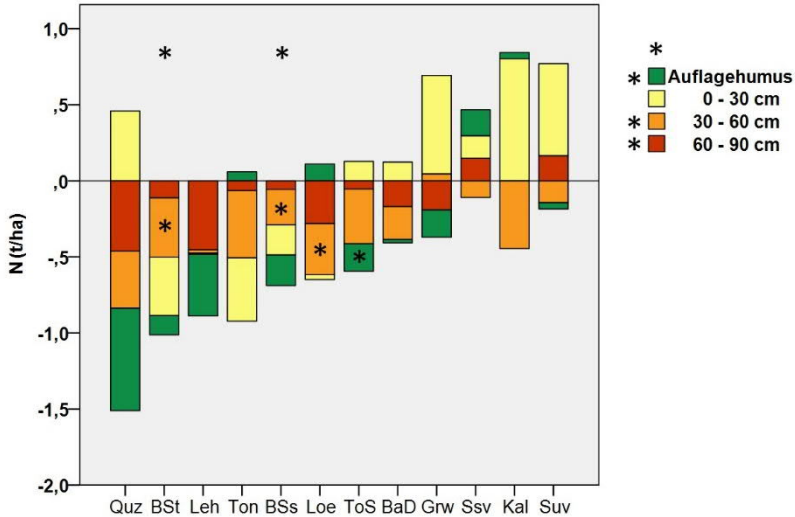


Abbildung 104: Veränderungen der Stickstoffvorräte [t/ha] zwischen BZE I und BZE II nach Substratgruppen und Tiefenstufen (* signifikant auf dem 0.05 %-Niveau, Wilcoxon; für die jeweiligen Tiefenstufen (in den Balken), für das jeweilige Kollektiv (oberhalb der Balken), über die Kollektive hinweg in der jeweiligen Tiefenstufe (links der Legende) und über alle Profile hinweg (oberhalb der Legende)) (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BST: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzlit, Ssv: schwach verlehmter Sand, Suv: unverlehmter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer)

6.5.8 C/N-Verhältnisse

Die C/N-Verhältnisse berechnen sich als Quotient der Kohlenstoff- zu den Stickstoffvorräten (bzw. den Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten) und 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 105 sind die C/N-Verhältnisse für den Auflagehumus und alle Tiefenstufen sowie für das Gesamtprofil angegeben.

Die durchschnittlichen C/N-Verhältnisse im Auflagehumus der BZE II liegen mit 23 im mäßig weiten Bewertungsbereich nach der AK STANDORTSKARTIERUNG (2003)(s. auch Tab. 16, S. 123) und sind typisch für Waldstreu. Sie haben sich im

Vergleich zur BZE I (24) leicht (signifikant) verringert. Mit zunehmender Bodentiefe verringern sich die C/N-Verhältnisse absolut bis auf 6 im Unterboden, da die Kohlenstoffvorräte mit zunehmender Bodentiefe relativ stärker abnehmen als die Stickstoffvorräte. Mit Ausnahme der Tiefenstufe 60-90 cm erhöhten sich die C/N-Verhältnisse in jeder Tiefenstufe des Mineralbodens signifikant, in den ersten 30 cm um rund 3, in der Tiefenstufe 30-60 cm um 1. Dies geht einerseits auf die deutlich gestiegenen Kohlenstoffvorräte bis 30 cm Bodentiefe und andererseits auf die zurückgegangenen Stickstoffvorräte besonders in der Tiefenstufe 30-60 cm der BZE II gegenüber der BZE I zurück.

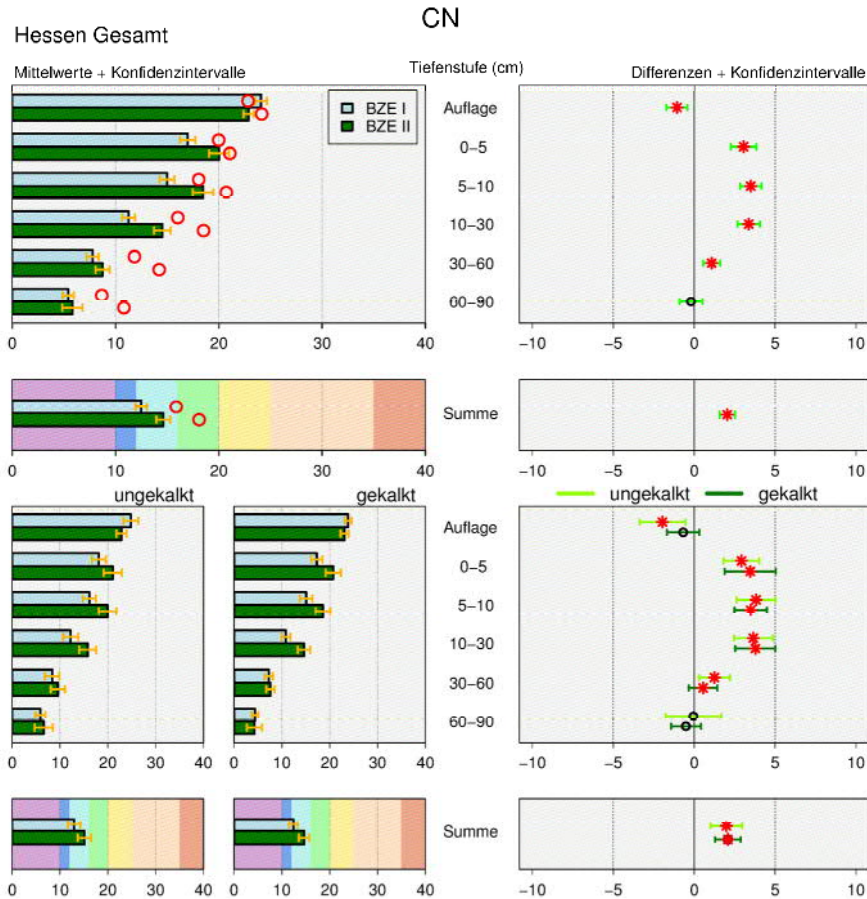


Abbildung 105: C/N-Verhältnisse ($n = 139$) in hessischen Waldböden als Mittelwert für die BZE I und II (linke Spalte) und Differenz (BZE II - BZE I) (rechte Spalte) nach Auflagehumus, Tiefenstufen und Summe bis 90 cm, jeweils als Gesamtergebnis (obere 4 Grafiken) und nach ungekalkt/gekalkt (untere 6 Grafiken); die detaillierte Erläuterung der Grafikstruktur findet sich in Abbildung 36, S. 126

Im Hinblick auf die Waldkalkung zeigen sich im Mineralboden keine Unterschiede zwischen den C/N-Verhältnissen im gekalkten bzw. ungekalkten Kollektiv (s. Abb. 105, Teilgrafiken e-j). Im gekalkten Kollektiv wirkt sich die relativ stärkere Kohlenstoffzunahme gegenüber Stickstoff mit weiteren C/N-Verhältnissen ähnlich aus wie die stärkere Abnahme von Stickstoff im ungekalkten Kollektiv bei kaum veränderten Kohlenstoffvorräten. Im Auflagehumus dagegen verengen sich die C/N-Verhältnisse im ungekalkten Kollektiv signifikant von 25 auf 23, im gekalkten Kollektiv verändern sich die C/N-Verhältnisse nicht. Dies liegt an der gleichgerichteten Abnahme der Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte bei der BZE II im gekalkten und der stärkeren (nicht signifikanten) Abnahme der Kohlenstoff- gegenüber den Stickstoffvorräten im ungekalkten Kollektiv.

6.5.8.1 C/N-Verhältnisse nach Substratgruppen

Für die einzelnen Substratgruppen sind in Abbildung 106 nur die C/N-Verhältnisse im Auflagehumus und im oberen Mineralboden bis 10 cm Bodentiefe angegeben. Die C/N-Verhältnisse der tieferen Bodenschichten verringern sich auch in den Substratgruppen wie im Gesamtkollektiv deutlich mit zunehmender Bodentiefe, lassen sich aber nicht weiter nach den Substratgruppen differenzieren. Sie sind nicht grafisch dargestellt.

Die C/N-Verhältnisse des Auflagehumus liegen in allen Substratgruppen im mäßig-weiten Bewertungsbereich (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003) zwischen 20 und 25. Auch in der Oh-Lage im Auflagehumus, liegen die Werte in diesem Bereich. Damit differieren die C/N-Verhältnisse im Auflagehumus nur wenig hinsichtlich der Substratgruppen. Auch die Veränderungen der C/N-Verhältnisse im Auflagehumus zwischen den BZE-Erhebungen sind nur geringfügig. Signifikante Unterschiede gab es nur für die Substratgruppen Buntsandstein (insgesamt), toniger Buntsandstein und Lösslehm mit leicht geringeren C/N-Verhältnissen bei der BZE II, die jedoch zu keiner anderen ökologischen Bewertung führen.

In der Tiefenstufe 0-5 cm sind die Unterschiede hinsichtlich der Substratgruppen deutlicher: die nährstoffreicheren Standorte in den Substratgruppen Kalk, Basalt/Diabas und Ton(stein) liegen in besseren, die Sande, Buntsandstein und Quarzit in schlechteren und Tonschiefer, Lösslehm, Grauwacke und Lehm in mittleren Bewertungsbereichen. Die Streuungen sind teilweise jedoch beträchtlich. Ein ähnliches Bild zeigt sich in der Tiefenstufe 5-10 cm. Grundsätzlich weiten sich bei der BZE II die C/N-Verhältnisse in beiden Tiefenstufen und bei allen Substratgruppen. Signifikante Unterschiede gab es bei den Substratgruppen Basalt/Diabas, Buntsandstein, Lösslehm und Tonschiefer sowie beim Ton(stein) und unverlehmten Sand mit weiteren C/N-Verhältnissen bei der BZE II. Vor allem in der Tiefenstufe 5-10 cm ist dies auf höhere Kohlenstoffvorräte bei wenig veränderten Stickstoffvorräten bei der BZE II zurückzuführen.

Damit lassen sich anhand der C/N-Verhältnisse im Mineralboden zwar Muster bei den Substratgruppen erkennen, sie sind jedoch relativ wenig differenziert und entsprechen den Erwartungswerten. Die Veränderungen der C/N-Verhältnisse in den einzelnen Substratgruppen folgen dem allgemeinen Muster mit weiteren C/N-Verhältnissen bei der BZE II, welches vor allem auf höhere Kohlenstoffvorräte zurückgeführt werden kann. Ein Kalkungseffekt auf die C/N-Verhältnisse zeigt sich nicht.

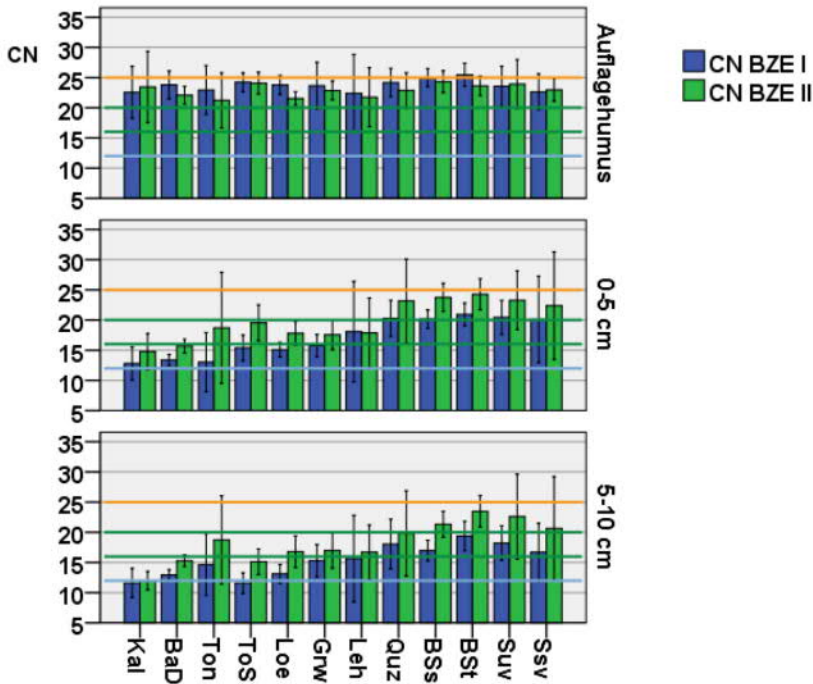


Abbildung 106: C/N-Verhältnisse bei der BZE I und II nach Substratgruppen für den Auflagehumus und die Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm in Hessen (BaD: Basalt/Diabas, BSs: Buntsandstein (sandig), BSst: Buntsandstein (tonig), Grw: Grauwacke, Kal: Kalk, Leh: Lehm, Loe: Lösslehm, Quz: Quarzite, Ssv: schwach verlehmtter Sand, Suv: unverlehmtter Sand, Ton: Ton(stein), ToS: Tonschiefer; die grünen Linien kennzeichnen den mittleren Bewertungsbereich, Werte oberhalb der orangenen Linie kennzeichnen den weiten und unterhalb der hellblauen Linie den engen Bewertungsbereich; s. Tab. 16, S. 123)

6.5.8.2 C/N-Verhältnisse im Auflagehumus nach Bestandestypen

Bei durchschnittlichen C/N-Verhältnissen zwischen 21 und 25 differieren diese recht wenig im Auflagelagehumus bei unterschiedlichen Bestandestypen. Es zeigt sich hier ein ähnliches Ergebnis wie bei den Substratgruppen. Dennoch sind die C/N-Verhältnisse in Laubholzbeständen mit Werten um 21 und 22 etwas enger als in Nadelholzbeständen mit Werten zwischen 22 und 24 (s. Abb. 107). Alle Werte

befinden sich im mäßig-weiten Bewertungsbereich nach der Forstlichen Standortsaufnahme (AK STANDORTSKARTIERUNG 2003). Signifikante Veränderungen der C/N-Verhältnisse im Auflagehumus traten nur in den Buchenbeständen mit engeren C/N-Verhältnissen bei der BZE II auf, die aber immer noch im weiten Bewertungsbereich liegen.

Deutlich größere Unterschiede zeigen sich im Mineralboden. Hier liegen die durchschnittlichen C/N-Verhältnisse im Oberboden bis 10 cm Bodentiefe zwischen 16 und 24. Grundsätzlich sind diese in der Tiefenstufe 5-10 cm geringer als in 0-5 cm und in den Laubholzbeständen geringer als in den Nadelholzbeständen. Alle C/N-Verhältnisse sind bei der BZE II weiter als bei der BZE I. Dies ist mit Ausnahme des Bestandestyps sonstiges Nadelholz in der Tiefe 5-10 cm für alle Bestandestypen signifikant. Dies steht auch im Zusammenhang mit den deutlich höheren Kohlenstoffvorräten bei der BZE II im Vergleich zur BZE I.

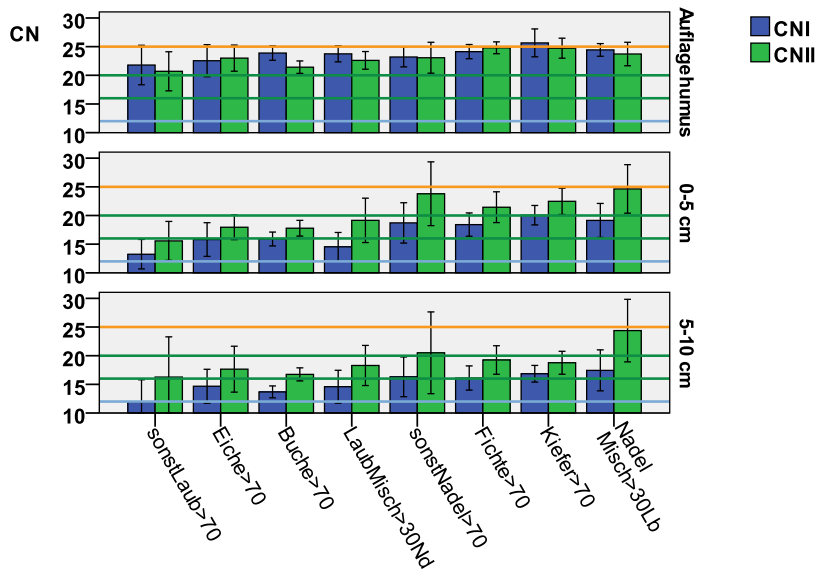


Abbildung 107: C/N-Verhältnisse bei der BZE I und II nach Bestandestypen für den Auflagehumus und die Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm in Hessen (>70 = Bestandesanteil größer als 70 %; Nd = Nadelholz; Lb = Laubholz; die grünen Linien kennzeichnen den mittleren Bewertungsbereich, Werte oberhalb der orangefarbenen Linie kennzeichnen den weiten und unterhalb der hellblauen Linie den engen Bewertungsbereich; s. Tab. 16, S. 123)

7 Waldernährung

Inge Dammann, Egbert Schönfelder, Ulrike Talkner, Jan Evers, Uwe Paar

7.1 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 Buche, Fichte, Kiefer und Eiche in Hessen. Für die einzelnen Baumarten werden die Elementgehalte und Elementquotienten insgesamt sowie gegliedert nach den jeweils am häufigsten vertretenen Substratgruppen und im Kalkungsvergleich dargestellt. Für die Buche wurden außerdem zeitliche Trends von den Flächen des Intensiven Monitorings ermittelt, um die Ergebnisse der Einzelerhebung (BZE II) einordnen zu können. Für die Fichte konnten Daten aus der IWE (Immissionsökologische Waldzustandserhebung) 1982/1983 mit den Ergebnissen der BZE II verglichen werden.

7.2 Material und Methoden

Die grundsätzliche methodische Vorgehensweise ist im Kapitel 5.3.2 (Blatt- und Nadelernährung) beschrieben, die Behandlung der Proben und die Analysemethoden sind in Kapitel 10 (Qualitätssicherung) dargelegt. An 137 BZE II-Punkten in Hessen wurden Nadeln und Blätter von je drei Probestämmen je Baumart als Mischprobe chemisch analysiert. An zwei BZE II-Punkten wurden keine Blatt- und Nadelproben gewonnen, weil der Bestand durch Windwurf zerstört war bzw. keine der Hauptbaumarten vertreten waren. Da an vielen Erhebungspunkten mehrere Baumarten vorkommen, sind insgesamt 238 Beprobungen von je drei Probestämmen erfolgt. Die Angaben zu den Elementgehalten (mg/g) beziehen sich auf die getrocknete Blatt- bzw. Nadelmasse (Trockensubstanz = TS).

Für die Bewertung der Elementgehalte wurden die Grenzwerte (Median) nach GÖTTLEIN (2015) genutzt (s. Tab. 18). 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 Symptommgrenze 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 Symptommengrenze markiert den Grenzwert, unterhalb dessen sichtbare Mangelsymptome auftreten. Der Bereich zwischen der Symptommengrenze und der Untergrenze des Normalbereichs repräsentiert den Bereich latenten Mangels. Elementgehalte über dem Normalbereich weisen auf eine Überversorgung hin.

Tabelle 18: 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
Buche									
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
Symptommengrenze	16,65	0,95	4,75	4,00	0,70	1,35	0,035	0,050	-
Fichte									
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
Symptommengrenze	11,70	1,05	3,50	1,00	0,60	0,80	0,021	0,020	0,012
Kiefer									
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
Symptommengrenze	12,60	1,00	3,50	1,00	0,60	0,95	0,030	0,010	0,010
Eiche									
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
Symptommengrenze	16,70	0,90	3,60	3,00	0,90	1,00	0,050	-	-

OG = Obergrenze, UG = Untergrenze

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. 19). Bei Unterschieden zwischen den Referenzwerten wurde der strengere Wert für die Beurteilung der Stickstoffquotienten verwendet.

Tabelle 19: 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 Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt nach 16 Substratgruppen klassifiziert (s. Kap. 6.2.1), von denen 14 in Hessen vorkommen (s. Tab. 20). Die Eingruppierung der BZE II-Punkte erfolgte nach Ausgangssubstrat, Lagerung, Bodenart, Bodenmorphologie sowie bodenchemischen und -physikalischen Parametern. Entsprechend ihrer ökologischen Ansprüche und den waldbaulichen Entscheidungen der Forstverwaltung und der Waldeigentümer sind die Baumarten in den Substratgruppen unterschiedlich stark vertreten. Die Darstellung der Ernährungssituation erfolgte nach Baumarten

getrennt für die ausgeschiedenen Substratgruppen, soweit mindestens drei BZE II-Punkte in der jeweiligen Substratgruppe vorkamen.

Tabelle 20: Übersicht der Verteilung der BZE II-Punkte in Hessen auf Baumarten und Substratgruppen, getrennt in gekalkte (gek) und ungekalkte (ugek) BZE II-Punkte sowie unklar (unkl) und entfällt (nicht zur Kalkung vorgesehen)

Substratgruppe	Abk.	Buche (n = 80)				Fichte (n = 67)			
		gek	ugek	unkl	entfällt	gek	ugek	unkl	entfällt
Basalt/Diabas	BaD	-	-	-	12	-	-	-	10
Buntsandstein	BS	14	7	-	-	18	6	-	-
Granit	Grt		1	-	-	-	1	-	-
Grauwacke	Grw	4	2	-	-	2	1	-	-
Kalkstein	Kal	-	-	-	2	-	-	-	1
Lehm	Leh	2	1	1	-	1	-	-	-
Lösslehm	Loe	4	8	-	-	3	6	1	-
Quarzit	Qua	2	-	-	-	3	1	-	-
Ton(stein)	Ton	3	3	-	-	1	-	-	-
Tonschiefer	ToS	8	-	1	-	8	-	-	-
unverlehmte Sande	Suv	-	-	-	2	-	-	-	2
schwach verlehnte Sande	Ssv	-	-	-	2	-	-	-	1
verlehnte Sande	Sve	-	-	-	-	-	-	-	-
Zechstein / Rotliegendes	Zec	-	-	-	1	-	-	-	1
gesamt		37	22	2	19	36	15	1	15

Substratgruppe	Abk.	Kiefer (n = 47)				Eiche (n = 44)			
		gek	ugek	unkl	entfällt	gek	ugek	unkl	entfällt
Basalt/Diabas	BaD	-	-	-	1	-	-	-	5
Buntsandstein	BS	10	4	1	-	3	4	-	-
Granit	Grt	-	-	-	-	-	1	-	-
Grauwacke	Grw	1	-	-	-	-	1	-	-
Kalkstein	Kal	-	-	-	3	-	-	-	1
Lehm	Leh	1	1	-	-	1	-	1	-
Lösslehm	Loe	2	4	-	-	-	4	-	-
Quarzit	Qua	2	-	-	-	1	-	-	-
Ton(stein)	Ton	-	-	-	-	3	3	-	-
Tonschiefer	ToS	2	-	-	-	6	1	1	-
unverlehmte Sande	Suv	-	-	-	8	-	-	-	4
schwach verlehnte Sande	Ssv	-	-	-	3	-	-	-	2
verlehnte Sande	Sve	-	-	-	1	-	-	-	1
Zechstein / Rotliegendes	Zec	-	-	-	3	-	-	-	1
gesamt		18	9	1	19	14	14	2	14

Beim Vergleich von gekalkten und ungekalkten BZE II-Stichprobenpunkten in Hessen (Kalkungsvergleich) wurden ausschließlich die vorrangig für eine Kalkung vorgesehenen Substratgruppen betrachtet (Kalkungskulisse). Dies sind in Hessen Buntsandstein, Granit, Grauwacke, Lehm, Lösslehm, Quarzit, Ton(stein) und Ton-schiefer. Als Voraussetzung für die getrennte Darstellung der Substratgruppe im Kalkungsvergleich wurde auch hier eine Mindestanzahl von drei BZE II-Punkten pro Variante (gekalkt/nicht gekalkt) festgesetzt. Die statistische Auswertung des Kalkungsvergleichs erfolgte mit dem Wilcoxon-Rangsummentest.

Für die Auswertung der zeitlichen Trends wurden die Elementgehalte in den Buchenblättern von sieben Intensivmonitoringflächen für den Zeitraum 1995-2008 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).

Für die statistische Auswertung der Ergebnisse zur Nährstoffversorgung der Fichte 2007 (BZE II) mit den Ergebnissen der IWE (1982/1983) wurde ebenfalls der Wilcoxon-Rangsummentest verwendet.

Zusätzlich zu den Ergebnissen zur Nährstoffversorgung von Buche, Fichte, Eiche und Kiefer in Hessen werden die gemeinsamen Mittelwerte für Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt (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 21.

Tabelle 21: Übersicht der waldernährungskundlich beprobten BZE II-Punkte in Hessen, Niedersachsen (inkl. Bremen) und Sachsen-Anhalt für Buche, Fichte, Kiefer und Eiche (8 x 8 km-Raster)

Land	Buche	Fichte	Kiefer	Eiche
Hessen	80	67	47	44
Niedersachsen (inkl. Bremen)	44	52	82	28
Sachsen-Anhalt	11	10	44	13
insgesamt	135	129	173	85

7.3 Ergebnisse

7.3.1 *Buche*

Die Buche ist mit einem Flächenanteil von 31 % der Waldfläche die häufigste Baumart in Hessen (HMUKLV 2014). Bei der BZE II-Stichprobe ist sie vor allem auf den Substratgruppen Buntsandstein (n = 21), Basalt/Diabas (n = 12), Lösslehm (n = 12) und Tonschiefer (n = 9) vertreten (s. Tab. 20).

Im Mittel (Median) wurde für die Buche ein Stickstoffgehalt in den Blättern von 23,0 mg/g festgestellt. Für 28 % der Buchenbestände der BZE II lagen die Stickstoffgehalte über dem Normalbereich, 66 % befanden sich im Normalbereich und 6 % unterhalb. In Hessen war die Stickstoffübersorgung nicht so stark ausgeprägt wie in Niedersachsen und Sachsen-Anhalt. Der Drei-Länder-Mittelwert betrug 24,1 mg/g. Die höchsten Stickstoffgehalte in Buchenblättern (Median) wurden in Hessen auf Lehm und Ton(stein) festgestellt (s. Abb. 108).

Die Phosphorgehalte in den Buchenblättern zeigten insgesamt und für jede Substratgruppe Defizite an, der Median für alle 80 Buchenpunkte lag mit 1,15 mg/g im latenten Mangel, 66 % der Buchenbestände an den BZE II-Punkten wiesen eine unzureichende Phosphorversorgung auf (s. Tab. 22). Am niedrigsten waren die Phosphorgehalte (Median) auf Buntsandstein.

Die Kaliumgehalte waren an 69 % der BZE II-Buchenpunkte in Hessen ausreichend hoch, d. h. im Normalbereich oder höher. Vergleichsweise niedrig fielen die Kaliumgehalte (Median) auf Basalt/Diabas und Grauwacke aus, am günstigsten war die Situation auf Buntsandstein. Eine Aufteilung der Buntsandsteine in eine tonige (13 BZE II-Punkte) und eine sandige Variante (8 BZE II-Punkte) zeigte, dass der Median der sandigen Variante mit 6,1 mg/g relativ niedrig ausfiel, während die Buchen auf Buntsandsteinen der tonigen Variante mit einem Median von 8,1 mg/g die höchsten Kaliumwerte unter den Buchenpunkten aufwiesen (nicht dargestellt).

Insgesamt 82 % der Buchenpunkte zeigten eine ausreichende Calciumversorgung, auch hier lag der Median für Hessen (6,7 mg/g) unterhalb des Drei-Länder-Mittelwertes (7,9 mg/g). Nur für die Substratgruppen Basalt/Diabas und Lehm lagen die Calciumgehalte der Buchenblätter ohne Ausnahme mindestens im Normalbereich, auf Lösslehm waren die Calciumgehalte (Median) am niedrigsten.

Für Magnesium lagen 68 % der Buchenpunkte mindestens im Normalbereich. Die Spanne der Magnesiumgehalte war relativ weit, die höchsten Magnesiumgehalte mit Medianen über dem Normalbereich wurden auf Basalt/Diabas und Tonschiefer festgestellt, die niedrigsten auf Grauwacke.

Mehr als die Hälfte der Buchenpunkte zeigte Schwefelgehalte unter dem Normalbereich, nur für 44 % bestand eine ausreichende Schwefelversorgung. Der Median betrug 1,48 mg/g und lag unterhalb des Drei-Länder-Mittelwertes

(1,56 mg/g). Alle Substratgruppen wiesen Schwefeldefizite auf, am niedrigsten lagen die Schwefelgehalte auf Basalt/Diabas und Tonschiefer.

Nach den hier verwendeten Grenzwerten war an allen Buchenpunkten die Eisen- und Manganernährungssituation gut. Teilweise wurde eine Manganüberversorgung festgestellt, vor allem auf Grauwacke und Lösslehm. Für 90 % der Buchenpunkte lagen auch die Zinkgehalte der Blätter im Normalbereich.

Analog zu den niedrigen Phosphorgehalten war beim N/P-Verhältnis die Mehrzahl der Buchenpunkte (91 %) im unausgewogenen Bereich angesiedelt (s. Abb. 109). Relativ am günstigsten waren die N/P-Quotienten auf Basalt/Diabas. Zwei Drittel der Buchenpunkte zeigten ausgewogene N/K-Quotienten. Beim N/Ca-Verhältnis lagen 56 % im ausgewogenen Bereich, die Mediane bei Grauwacke, Lösslehm und Ton(stein) lagen außerhalb. Die Hälfte der Buchenpunkte wies ein harmonisches N/Mg-Verhältnis auf, auch hier lagen die Mediane bei Grauwacke und Lösslehm außerhalb.

Eine Nährstoffausstattung der Buche mit den Hauptnährelementen (Stickstoff, Phosphor, Kalium, Calcium, Magnesium und Schwefel) mindestens im Normalbereich sowie ausgewogene Stickstoffquotienten kamen im BZE II-Kollektiv 2007 nur an einem BZE II-Punkt vor. Hierbei handelte es sich um mittelalte Buchen auf Lösslehm im Vogelsberg. Latenter Mangel an einem oder mehreren Hauptnährelementen und/oder unausgewogene Stickstoffquotienten gab es an 64 % der Buchenpunkte, an 35 % wurde die Symptommengrenze für ein oder mehrere Hauptnährelemente unterschritten. Entscheidend für diese Einstufung waren der weit verbreitete (latente) Phosphormangel sowie ungünstige Stickstoffquotienten, während (latenter) Schwefelmangel allein nur sehr selten auftrat. Ein substratabhängiges Muster war nicht zu erkennen, da die Phosphor- und (Schwefel)-Defizite in allen Substratgruppen auftraten.

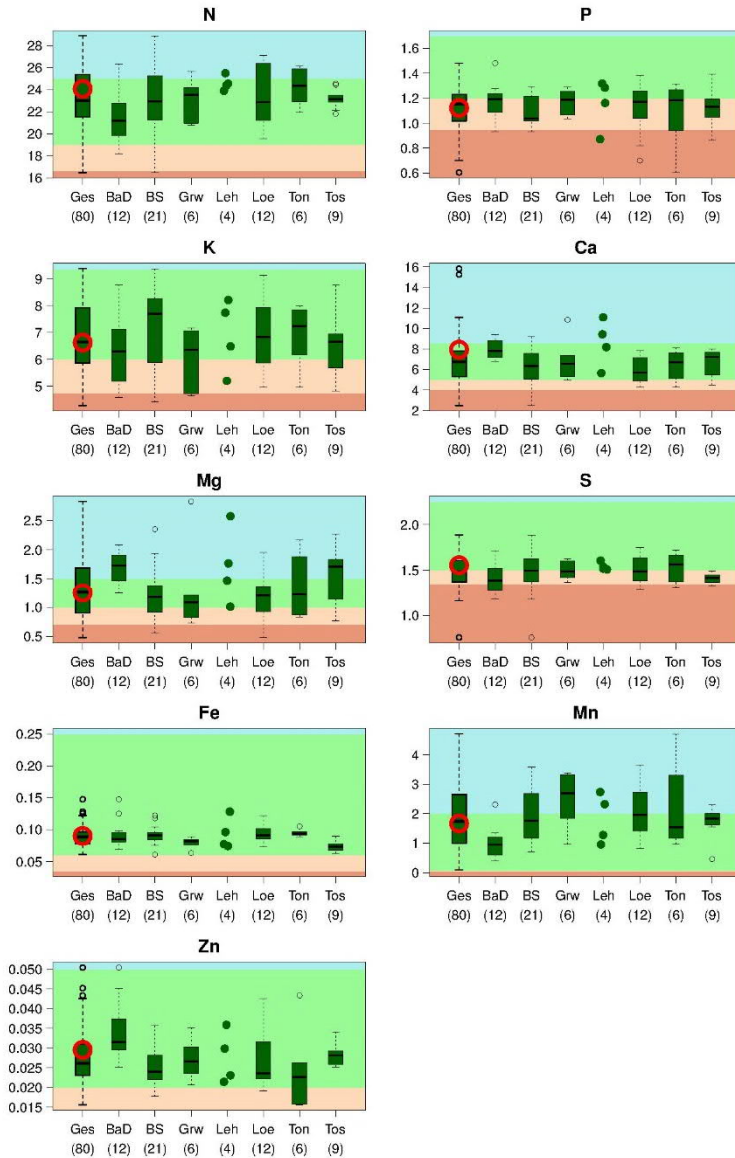


Abbildung 108: Elementgehalte [mg/g] in Buchenblättern (BZE II). Verteilung für die Buche in Hessen insgesamt ($n = 80$) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$; bei 4 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau = über Normalbereich, hellgrün = Normalbereich, hellrot = unter Normalbereich (latenter Mangel), rot = unter der Symptombegrenze; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 20.

Tabelle 22: Zuordnung [Anteil in %] der BZE II-Buchepunkte nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	unter der Symptombegrenze = Mangel	unter Normalbereich = latenter Mangel	im/über Normalbereich
N	1	5	94
P	14	52	34
K	7	24	69
Ca	4	14	82
Mg	6	26	68
S	17	39	44
Fe	-	-	100
Mn	-	-	100
Zn	-	10	90
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse		
N/P	9		
N/K	65		
N/Ca	56		
N/Mg	50		

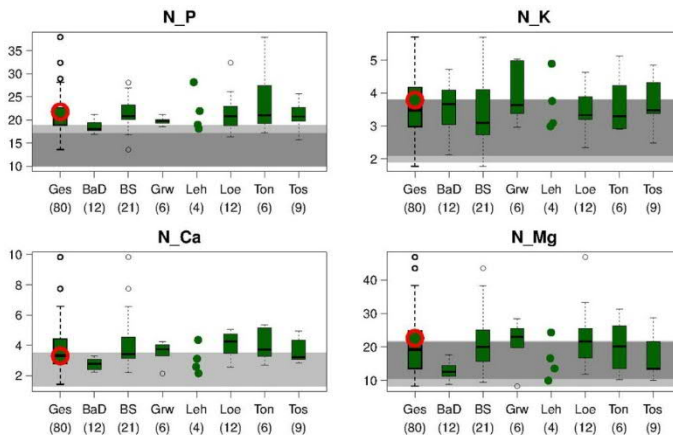


Abbildung 109: Elementverhältnisse in Buchenblättern (BZE II). Verteilung für die Buche in Hessen insgesamt (n = 80) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn n ≥ 3; bei 4 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 20.

7.3.1.1 Kalkungsvergleich

In den Kalkungsvergleich wurden 37 gekalkte und 22 ungekalkte BZE II-Buchenpunkte einbezogen. Eine Differenzierung nach Substratgruppen war für Buntsandstein, Lösslehm und Ton(stein) möglich.

Für Stickstoff, Phosphor, Calcium, Eisen, Mangan und Zink waren keine eindeutigen Kalkungseffekte feststellbar (s. Abb. 110). Beim Kalium zeigte sich eine Tendenz zu niedrigeren Kaliumwerten in den gekalkten Beständen. Eine Trennung in tonige und sandige Buntsandsteine zeigte, dass für die tonigen Buntsandsteine keine Unterschiede in den Kaliumgehalten zwischen gekalkten und ungekalkten BZE II-Buchenpunkten vorlagen. Die Buchen auf sandigem Buntsandstein, die überwiegend gekalkt wurden, wiesen niedrigere Kaliumgehalte auf als die Buchen auf tonigem Buntsandstein. Die Differenz der Kaliumgehalte zwischen gekalktem und ungekalktem Buntsandstein wurde daher vor allem durch die unterschiedliche Zusammensetzung der Buntsandsteine hervorgerufen. Die Magnesiumgehalte der Buchenblätter auf gekalkten Standorten lagen (mit Ausnahme beim Ton(stein)) höher als auf den ungekalkten. Dies führte auch zu günstigeren N/Mg-Verhältnissen auf den gekalkten BZE II-Punkten (s. Abb. 111). Rund ein Viertel der disharmonischen N/Mg-Quotienten der Buchenblätter von gekalkten BZE II-Punkten befanden sich unterhalb des Bereichs harmonischer Ernährung, sind also durch hohe Magnesiumgehalte hervorgerufen worden.

Die verbesserte Magnesiumversorgung und das günstigere N/Mg-Verhältnis sowie die geringeren Schwefelgehalte auf den gekalkten BZE II-Punkten gegenüber den ungekalkten waren signifikant.

Die gekalkten Buchenpunkte lagen bei Calcium und Magnesium häufiger im Normalbereich oder darüber als die ungekalkten Buchenpunkte (s. Tab. 23). Beim Phosphor und Schwefel war es umgekehrt.

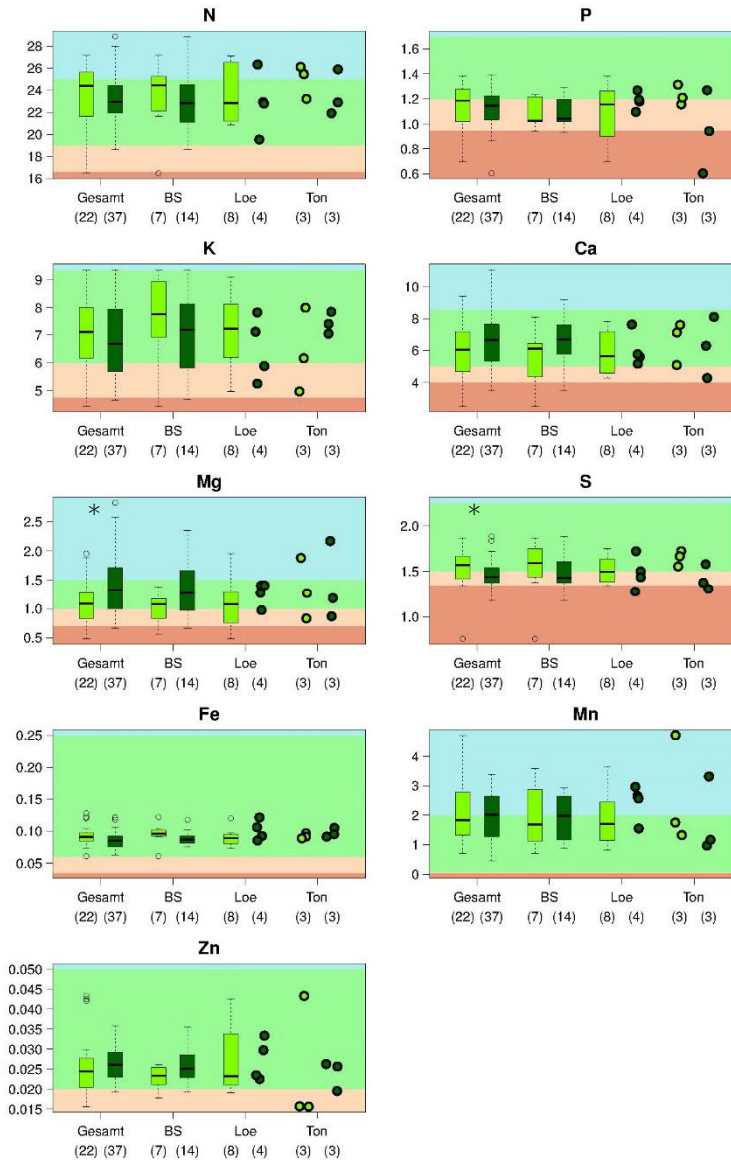


Abbildung 110: Kalkungsvergleich für Buche in Hessen. Elementgehalte [mg/g] in Buchenblättern (BZE II). Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und ungekalkte (hellgrün) Buchen der Kalkungskulisse. Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$; bei 3-4 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau = über dem Normalbereich, hellgrün = Normalbereich, hellrot = unter dem Normalbereich (latenter Mangel), rot = unter der Symptommengrenze, Irrtumswahrscheinlichkeit: * $p < 5\%$; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 20.

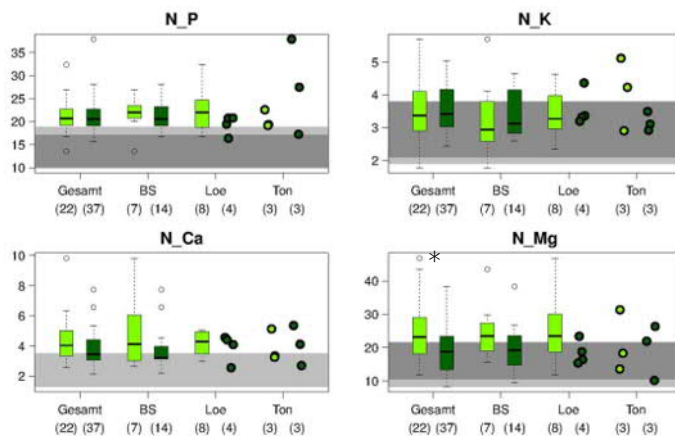


Abbildung 111: Kalkungsvergleich für Buche in Hessen. Elementverhältnisse in Buchenblättern (BZE II). Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und ungekalkte (hellgrün) Buchen der Kalkungskulisse. Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$; bei 4 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Irrtumswahrscheinlichkeit: $* p < 5 \%$; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 20.

Tabelle 23: Zuordnung [Anteil in %] der gekalkten und ungekalkten BZE II-Buchenpunkte nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

		Anteil [%] an gekalkten (n = 37) und ungekalkten (n = 22) BZE II-Punkten mit Buche					
Element	unter der Symptomgrenze = Mangel		unter Normalbereich = latenter Mangel		im/über Normalbereich		
	gekalkt	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt	
N	-	4	3	-	97	96	
P	11	14	62	36	27	50	
K	8	4	30	14	62	82	
Ca	5	5	8	27	87	68	
Mg	3	14	24	32	73	54	
S	16	9	49	32	35	59	
Fe	-	-	-	-	100	100	
Mn	-	-	-	-	100	100	
Zn	-	-	8	18	92	82	
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse						
	gekalkt			ungekalkt			
N/P	8			9			
N/K	70			68			
N/Ca	51			41			
N/Mg	49			41			

7.3.1.2 Zeitliche Veränderungen

Für die Buchenflächen des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings (s. Tab. 24) sind in Tabelle 25 die Elementgehalte (Median) und deren zeitliche Trends aufgeführt. Zum Vergleich sind auch die Elementgehalte der BZE II genannt. Im Mittel lagen die Elementgehalte und auch die Stickstoffquotienten für die Intensivflächen und für die BZE II-Stichprobe (mit Ausnahme der Magnesiumgehalte und des N/Mg-Quotienten) in vergleichbarer Höhe.

Die Schwefelgehalte (Median) befanden sich für beide Buchenkollektive im latenten Mangel. Die Phosphorgehalte erreichten auf den Flächen des Intensiven Monitorings exakt den Grenzwert (1,20 mg/g) zum latenten Mangel, an BZE II-Punkten lag der Median im Bereich latenten Mangels. Zusätzlich wurde für beide Elemente auf den Intensivmessflächen eine Abnahme im Untersuchungszeitraum (1995-2008) festgestellt. Die N/P-Quotienten zeigten in beiden Kollektiven eine unausgewogene Ernährungssituation.

Die Kalium-, Calcium- und Eisengehalte waren im Normalbereich angesiedelt, die Magnesiumgehalte lagen auf den Intensivflächen über dem Normalbereich. Für

alle vier Elemente wurden abnehmende Blattgehalte ermittelt. Für Stickstoff und Mangan zeigte sich kein Trend. Ein Trend für die Zinkgehalte wurde nicht berechnet, da Zink nicht in allen Jahren analysiert wurde. Die Stickstoffquotienten stiegen an, d. h. die Elementverhältnisse wurden ungünstiger.

Table 24: *Standortsinformationen zu den Buchenflächen des Intensiven Monitorings in Hessen*

Fläche	Substrat	Kalkung	Trophie	Wasserhaushalt	Höhe (ü. NN)
Hünfeld	Lehm	unklar	mesotroph	frisch	410 m
Kalbach	Buntsandstein	nein	mesotroph	frisch	440 m
Kirchhain	Basalt mit Lösslehm	nein	eutroph	frisch	330-375 m
Spessart	Buntsandstein	ja	mesotroph	frisch	401-450 m
Weilburg	Bimsüberschüttungen über Schieferton	nein	mesotroph	betont frisch	330-375 m
Zierenberg	Basalt	nein	eutroph	frisch bis betont frisch	415-470 m
Homburg/ Efze	Basalt, lösslehm- überlagert	nein	eutroph	betont frisch	351-400 m

Table 25: *Elementgehalte und Elementverhältnisse (Median) in Buchenblättern sowie deren Trends auf 7 Buchenflächen des Intensiven Monitorings in Hessen (1995-2008) sowie Mediane der BZE II-Buchenpunkte (n = 80)*

Elementgehalt [mg/g]			Trend	
	BZE II	Intensives Monitoring		
N	23,0	23,1		nicht signifikant
P	1,15	1,20	↓	**
K	6,65	6,31	↓	**
Ca	6,7	7,1	↓	**
Mg	1,26	1,75	↓	*
S	1,48	1,40	↓	***
Fe	0,089	0,089	↓	***
Mn	1,738	1,976		nicht signifikant
Zn	0,026	0,028		keinTrend berechnet
Elementverhältnis [mg/mg]			Trend	
	BZE II	Intensives Monitoring		
N/P	20,4	18,9	↑	***
N/K	3,5	3,6	↑	**
N/Ca	3,3	3,3	↑	**
N/Mg	19,2	13,5	↑	***

Trends: ↑ zunehmend, ↓ abnehmend.

Irrtumswahrscheinlichkeiten: * $p < 5\%$, ** $p < 1\%$, *** $p < 0,1\%$.

Farbloser Hintergrund: Elementgehalt (Median) liegt im bzw. über dem Normalbereich (GÖTTLEIN 2015).

Gelber Hintergrund: Elementgehalt (Median) liegt unter dem Normalbereich (latenter Mangel) bzw. Elementverhältnis (Median) liegt außerhalb der Grenzwerte für harmonische Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012) oder FLÜCKIGER u. BRAUN (2003)

Die Trends der Buchenflächen in Hessen ($n = 7$) und in Niedersachsen ($n = 8$) waren z. T. (Magnesium, Kalium) gegenläufig. Eine kausale Erklärung für dieses Bild lässt sich angesichts der geringen Zahl von Flächen und der Vielzahl von Einflussfaktoren nicht finden.

7.3.2 Fichte

Die Fichte ist mit einem Flächenanteil von 22 % die zweithäufigste Baumart in Hessen (HMUKLV 2014). In der BZE II-Stichprobe ist sie am häufigsten auf Buntsandstein ($n = 24$), Basalt/Diabas ($n = 10$), Lösslehm ($n = 10$) und Tonschiefer ($n = 8$) vertreten (s. Tab. 20).

Auch für die Fichte lagen die Stickstoffgehalte (Median 16,8 mg/g) in Hessen niedriger als der Drei-Länder-Mittelwert (17,2 mg/g). Stickstoff war hessenweit überreichlich für die Fichten verfügbar, die Stickstoffgehalte lagen häufig (48 % der BZE II-Punkte mit Fichte) über dem Normalbereich. Unterschiede zwischen den Substratgruppen bestanden kaum (s. Abb. 112).

Die Phosphorversorgung der Fichten war weitgehend unkritisch. An 79 % der BZE II-Punkte lagen die Phosphorgehalte im Normalbereich oder darüber (s. Tab. 26). Am höchsten waren die Phosphorgehalte (Median) auf Basalt/Diabas, am niedrigsten auf Quarzit.

Auch für Calcium und Magnesium war die Versorgung der Fichten gut, 100 % bzw. 99 % der BZE II-Punkte mit Fichte lagen mindestens im Normalbereich.

Die Kaliumgehalte lagen in Hessen höher (Median 5,4 mg/g) als im Drei-Länder-Mittel (5,1 mg/g). Insgesamt entfielen 76 % der Fichtenproben in den Normalbereich oder darüber. Auf Tonschiefer lag der Median der Kaliumgehalte in den Fichtennadeln nur knapp über dem Grenzwert zum latenten Mangel. Die Aufteilung der Buntsandsteine in eine sandige und tonige Variante ergab im Gegensatz zur Buche keine Unterschiede in den Kaliumgehalten der Fichtennadeln.

Die Schwefelgehalte lagen substratunabhängig überwiegend (76 %) im Normalbereich. Für Eisen, Mangan und Zink lagen die Werte fast vollzählig (93-100 %) mindestens im Normalbereich. Beim Mangan wurde teilweise der Normalbereich überschritten.

Die Stickstoffquotienten (s. Abb. 113) zeigten für Calcium und Magnesium zu 87 bzw. 93 % harmonische Elementverhältnisse an, für N/P und N/K war dies nur bei 63 bzw. 64 % der Fall. Die N/K-Verhältnisse waren auf Tonschiefer am ungünstigsten. An einigen BZE II-Punkten befanden sich die N/Ca- und N/Mg-Quotienten unterhalb der harmonischen Bereiche, d. h. sie werden durch hohe Calcium- bzw. Magnesiumgehalte geprägt.

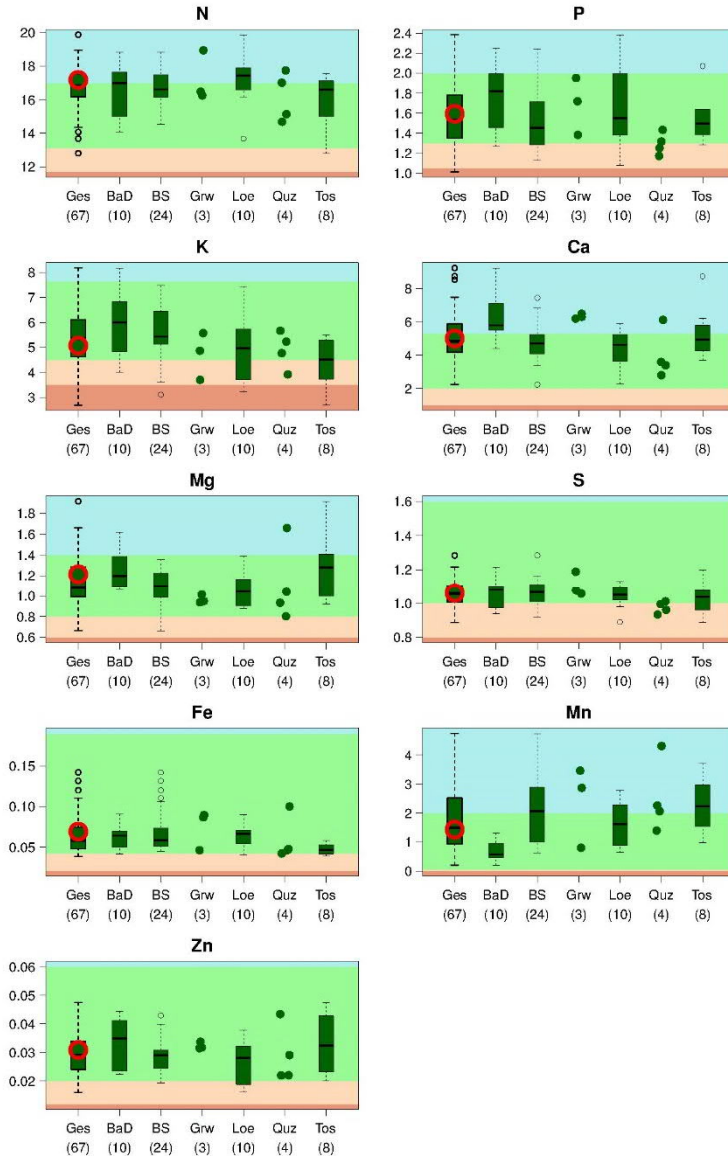


Abbildung 112: Elementgehalte [mg/g] in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang) (BZE II). Verteilung für die Fichte in Hessen insgesamt (n = 67) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn n ≥ 3; bei 3-4 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau = über Normalbereich, hellgrün = Normalbereich, hellrot = unter Normalbereich (latenter Mangel), rot = unter der Symptommengrenze; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 20.

Tabelle 26: Zuordnung [Anteil in %] der 67 BZE II-Fichtenpunkte nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	unter der Symptombegrenze = Mangel	unter Normalbereich = latenter Mangel	im/über Normalbereich
N	-	1	99
P	1	20	79
K	6	18	76
Ca	-	-	100
Mg	-	1	99
S	-	24	76
Fe	-	7	93
Mn	-	-	100
Zn	-	7	93
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse		
N/P	63		
N/K	64		
N/Ca	87		
N/Mg	93		

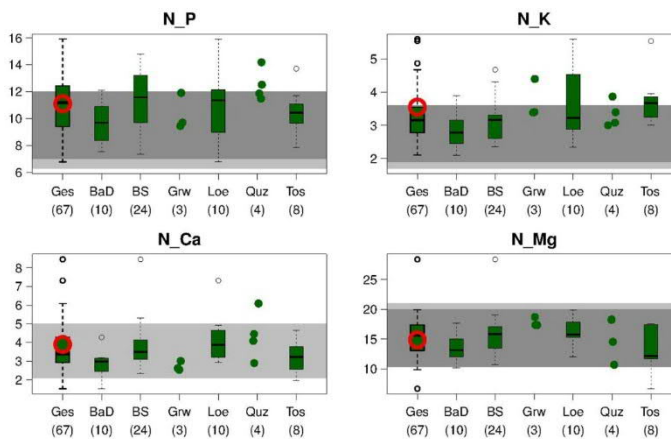


Abbildung 113: Elementverhältnisse in Fichtennadeln (1. Nadeljabrgang) (BZE II). Verteilung für die Fichte in Hessen insgesamt ($n = 67$) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$, bei 3-4 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. 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; Abkürzungen s. Tab. 20.

33 % der BZE II-Fichtenpunkte zeigten weder (latente) Mangelwerte für die Hauptnährelemente noch unausgewogene Stickstoffquotienten. Für 60 % der Punkte wurden latenter Mangel an mindestens einem Hauptnährelement und/oder unausgewogene Elementverhältnisse festgestellt. Ausschlaggebend hierfür waren in erster Linie Defizite an Phosphor und Kalium sowie ungünstige N/P- und N/K-Quotienten in den Fichtennadeln. Latenter Schwefelmangel allein war an keinem BZE II-Fichtenpunkt festzustellen. An 7 % der Fichtenpunkte lagen ein oder mehrere Hauptnährelemente unter der Symptommgrenze (= Mangel).

7.3.2.1 Kalkungsvergleich

Der Kalkungsvergleich zeigte für die Fichte meist keine eindeutigen Unterschiede bei den Nährelementgehalten und den Stickstoffquotienten. Nur die Eisengehalte waren an den gekalkten BZE II-Fichtenpunkten signifikant niedriger als an den ungekalkten Punkten (s. Abb. 114). Die Phosphorgehalte waren tendenziell auf den gekalkten BZE II-Punkten gegenüber den ungekalkten besser. Dies kam auch in einem günstigeren N/P-Verhältnis für die gekalkten Punkte zum Ausdruck (s. Abb. 115 und Tab. 27). Dagegen waren die Kaliumgehalte an den gekalkten BZE II-Punkten tendenziell niedriger als an den ungekalkten.

Tabelle 27: Zuordnung [Anteil in %] der gekalkten und ungekalkten BZE II-Fichtenpunkte nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003) und MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

		Anteil [%] an gekalkten (n=36) und ungekalkten (n=15) BZE II-Punkten mit Fichte					
Element	unter der Symptommgrenze = Mangel		unter Normalbereich = latenter Mangel		im/über Normalbereich		
	gekalkt	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt	
N	-	-	3	-	97	100	
P	3	-	16	40	81	60	
K	8	-	20	20	72	80	
Ca	-	-	-	-	100	100	
Mg	-	-	3	-	97	100	
S	-	-	22	33	78	67	
Fe	-	-	11	-	89	100	
Mn	-	-	-	-	100	100	
Zn	-	-	8	7	92	93	
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse						
	gekalkt			ungekalkt			
N/P	64			47			
N/K	56			73			
N/Ca	83			93			
N/Mg	92			100			

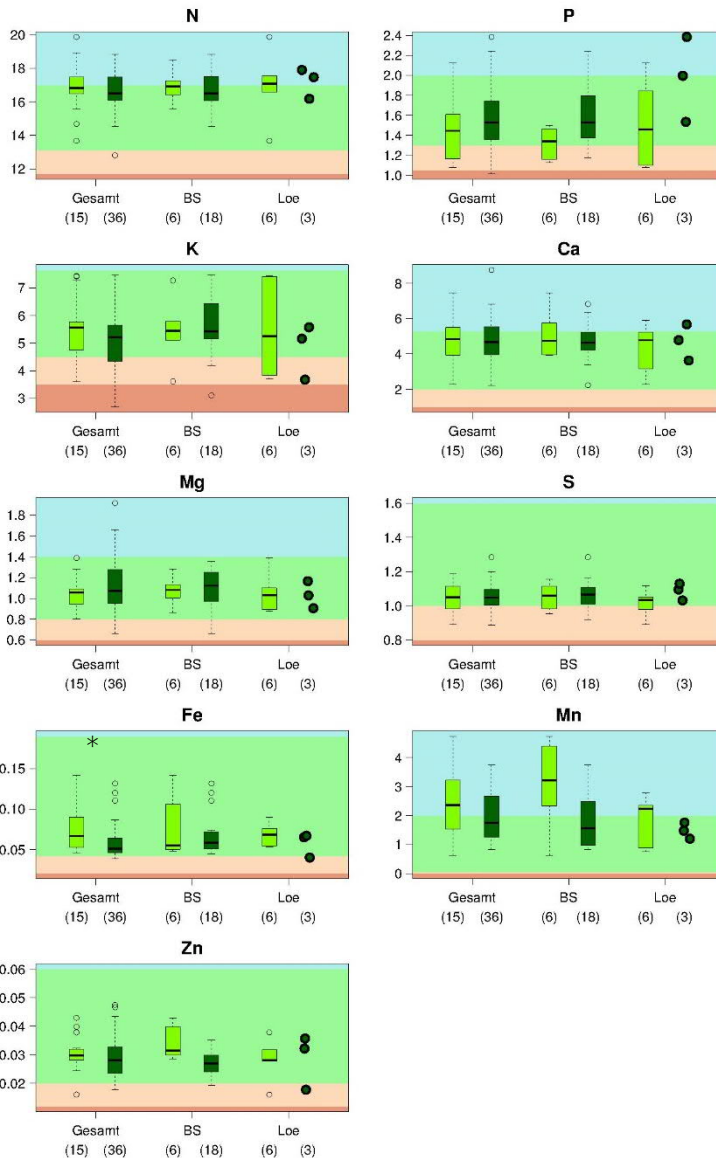


Abbildung 114: Kalkungsvergleich für Fichte in Hessen. Elementgehalte [mg/g] in Fichtennadeln (BZE II). Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und ungekalkte (hellgrün) Fichten der Kalkungskulisse. Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$, bei 3 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau = über Normalbereich, hellgrün = Normalbereich, hellrot = unter Normalbereich (latenter Mangel), rot = unter der Symptombegrenze; Irrtumswahrscheinlichkeiten: * $p < 5\%$; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang; BS = Buntsandstein, Loe = Lösslehm.

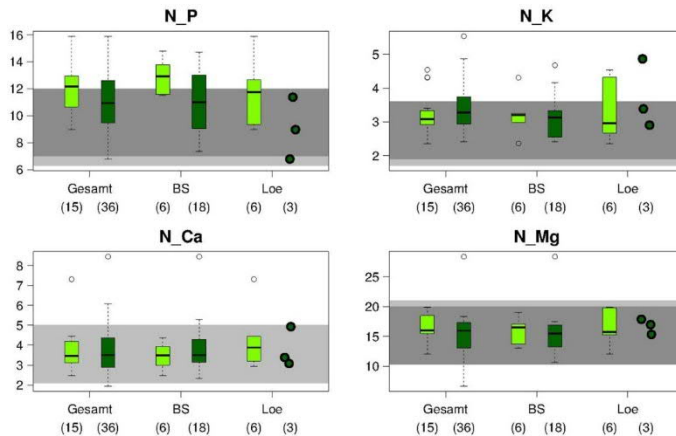


Abbildung 115: Kalkungsvergleich für Fichte in Hessen. Elementverhältnisse in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang) (BZE II). Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und nicht gekalkte (hellgrün) Fichten der Kalkungskulisse. Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$. Bei 3 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Dunkelgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach FLÜCKIGER u. BRAUN (2003), hellgrau: Bewertung harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang; BS = Buntsandstein, Loe = Lösslehm.

7.3.2.2 Vergleich 1. und 3. Nadeljahrgang

Magnesium gehört zu den Elementen, die in der Pflanze leicht verlagert werden. Nach REEMTSMA (1986) findet bei einem Engpass in der Mg-Versorgung eine Verlagerung von Magnesium aus den älteren in den jüngsten Nadeljahrgang statt. Dies äußert sich in geringeren Gehalten in älteren Nadeln (s. Tab. 28).

Eine Einstufung der Magnesiumversorgung an den BZE II-Punkten mit Fichte nach REEMTSMA (1986) ergab folgendes Bild: 54 % der BZE II-Punkte fielen in die Kategorie „gute bis reichliche Versorgung“ bzw. „mangelfreie Ernährung“. Hierzu gehörten die Fichten auf Basalt/Diabas. 46 % der Fichtenpunkte entfielen auf die Kategorie „zunehmender Mangel“. Die Bewertung nach REEMTSMA (1986) zeigt damit ein differenzierteres Bild als die in Tabelle 26 dargestellte Bewertung, wonach sich 99 % der Fichtenpunkte als ausreichend mit Magnesium versorgt erwiesen.

Auf den gekalkten BZE II-Fichtenpunkten in Hessen war nach REEMTSMA (1986) an 19 von 36 Fichtenpunkten (53 %) die Magnesiumversorgung „gut bis reichlich“ bzw. „mangelfrei“. Bei den ungekalkten Fichtenpunkten entfielen nur vier von 15 Fichtenpunkten (27 %) in diese Gruppe.

Tabelle 28: 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. Oder: 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

7.3.2.3 Vergleich BZE II (2007) und Bionetz (1982/1983)

In den Jahren 1982 und 1983 wurde eine systematische Stichprobenerhebung zu den Nadelinhaltsstoffen der Fichte in Hessen im 8 x 8 km-Rasternetz der WZE/BZE-Stichprobe durchgeführt. Allerdings wurde nicht die am Sollmesspunkt angetroffene Bestockung beprobt, sondern der dem Sollmesspunkt nächstgelegene 61- bis 80-jährige Fichtenbestand mit einer Mindestfläche von 0,5 ha (Bionetz). An 147 Aufnahmepunkten wurden je drei Fichten gefällt und Nadelproben entnommen. Der Schwerpunkt der Erhebung war der 2. Nadeljahrgang, dieser wurde an allen 147 Erhebungspunkten analysiert, zusätzlich wurde an 19 Erhebungspunkten der 1. Nadeljahrgang analysiert (GÄRTNER et al. 1990). Die 19 Bionetzproben des 1. Nadeljahrganges stammen aus dem Jahr 1983. Aufgrund der geringen Anzahl der Beprobungen des 1. Nadeljahrganges 1983 ist auch der wesentlich umfangreichere Datensatz des 2. Nadeljahrganges dargestellt (s. Abb. 116).

Die Ergebnisse für den 1. Nadeljahrgang zeigten eine nicht signifikante Zunahme der Stickstoffgehalte zwischen der Bionetzerhebung und der BZE II.

Die Vergleichbarkeit der Labormethoden für die Phosphorgehalte zu beiden Erhebungszeitpunkten konnte nicht eindeutig geklärt werden, sodass diese Ergebnisse nicht weiter diskutiert werden.

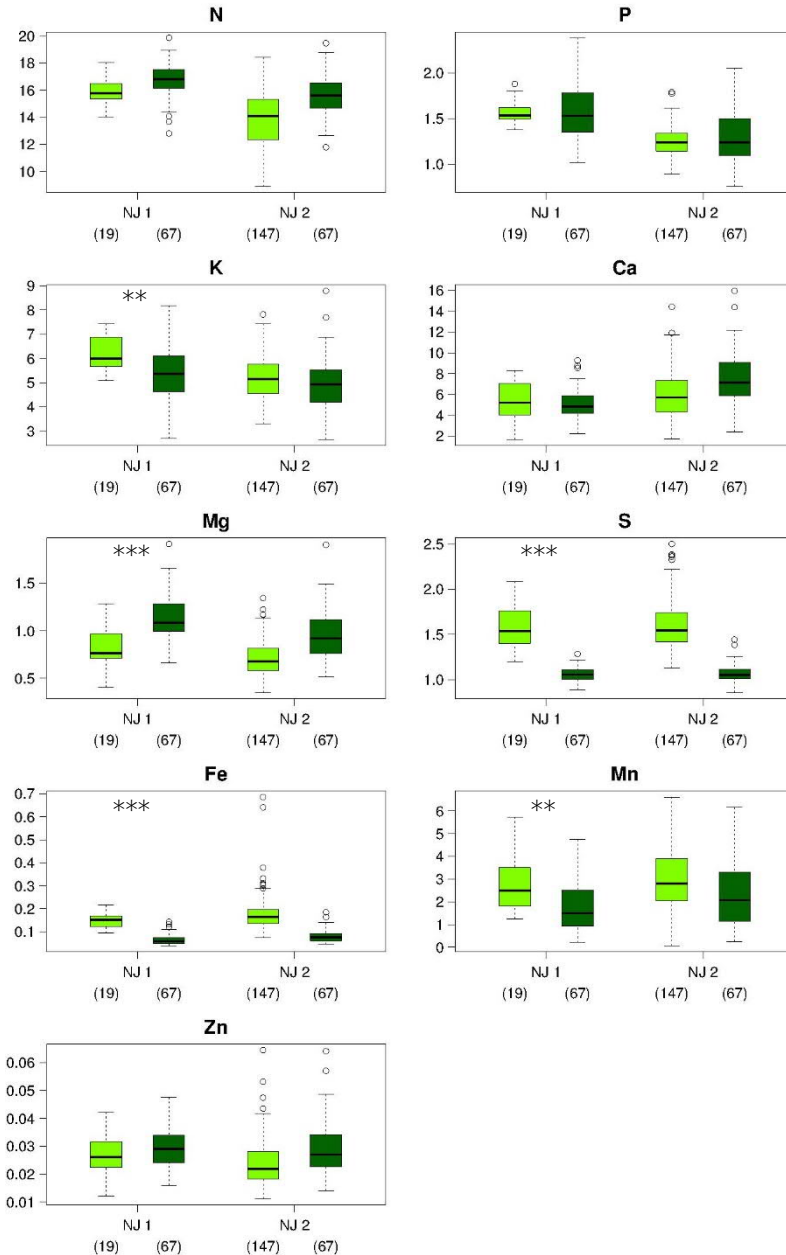


Abbildung 116: Elementgehalte [mg/g] in Fichtennadeln (1. und 2. Nadeljabrgang, NJ 1 und NJ 2) 1982/1983 (Bionetz, hellgrün) und 2007 (BZE II, dunkelgrün) in Hessen; Irrtumswahrscheinlichkeiten: * $p < 1\%$, *** $p < 0,1\%$; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang

Die Kaliumgehalte waren 2007 gegenüber 1983 niedriger. Zum Zeitpunkt der BZE II befanden sich an rund einem Viertel der BZE II-Fichtenpunkte die Kaliumgehalte unter dem Normalbereich.

Für Calcium und Zink wurden zwischen 1983 und 2007 im 1. Nadeljahrgang keine Unterschiede festgestellt. Zu beiden Zeitpunkten lagen die Gehalte im Normalbereich und die N/Ca-Quotienten (s. Abb. 117) zeigten harmonische Verhältnisse.

1983 lag der Median der Magnesiumgehalte unter dem Normalbereich (latenter Mangel), 2007 zeichnete sich gegenüber 1983 eine Verbesserung ab.

Eine besonders starke Abnahme der Gehalte wurde für Schwefel festgestellt, sodass 2007 ein Viertel der beprobten Fichten Schwefelgehalte unter dem Normalbereich aufwies. Auch für Eisen und Mangan wurden bei der BZE II niedrigere Gehalte gemessen als bei der Bionetzerhebung, Mangelgrenzen wurden selten unterschritten.

Die N/K-Quotienten waren 2007 ungünstiger als 1983, die N/Mg-Quotienten dagegen günstiger (s. Abb. 117).

Die Nadelinhaltsstoffe des 1. und 2. Nadeljahrgangs zeigten für die Nährelemente und die Stickstoffquotienten gleichgerichtete Tendenzen.

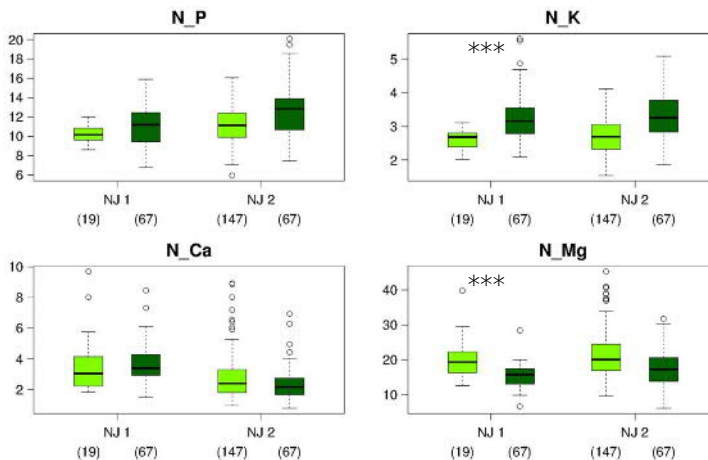


Abbildung 117: Elementverhältnisse in Fichtennadeln für den 1. und 2. Nadeljahrgang (NJ 1 und NJ 2) 1982/1983 (Bionetz, hellgrün) und 2007 (BZE II, dunkelgrün) in Hessen. Irrtumswahrscheinlichkeit: *** $p < 0,1\%$. Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang

7.3.3 Kiefer

Die Kiefer nimmt 10 % der Waldfläche in Hessen ein (HMUKLV 2014). Im Bergland stockt sie vorwiegend auf Buntsandstein ($n = 15$) und Lösslehm ($n = 6$), im Tiefland auf unverlehmtem Sand ($n = 8$) (s. Tab. 20).

Die Stickstoffgehalte der Kiefer (Median 17,8 mg/g) lagen niedriger als der Drei-Länder-Mittelwert (18,4 mg/g), aber auch in Hessen lagen die Stickstoffgehalte für die Kiefer vorwiegend (66 %) über dem Normalbereich (s. Abb. 118).

Die Phosphorgehalte lagen für die hessischen Kiefern (Median 1,4 mg/g) unter dem Drei-Länder-Mittelwert (1,5 mg/g). Die Kiefern auf Buntsandstein befanden sich überwiegend im Bereich latenten Phosphormangels.

Auch die Kaliumgehalte lagen für die Kiefer in Hessen mit 5,0 mg/g (Median) vergleichsweise niedrig (Drei-Länder-Mittelwert 5,7 mg/g), Unterschreitungen des Normalbereichs kamen aber nur selten vor.

Mit Calcium, Eisen und Zink waren die Kiefern in Hessen gut versorgt. Auffällig war die Überversorgung mit Mangan, 64 % der BZE II-Kiefernpunkte befanden sich über dem Normalbereich.

Die Magnesiumgehalte lagen dagegen nur auf 62 % der BZE II-Kiefernpunkte im Normalbereich oder höher (s. Tab. 29), am niedrigsten (Median) waren sie auf Buntsandstein, am höchsten auf Zechstein/Rotliegendes.

Schwefeldefizite kamen selten vor (8 %).

Kiefern auf Buntsandstein zeigten unausgewogene N/P- und N/Mg-Quotienten (s. Abb. 119). Auf Lösslehm waren die N/Mg-Verhältnisse der Kiefer ebenfalls unausgewogen. Disharmonische N/Ca-Quotienten entstanden vor allem aufgrund hoher Calciumgehalte in den Kiefernadeln.

Ohne Mangel an Hauptnährelementen und mit ausgewogenen Stickstoffquotienten wurden 36 % der BZE II-Kiefernpunkte eingestuft, 60 % der Kiefernpunkte fielen für ein oder mehrere Hauptnährelemente in den Bereich latenten Mangels bzw. wiesen unharmonische Stickstoffquotienten auf. Etwa ein Drittel der Kiefern zeigten Defizite an Phosphor und/oder Magnesium. An zwei BZE II-Kiefernpunkten in Hessen wurden für Magnesium bzw. für Schwefel Werte unterhalb der Symptommgrenze (= Mangel) festgestellt.

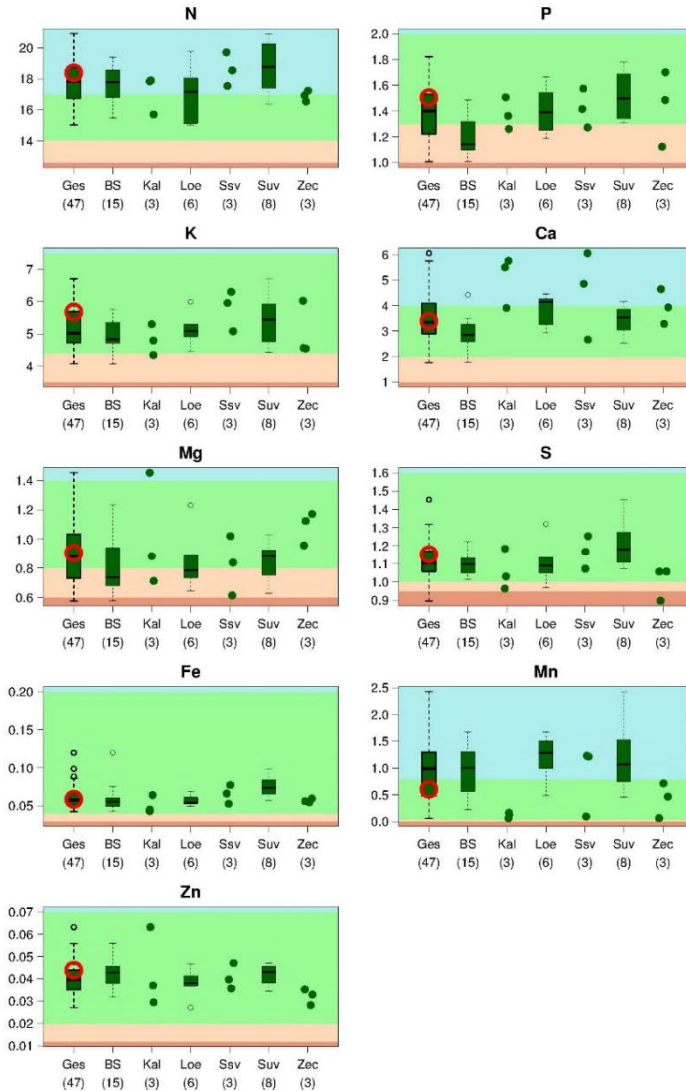


Abbildung 118: Elementgehalte [mg/g] in Kiefernnadeln (1. Nadeljahrgang) (BZE II). Verteilung für die Kiefer in Hessen insgesamt ($n = 47$) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$, bei 3 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau = über Normalbereich, hellgrün = Normalbereich, hellrot = unter Normalbereich (latenter Mangel), rot = unter der Symptomgrenze; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 20.

Tabelle 29: Zuordnung [Anteil in %] der 47 BZE II-Kiefernpunkte nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	unter der Symptombegrenze = Mangel	unter Normalbereich = latenter Mangel	im/über Normalbereich
N	-	-	100
P	-	36	64
K	-	6	94
Ca	-	4	96
Mg	2	36	62
S	2	6	92
Fe	-	-	100
Mn	-	-	100
Zn	-	-	100
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse		
N/P	68		
N/K	87		
N/Ca	87		
N/Mg	62		

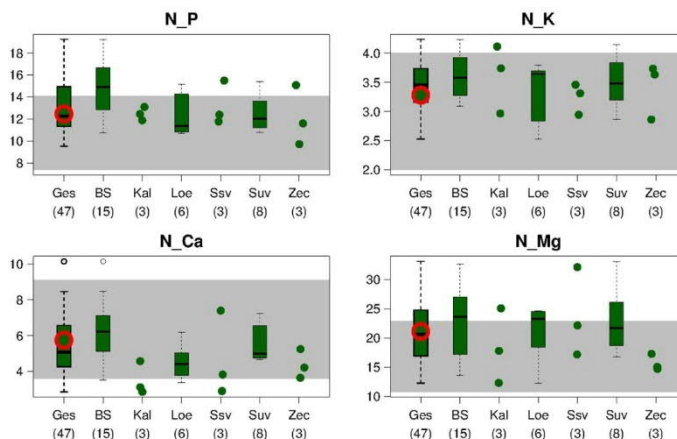


Abbildung 119: Elementverhältnisse in Kiefernadeln (1. Nadeljabrgang) (BZE II). Verteilung für die Kiefer in Hessen insgesamt (n = 47) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn n ≥ 3, bei 3 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 20.

7.3.3.1 Kalkungsvergleich

Für den Kalkungsvergleich bei der Kiefern konnte nur die Substratgruppe Bunt-sandstein separat ausgewertet werden.

Die gekalkten BZE II-Kiefernpunkte zeichneten sich insbesondere durch höhere Phosphor- und Magnesiumgehalte sowie verbesserte N/P- und N/Mg-Verhältnisse gegenüber den ungekalkten Kiefernpunkten aus (s. Abb. 120 und Abb. 121). Die höheren Phosphorgehalte erwiesen sich trotz der relativ geringen Stichprobenanzahl als signifikant. Von den gekalkten BZE II-Kiefernpunkten wiesen 67 % Magnesiumgehalte im Normalbereich auf (s. Tab. 30), bei den ungekalkten Punkten waren es dagegen nur 33 %. Ähnliches gilt für die Phosphorgehalte: 61 % der gekalkten Kiefernpunkte entfielen in den Normalbereich, bei den ungekalkten Punkten waren es nur 33 %.

Für Stickstoff, Kalium, Calcium, Schwefel und Eisen waren keine Unterschiede feststellbar. Mangan und Zink zeigten eine Tendenz zu niedrigeren Gehalten auf gekalkten Kiefernpunkten, wobei sich die Mangangehalte in beiden Kollektiven über dem Normalbereich befanden.

Tabelle 30: Zuordnung [Anteil in %] der gekalkten und ungekalkten BZE-Kiefernpunkte nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Anteil [%] an gekalkten (n = 18) und ungekalkten (n = 9) BZE II-Punkten mit Kiefer						
Element	unter der Symptomgrenze = Mangel		unter Normalbereich = latenter Mangel		im/über Normalbereich	
	gekalkt	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt
N	-	-	-	-	100	100
P	-	-	39	67	61	33
K	-	-	6	11	94	89
Ca	-	-	11	-	89	100
Mg	-	-	33	67	67	33
S	-	-	6	11	94	89
Fe	-	-	-	-	100	100
Mn	-	-	-	-	100	100
Zn	-	-	-	-	100	100
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse					
	gekalkt			ungekalkt		
N/P	67			44		
N/K	83			100		
N/Ca	89			89		
N/Mg	67			33		

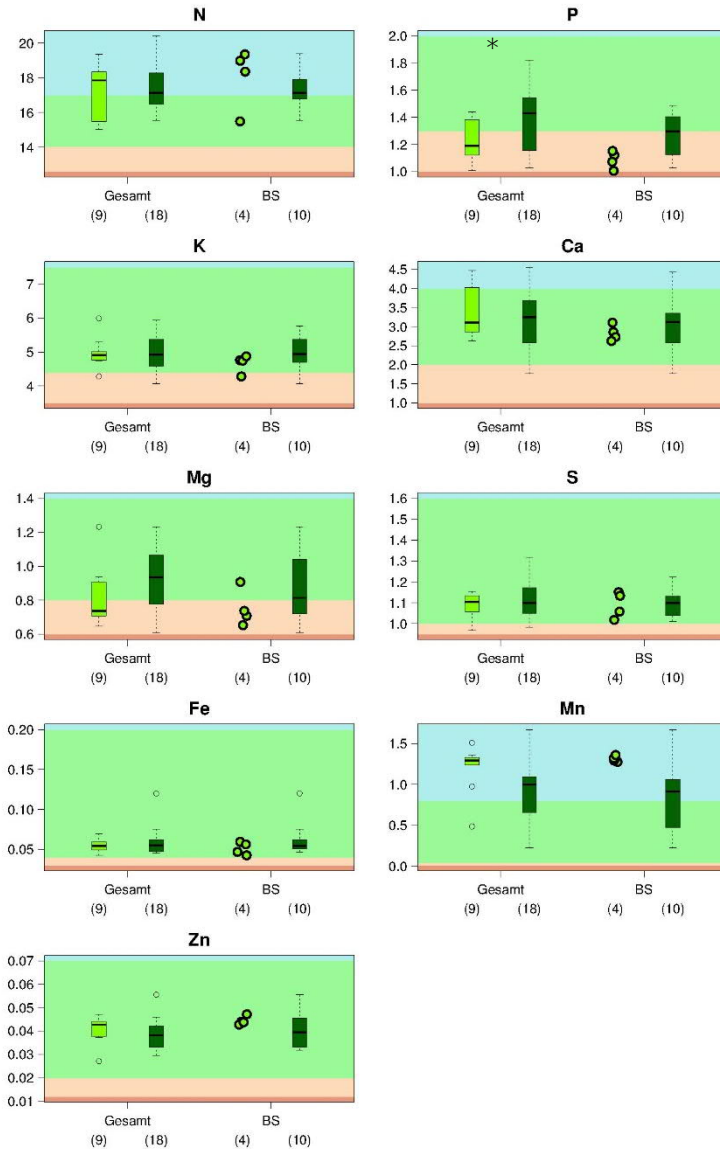


Abbildung 120: Kalkungsvergleich für Kiefer in Hessen. Elementgehalte [mg/g] in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang) (BZE II). Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und ungekalkte (hellgrün) Kiefern der Kalkungskulisse und auf Buntsandstein (BS). Bei 4 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau = über Normalbereich, hellgrün = Normalbereich, hellrot = unter Normalbereich (latenter Mangel), rot = unter der Symptomgrenze; Irrtumswahrscheinlichkeiten: * $p < 5\%$. Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang.

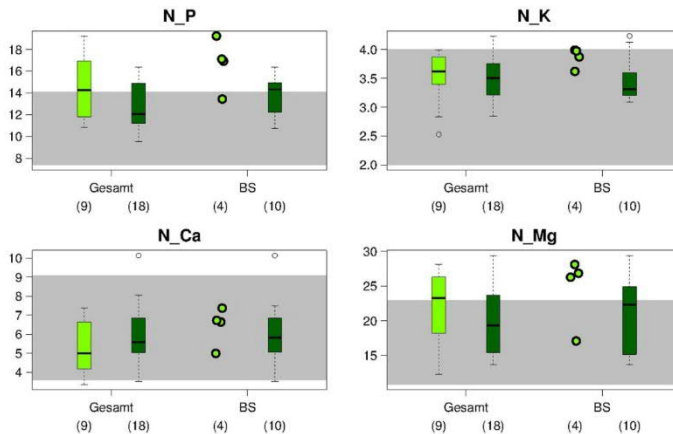


Abbildung 121: Kalkungsvergleich für Kiefer in Hessen. Elementverhältnisse in Kiefernadeln (1. Nadeljahrgang) (BZE II). Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und ungekalkte (hellgrün) Kiefern der Kalkungskulisse und auf Buntsandstein (BS). Bei 4 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang.

7.3.4 Eiche

Die Eiche nimmt einen Anteil von 14 % an der Waldfläche in Hessen ein (HMUKLV 2014). Die 44 BZE II-Punkte mit Eiche verteilen sich im Wesentlichen auf sechs Substratgruppen, die jeweils nur schwach besetzt sind (s. Tab. 20).

Wie bei Buche, Fichte und Kiefer waren die Stickstoffgehalte auch bei der Eiche (s. Abb. 122) in Hessen (Median 26,3 mg/g) niedriger als der Drei-Länder-Mittelwert (27,6 mg/g). Die Mehrzahl der Eichen (55 %) an den BZE II-Punkten wiesen aber Stickstoffgehalte über dem Normalbereich auf.

Von allen untersuchten Nährelementen trat bei der Eiche eine Unterversorgung mit Phosphor am häufigsten auf, die Phosphorgehalte befanden sich nur zu 68 % im Normalbereich (s. Tab. 31).

Die Kaliumgehalte der Eichen lagen zu 95 % mindestens im Normalbereich, die Calciumgehalte zu 86 % und die Magnesiumgehalte zu 87 %. Auch mit Schwefel, Eisen und Zink waren die Eichen in der Regel gut versorgt. Die Mangangehalte in den Eichenblättern waren mit Medianen über dem Normalbereich sehr hoch, nur die Manganwerte der Eichen auf Basalt/Diabas befanden sich im Normalbereich. Bei den Stickstoffquotienten waren vor allem die N-Quotienten auf unverlehmttem Sand mit unausgewogenen Verhältnissen auffällig (s. Abb. 123).

Obwohl die Kaliumgehalte eine gute Versorgung anzeigten, entfielen die N/K-Verhältnisse bei einem Drittel der Eichen in den unausgewogenen Bereich

(s. Tab. 31). Auch die N/P-Quotienten zeigten für rund ein Drittel der Eichen un-
ausgewogene Verhältnisse an.

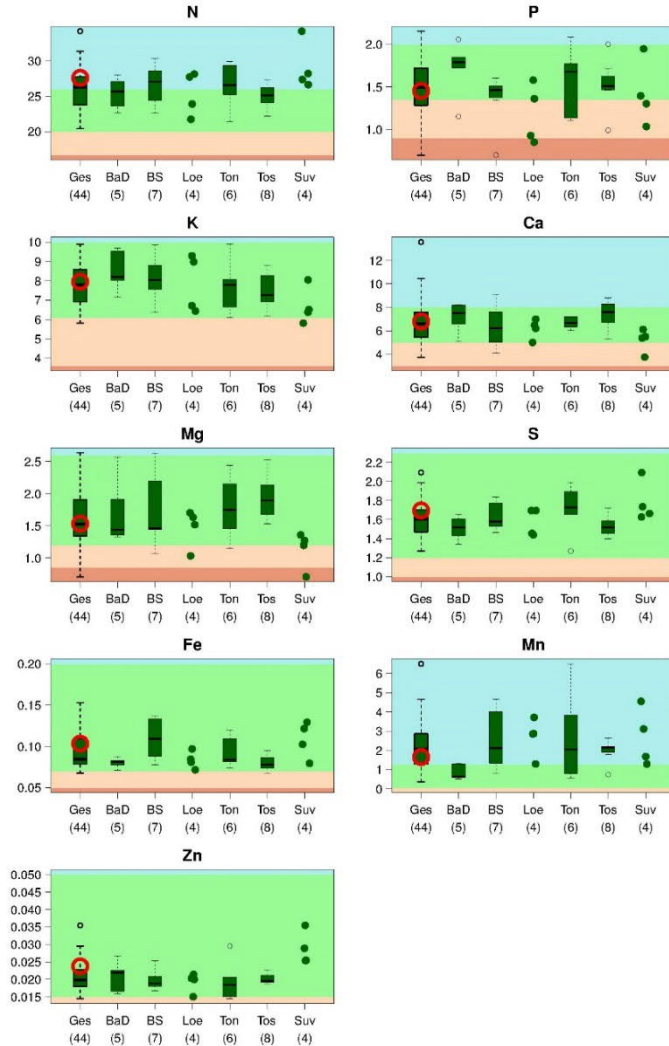


Abbildung 122: Elementgehalte [mg/g] in Eichenblättern (BZE II). Verteilung für die Eiche in Hessen insgesamt ($n = 44$) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$, bei 4 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau = über Normalbereich, hellgrün = Normalbereich, hellrot = unter Normalbereich (latenter Mangel), rot = unter der Symptomgrenze. Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang, Abkürzungen s. Tab. 20.

Tabelle 31: Zuordnung [Anteil in %] der 44 BZE II-Eichenpunkte nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Element	unter der Symptomen- grenze = Mangel	unter Normalbereich = latenter Mangel	im/über Normalbereich
N	-	-	100
P	5	27	68
K	-	5	95
Ca	-	14	86
Mg	2	11	87
S	-	-	100
Fe	-	2	98
Mn	-	-	100
Zn	-	7	93
Element- verhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse		
N/P	61		
N/K	64		
N/Ca	82		
N/Mg	82		

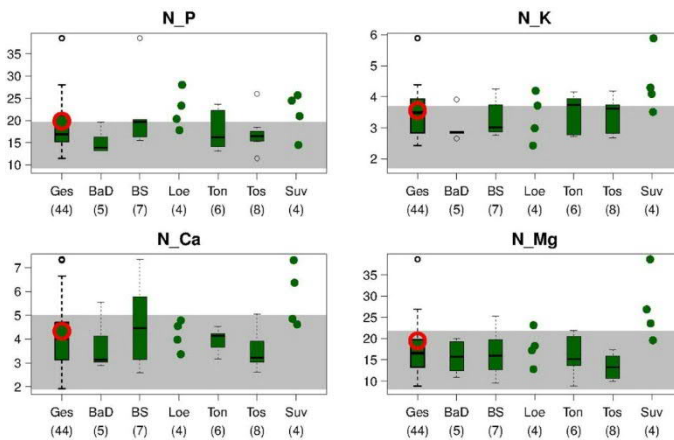


Abbildung 123: Elementverhältnisse in Eichenblättern (BZE II). Verteilung für die Eiche in Hessen insgesamt (n = 44) sowie der Drei-Länder-Mittelwert (roter Kreis). Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn n ≥ 3. Bei 4 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang; Abkürzungen s. Tab. 20.

41 % der BZE II-Eichenpunkte waren ausreichend und ausgewogen mit den Hauptnährelementen versorgt. 52 % zeigten latenten Mangel für mindestens ein Hauptnährelement und/oder unausgewogene Elementverhältnisse. Hierbei spielten vor allem kritische Phosphorgehalte eine Rolle. An drei Eichenpunkten lagen die Blattgehalte für Phosphor oder Magnesium unter der Symptommgrenze (= Mangel).

7.3.4.1 Kalkungsvergleich

Beim Vergleich gekalkter (n = 14) und ungekalkter (n = 14) BZE II-Eichenpunkte sind keine eindeutigen Unterschiede für Stickstoff, Schwefel, Eisen, Mangan und Zink aufgetreten (s. Abb. 124). Die Phosphorgehalte waren auf den gekalkten Standorten tendenziell höher als auf den ungekalkten (s. Abb. 124 und Tab. 32), bei den Kaliumgehalten war es umgekehrt. Die Calcium- und Magnesiumgehalte waren auf den gekalkten BZE II-Punkten signifikant höher als auf den ungekalkten, dies zeigte sich auch in niedrigeren N/Ca- und N/Mg-Quotienten (s. Abb. 125).

Tabelle 32: Zuordnung [Anteil in %] der gekalkten und ungekalkten BZE II-Eichenpunkte nach Elementen zu den Bewertungsbereichen nach GÖTTLEIN (2015) und Anteil [%] mit harmonischem Elementverhältnis nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012)

Anteil (%) an gekalkten (n = 14) und ungekalkten (n = 14) BZE II-Punkten mit Eiche						
Element	unter der Symptommgrenze = Mangel		unter Normalbereich = latenter Mangel		im/über Normalbereich	
	gekalkt	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt	gekalkt	ungekalkt
N	-	-	-	-	100	100
P	-	14	21	21	79	65
K	-	-	-	7	100	93
Ca	-	-	14	14	86	86
Mg	-	-	-	21	100	79
S	-	-	-	-	100	100
Fe	-	-	7	-	93	100
Mn	-	-	-	-	100	100
Zn	-	-	7	14	93	86
Elementverhältnis	innerhalb harmonischer Elementverhältnisse					
	gekalkt			ungekalkt		
N/P	79			50		
N/K	64			64		
N/Ca	79			93		
N/Mg	100			79		

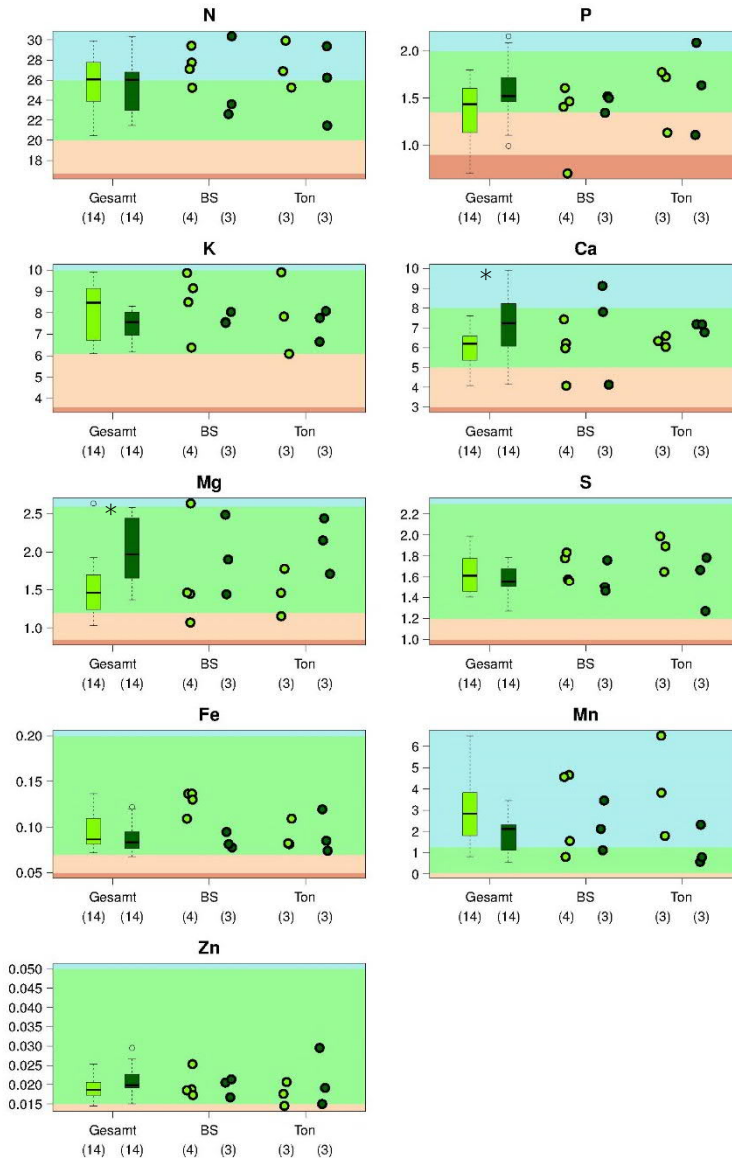


Abbildung 124: Kalkungsvergleich für Eiche in Hessen. Elementgehalte [mg/g] in Eichenblättern (BZE II). Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und ungekalkte (hellgrün) Eichen der Kalkungskulisse. Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$, bei 3-4 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Bewertung nach GÖTTLEIN (2015): blau = über Normalbereich, hellgrün = Normalbereich, hellrot = unter Normalbereich (latenter Mangel), rot = unter der Symptombegrenze, Irrtumswahrscheinlichkeit: $* p < 5\%$; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang; BS = Buntsandstein, Ton = Ton(stein).

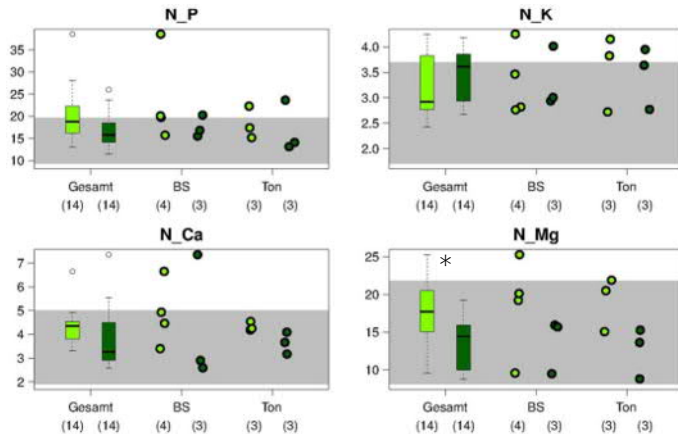


Abbildung 125: Kalkungsvergleich für Eiche in Hessen. Elementverhältnisse in Eichenblättern (BZE II). Verteilung für gekalkte (dunkelgrün) und ungekalkte (hellgrün) Eichen der Kalkungskulisse. Darstellung für einzelne Substratgruppen, wenn $n \geq 3$, bei 3-4 BZE-Punkten: Darstellung der Einzelwerte als Punkte. Hellgrau: Bereich harmonischer Elementverhältnisse nach MELLERT u. GÖTTLEIN (2012), weiß: Elementverhältnisse unausgewogen. Irrtumswahrscheinlichkeit: * $p < 5\%$; Zahlen in Klammern = Stichprobenumfang; BS = Buntsandstein, Ton = Ton(stein).

7.4 Einflussfaktoren auf die Ernährungssituation

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).

Um die Ergebnisse von Blatt- und Nadelanalysen für die Bewertung des Ernährungszustandes von Waldbeständen nutzen zu können, ist es sinnvoll, einige Einflussfaktoren durch standardisierte Probennahmen 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 nach der Arbeitsanleitung für die BZE II (WELLBROCK et al. 2006) stark reduzieren.

Die spezifischen Ernährungsansprüche der *Baumarten* wurden mit der Verwendung baumartenspezifischer Ernährungskennwerte berücksichtigt.

Die gemeinsame Auswertung der Waldernährungsdaten der BZE II in Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt führte zu dem Ergebnis, dass trotz großer *Altersspannen* der BZE II-Stichprobenbäume lediglich geringe Alterstrends für die Nähr-elementgehalte gefunden wurden. Aufgrund der relativ geringen Differenzierung der *Blatt- und Nadelgewichte* konnten auch diese bei der Bewertung der Ernährungssituation der BZE II unberücksichtigt bleiben.

Bei Einzelerhebungen bzw. diskontinuierlich erhobenen Waldernährungsdaten, wie sie bei der BZE II 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 Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt 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.

Die Wasserhaushaltsindikatoren an den BZE II-Punkten in Hessen und auf den Buchenflächen des Intensiven Monitorings ergaben, dass in den Jahren der Blatt- und Nadelentwicklung sowie im Probennahmezeitraum das Risiko für Trockenstress für die Waldbäume an den meisten Stichprobenpunkten und Buchenflächen sehr gering war. Die Ergebnisse der Blatt- und Nadelproben sind daher nicht durch extreme *Witterungsbedingungen* beeinflusst, sondern geben mittlere Verhältnisse wieder. Fruchtbildung sowie Insekten- und Pilzbefall waren im Probennahmejahr ebenfalls durchschnittlich ausgeprägt (PAAR et al. 2007). Insgesamt repräsentieren die Ergebnisse der Blatt- und Nadelanalyse 2007 in Hessen daher durchschnittliche Verhältnisse.

Die Einflüsse der *chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften* auf die Ernährungssituation der Bäume zeigten die bei der BZE II nach Substratgruppen differenzierten Auswertungen zur Ernährungssituation. Allerdings wurden die natürlichen Standortseigenschaften und damit die Ernährung der Waldbäume in den vergangenen Jahrzehnten und Jahrhunderten durch unterschiedliche Einflüsse modifiziert. Historische Waldnutzungen, anthropogene Stoffeinträge und die Waldkalkung haben zu weitreichenden ökosystemaren Veränderungen geführt.

Historische Waldnutzungen haben in Hessen 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).

Seit den 1960er-Jahren setzte mit den *Säureeinträgen* in die Wälder eine überregionale Beeinflussung der Ernährungssituation ein. Zunächst haben sich mit den Sulfat-schwefeleinträgen erhebliche chemische Veränderungen des Bodens vollzogen. Beträchtliche Säuremengen sind in den Böden gespeichert, außerdem wurde der

Eintrag basischer Stoffe (Calcium, Magnesium, Kalium) 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.

Rund 440.000 ha Wald wurden in Hessen seit Anfang der 1980er-Jahre *gekalket*, wobei ein Teil der Waldfläche inzwischen zweimal gekalkt wurde (ULLRICH et al. 2014). Hiermit war auch ein Ausgleich für die aufgrund der Versauerungsprozesse im Boden bedingten Nährstoffverluste beabsichtigt.

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 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. Gründe für die jährlichen Schwankungen des Stickstoffgehaltes könnten die mit dem Witterungsgeschehen variierende Streuzersetzung und Stickstoffmineralisierungsraten sein. In Trockenjahren ist die Aufnahme eingeschränkt. Starke jahreszeitliche Fluktuationen der Stickstoffgehalte in Blättern und Nadeln ermittelten auch ASCHE (1997) für Buche und EVERS (1972) für Fichte.

Ein ähnliches Bild wie auf den Flächen des Intensiven Monitorings zeigte sich für die Elementgehalte der Nadeln und Blätter an den BZE II-Punkten im Jahr 2007 (s. Abb. 126). Eine hohe Variabilität, dargestellt als Spannweite in % des Mittelwertes, zeigte sich übereinstimmend für die untersuchten Baumarten bei Calcium, Magnesium und Mangan, während Stickstoff, Phosphor, Kalium und Schwefel sehr viel geringere Schwankungsbreiten zeigten. Für Eisen und Zink unterschied sich die Variabilität für die Baumarten. Die höhere Variabilität der Calcium-, Magnesium- und Manganengehalte erklärt sich aus der Bedeutung der Standortverhältnisse für die Verfügbarkeit dieser Nährelemente. Die Stickstoffgehalte dagegen waren aufgrund

der überregional hohen Stickstoffdeposition und die im Beprobungsjahr einheitlichen Witterungsbedingungen nur wenig differenziert.

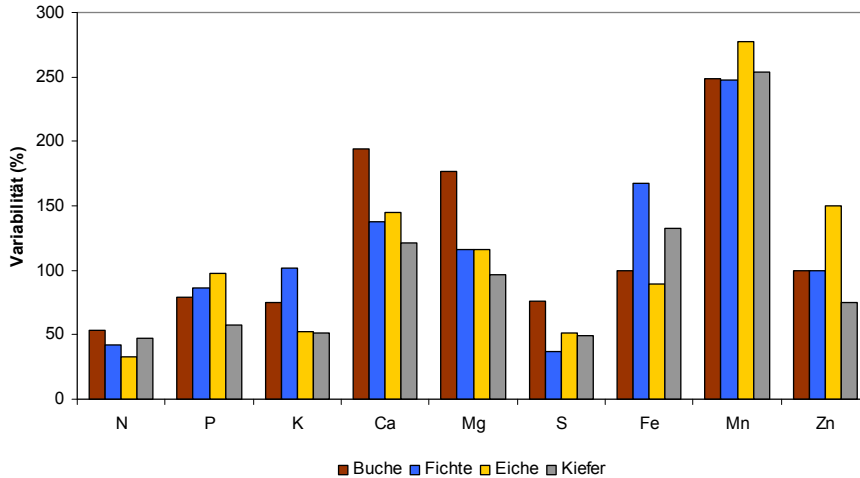


Abbildung 126: Variabilität der Blatt- und Nadelgehalte von Buche, Fichte (1. Nadeljahrgang), Eiche und Kiefer (1. Nadeljahrgang) (BZE II), Spannweite in % des Mittelwertes

7.5 Diskussion und Bewertung der Ernährungssituation

7.5.1 Buche

Am häufigsten zeigten sich Ernährungsschwächen im BZE II-Kollektiv bei der Buche. Fast alle Buchen der BZE II-Stichprobe zeigten Defizite bei den Hauptnährelementen und/oder unharmonische Stickstoffquotienten. Ausschlaggebend für die ungünstige Einstufung der Ernährungssituation war der weit verbreitete (latente) Phosphormangel. Die Buchen der BZE II-Stichprobe befanden sich 2007 zu 34 % im Bereich normaler Phosphorgehalte, zu 52 % im latenten Mangel und zu 14 % unterhalb der Symptommengengrenze (0,95 mg/g). 91 % der BZE II-Buchenpunkte wiesen disharmonische N/P-Quotienten auf.

Generell zeigten sich weitgehend von der Substratgruppe unabhängige Phosphorgehalte in den Buchenblättern. Auf Basalt/Diabas und Grauwacke waren die Phosphorgehalte tendenziell etwas höher. Dieser Befund überrascht, da zum einen der Eintrag von Phosphor auf dem Luftweg in die Wälder zu vernachlässigen ist (MOHREN et al. 1986) und zum anderen für die Verfügbarkeit von Phosphor, d. h. die Mobilisierung bzw. Fixierung von Phosphor, vor allem Bodeneigenschaften wie die Verwitterungsrate, der Versauerungsgrad und die biologische Aktivität des Bodens als bestimmende Faktoren genannt werden (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 CO₂-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 Verschlechterung 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. 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.

Geringe Phosphorgehalte 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 (52 %) im BZE II-Kollektiv befand sich im Bereich latenten Mangels, wo noch keine Wachstumseinbußen zu erwarten sind.

Zusätzlich zur angespannten Phosphorernährungssituation der Buche bei der BZE II-Stichprobe wurde eine Abnahme der Phosphorgehalte in Buchenblättern auf den Flächen des Intensiven Monitorings festgestellt. Diese Abnahme scheint ein überregionales Phänomen zu sein. 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.

Anhaltend hohe Stickstoffeinträge und weitere klimatische Veränderungen könnten die angespannte Phosphorernährungssituation weiter verschärfen. Weitere Untersuchungen zu den Regulierungsmechanismen für die Pflanzenverfügbarkeit von Phosphor und zu den Ursachen der abnehmenden Phosphorgehalte sind daher notwendig.

Relativ am günstigsten ist die Ernährungssituation der Buche auf Basalt/Diabas. Auf den gekalkten Buchenstandorten der BZE II waren sowohl die Magnesiumgehalte als auch die N/Mg-Quotienten gegenüber den ungekalkten BZE II-Punkten verbessert. Die Schwefelgehalte hingegen waren in den Buchenblättern an den gekalkten BZE II-Punkten niedriger als an den ungekalkten.

Die im Intensiven Monitoring ermittelte Abnahme der Phosphor-, Kalium-, Calcium-, Magnesium-, Schwefel- und Eisenblattgehalte in Verbindung mit einer Verschlechterung der Stickstoffquotienten lassen vermuten, dass die Ernährungssituation der Buche sich nicht autark verbessern wird.

7.5.2 *Fichte*

Sehr viel günstiger als bei der Buche stellte sich die Ernährungssituation der Fichte in Hessen dar. 33 % aller Fichten an den BZE II-Punkten wiesen keine Ernährungsmängel bei den Hauptnährstoffen oder unausgewogene Stickstoffquotienten auf. Am häufigsten traten Defizite an Phosphor, Kalium und Schwefel auf.

Die Fichten auf Basalt/Diabas und gekalktem Buntsandstein waren 2007 im Vergleich mit den Fichten auf anderen Substraten am besten und ausgewogensten ernährt. Die Bodenschutzkalkung zeigte an den BZE II-Fichtenpunkten lediglich für Eisen einen signifikanten Effekt: an den gekalkten BZE II-Punkten waren die Eisengehalte in den Fichtennadeln niedriger als an den ungekalkten.

Die Stickstoffgehalte in den Fichtennadeln haben seit der ersten landesweiten Inventur (Bionetzerhebung 1982/1983) nicht signifikant zugenommen. 2007 lagen die Stickstoffgehalte (Median) mindestens im Normalbereich, fast die Hälfte der Fichten überschritt auch die obere Grenze des Normalbereichs. Rund ein Drittel der Fichtenstichproben wiesen 2007 ungünstige N/P- und/oder N/K-Quotienten auf.

1983 lag der Median der Magnesiumgehalte unter dem Normalbereich (latenter Mangel), 2007 zeichnete sich gegenüber 1983 eine signifikante Verbesserung ab. Untersuchungen von RIEBELING (1992) aus den Jahren 1972-1974 zeigten, dass die Magnesiumversorgung der Fichten zu diesem Zeitpunkt sehr viel besser war. Nur knapp 10 % der 400 Proben aus Hessen lagen damals unter der Grenze zum latenten Mangel (0,8 mg/g). Offenbar war Anfang der 1980er-Jahre zum Zeitpunkt der Bionetzerhebung ein Tiefpunkt in der Magnesiumversorgung der Fichten erreicht, inzwischen (BZE II) befindet sich die Magnesiumversorgung wieder auf einem besseren Niveau. Eine zusätzliche Bewertung der Magnesiumgehalte nach REEMTSMA (1986), unter Berücksichtigung der Magnesiumgehalte im dritten Nadeljahrgang, ergab allerdings eine ungünstigere Einstufung der Magnesiumversorgung der Fichte als die Klassifikation ausschließlich anhand des ersten Nadeljahrgangs.

Die Zunahme der Magnesiumgehalte sowie die Abnahme der Kalium-, Eisen- und Mangangehalte in den Fichtennadeln seit der Bionetzerhebung (1982/1983) können durch Kalkungsmaßnahmen mitverursacht sein. Der Rückgang der Schwefelgehalte in den Fichtennadeln wird auf die Reduktion der Schwefeleinträge in die Wälder zurückgeführt.

Zwischen der ersten (Bionetz) und zweiten (BZE II) landesweiten Erhebung liegen 24 Jahre. In diesem Zeitraum haben sich einige Faktoren, die die Ernährung der Fichten beeinflussen, erheblich verändert. Die Eintragsituation in die Wälder hat sich stark gewandelt (s. Kap. 3.4.1), forstliche Maßnahmen wie die Bodenschutzkalkung haben sich auf die chemischen Bodeneigenschaften und auf die Nährstoffverfügbarkeit für die Waldbäume ausgewirkt. Diese Veränderungen lassen sich an den Nadelinhaltsstoffen der beiden landesweiten Inventuren (Bionetz und BZE II) nachvollziehen. Die Ergebnisse zeigen, dass landesweite Inventuren mit mehrjährigen Intervallen die Ernährungssituation und die Nährstoffverfügbarkeit über lange Zeiträume plausibel abbilden können. Allerdings ist bei diskontinuierlichen Erhebungen nicht auszuschließen, dass jährliche Schwankungen der Nadelinhaltsstoffe langfristige Trends überlagern.

7.5.3 *Kiefer*

Die Ernährungssituation der Kiefer war ebenfalls günstiger als die der Buche. An 36 % der BZE II-Punkte mit Kiefer hatten diese keine Defizite an Hauptnährelementen und waren ausgewogen ernährt. Die Kiefern auf unverlehmtem Sand, schwach verlehmtem Sand, Kalk und Zechstein/Rotliegendes wiesen im Median keine Ernährungsdefizite auf.

Etwa ein Drittel der Kiefern im BZE II-Kollektiv waren nicht ausreichend mit Phosphor und/oder Magnesium versorgt. Ebenfalls bei einem Drittel der BZE II-Kiefernpunkte zeigten sich unausgewogene N/P- und N/Mg-Quotienten. Auf den ungekalkten BZE II-Punkten wiesen sogar zwei Drittel der Kiefernproben latenten Phosphor- und/oder Magnesiummangel auf. Mit der Kalkung verbesserte sich die Phosphorernährungssituation der Kiefer signifikant, die Magnesiumgehalte waren an den gekalkten BZE II-Punkten tendenziell höher als an den ungekalkten.

7.5.4 *Eiche*

Am entspanntesten war die Ernährungssituation der Eiche. Für 41 % der Eichenblattproben an den BZE II-Punkten wurden weder Mangel an Hauptnährelementen noch unausgewogene Elementverhältnisse festgestellt. Am häufigsten waren bei der Eiche Phosphordefizite (32 %) und auch die N/P- und N/K-Quotienten waren an einem Drittel der Standorte disharmonisch.

Eichen auf Basalt/Diabas und Tonschiefer (fast alle gekalkt) zeigten im Vergleich mit Eichen auf anderen Standorten die beste und ausgewogenste Ernährung.

Auf den gekalkten BZE II-Punkten wiesen die Eichen eine bessere Calcium- und Magnesiumversorgung sowie günstigere N/Mg-Quotienten auf.

7.5.5 *Stickstoffeutrophierung und Bodenversauerung*

7.5.5.1 *Stickstoffeutrophierung*

Nicht nur die Stickstoffgehalte in den Nadeln und Blättern waren in der BZE II substratgruppenübergreifend hoch, vielfach wurden auch unharmonische N-Quotienten festgestellt. Abweichungen von harmonischen N-Quotienten ergaben sich nicht nur aufgrund hoher Stickstoffgehalte in Nadeln und Blättern, vielmehr entstanden disharmonische Verhältnisse häufig durch niedrige Blatt- und Nadelgehalte an Phosphor, Kalium, Calcium und Magnesium.

Besonders ausgeprägt war die Stickstoffübersorgung bei Kiefer und Eiche. Die geringe Variabilität der Stickstoffgehalte bei allen untersuchten Baumarten bei der BZE II-Stichprobe spricht für einen starken, auf den verschiedenen Standorten der BZE II nivellierenden Einfluss durch erhöhte Stickstoffeinträge. Die ausgeglichene Wasserversorgung im Blatt- und Nadelbeprobungsjahr an fast allen

BZE II-Punkten hatte vermutlich wegen der hohen Relevanz der Witterung auf die jährliche Stickstoffmineralisierung ebenfalls einen synchronisierenden Einfluss auf die Stickstoffgehalte in den Nadeln und Blättern.

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, KÖLLING 1991, MELLERT u. KÖLLING 2006).

Einige Autoren gehen davon aus, dass Stickstoff als primär wachstumsregulierender Faktor abgelöst wird von anderen Nährelementen wie Phosphor, Kalium, Magnesium und Calcium (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.

7.5.5.2 Bodenversauerung

Atmogene Einträge von Schwefel und säurewirksamem Stickstoff führen zu Bodenversauerung und Nährstoffauswaschung aus dem Boden (BLUME et al. 2010).

Schwefel wird von den Bäumen über die Wurzel und über die Nadeln und Blätter aus der Luft aufgenommen. Die wirkungsvolle Reduzierung der Schwefeleinträge in die Wälder durch die Luftreinhaltspolitik zeigte sich in der Abnahme der Schwefelblattgehalte auf den Buchenflächen des Intensiven Monitorings und in der Abnahme der Schwefelgehalte in den Fichtennadeln beim Vergleich der Ergebnisse des Bionetzes 1982/1983 und der BZE II in 2007. Auf europäischer Ebene (JONARD et al. 2014) zeigte sich eine Abnahme der Schwefelnadelgehalte für Kiefer und Fichte. Hier waren die Abnahmen auf den besser mit Schwefel versorgten Intensivmonitoringflächen höher als auf den Flächen mit Schwefeldefiziten.

Kiefer und Eiche waren 2007 gut mit Schwefel ernährt (92 % bzw. 100 % im Normalbereich). Dagegen zeigten nur 44 % der BZE II-Buchenpunkte normale Schwefelblattgehalte, 17 % befanden sich unterhalb der Symptommgrenze (= Mangel). Die Fichten an den BZE II-Punkten entfielen zu 24 % in den Bereich latenten Schwefelmangels. (Latenter) Schwefelmangel allein trat bei der Buche nur

sehr selten und bei der Fichte gar nicht auf. 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 Kiefern-Standorte als belastet (Schwefelgehalte im 1. Nadeljahrgang $> 1,4$ mg/g) eingestuft (RIEK u. DIETRICH 2000). Im hessischen BZE II-Kollektiv kamen 2007 Schwefelgehalte $> 1,4$ mg/g in Fichtennadeln (1. Nadeljahrgang) gar nicht und für die Kiefer lediglich einmal vor.

Mit fortschreitender Bodenversauerung gehen Nährstoffkationen aus dem Boden mit dem Sickerwasser verloren. Dies wird bei der BZE II-Stichprobe besonders deutlich an den unzureichenden *Magnesiumgehalten* in den Blättern und Nadeln vor allem bei Buche und Kiefer (32 bzw. 38 % der BZE II-Punkte unter dem Normalbereich). Die Aufnahme von Magnesium kann durch andere Kationen (Kalium, Calcium) oder Mangan und Ammonium herabgesetzt werden. Magnesiummangel durch die Konkurrenz anderer Kationen ist daher ein weit verbreitetes Phänomen (MARSCHNER 1995). Aufgrund der teilweisen Manganübersorgung könnte dies im BZE II-Kollektiv eine Rolle spielen.

Auf Intensivmonitoringflächen nahmen die Magnesiumgehalte in den Buchenblättern ab. Dieses Ergebnis deckt sich mit Untersuchungen (1992-2009) auf den Intensivmonitoringflächen in Europa (JONARD et al. 2014). Hier nahmen die Magnesiumgehalte in Buchenblättern vor allem auf Flächen mit guter Magnesiumversorgung ab. Eine Abnahme der Magnesiumgehalte in Buchenblättern ermittelten auch DUQUESNAY et al. (2000) in Frankreich. Zwischen den Erhebungen 1969-1971 und 1996-1997 verringerten sich die Magnesiumgehalte um 38 %. Für die Fichte dagegen ergab sich zwischen der Bionetzstichprobe (1982/1983) und der BZE II (2007), u. a. aufgrund der durchgeführten Bodenschutzkalkung, eine Zunahme der Magnesiumgehalte. Auf europäischer Ebene zeigte sich ein ähnliches Bild. In den Untersuchungen von JONARD et al. (2014) stiegen die Magnesiumgehalte zwischen 1992 und 2009 insbesondere auf Flächen mit niedrigen Magnesiumgehalten in den Fichtennadeln an.

Bei der BZE II-Stichprobe variierten die Magnesiumgehalte mit den Substratgruppen. An BZE II-Punkten auf Basalt/Diabas (Buche, Fichte) und Tonschiefer (Buche, Fichte, Eiche) sowie auf Zechstein/Rotliegendes (Kiefer) waren die Magnesiumgehalte in den Nadeln und Blättern besonders hoch.

Die *Calciumernährung* der Waldbäume an den BZE II-Punkten war sehr heterogen, aber überwiegend im Normalbereich. Die Calciumgehalte in den Nadeln und Blättern zeigten ein eindeutig substratabhängiges Muster. Auf Kalkstein und Basalt/Diabas wurden die höchsten Calciumgehalte in den Blattorganen erreicht. Alle Calciumwerte der Stichprobenbäume auf diesen Substratgruppen lagen im Normalbereich oder darüber. Auf Buntsandstein und Quarzit waren die Calciumgehalte vergleichsweise niedrig.

Während bei den Nadelbäumen kaum Calciumdefizite im BZE II-Kollektiv auftraten, waren bei der Buche 18 % und bei der Eiche 14 % der BZE II-Punkte im

(latenten) Mangelbereich angesiedelt, der N/Ca-Quotient war an 44 % der BZE II-Buchenpunkte disharmonisch. Zusätzlich wurde im Intensiven Monitoring für die Buche eine Abnahme der Calciumblattgehalte sowie eine Verschlechterung des N/Ca-Quotienten ermittelt. Auch JONARD et al. (2014) stellten Abnahmen für Buche und Traubeneiche auf den von ihnen untersuchten Flächen fest. In Frankreich (DUQUESNAY et al. 2000) nahmen die Calciumblattgehalte der Buche zwischen 1969/71 und 1996/97 um 16 % ab. Der Vergleich 1982/1983 (Bionetz) zu 2007 (BZE II) zeigte bei der Fichte keinen Unterschied in den Calciumgehalten.

Insgesamt wurde im BZE II-Kollektiv für Eiche und Kiefer eine überwiegend (95 % bzw. 85 %) ausreichende *Kaliumversorgung* festgestellt. Fichte und Buche befanden sich zu 24 % bzw. 31 % im (latenten) Mangel. Für ein Drittel der Fichten und Buchen wurden außerdem disharmonische N/K-Quotienten festgestellt. Die Abnahme der Kaliumgehalte in Fichtennadeln im Vergleich 1982/1983 (Bionetz) zu 2007 (BZE II) war signifikant. Abnehmende Kaliumgehalte und ein Trend zu unharmonischen N/K-Quotienten waren auch im Intensiven Monitoring bei der Buche in Hessen festzustellen. Aus der Literatur ergibt sich kein einheitliches Bild für Veränderungen der Kaliumernährungssituation. In Südschweden zeigten sich 1985 bis 1994 abnehmende Kaliumgehalte in Fichten- und Kiefernnadeln (THELIN et al. 1998). Für Kiefernbestände in Brandenburg war mit steigender Stickstoffernährung in der Regel auch eine Verbesserung der Kaliumgehalte verbunden (HIPPELI u. BRANSE 1992). JONARD et al. (2014) ermittelten auf den Flächen des Intensiven Monitorings in Europa Abnahmen der Kaliumgehalte für Traubeneiche und Fichte.

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.

Bei *Mangan* waren für alle vier Baumarten die Variabilitäten besonders hoch. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Mangangehalte in den Nadeln und Blättern stark durch Bodeneigenschaften gesteuert werden. Auf Basalt/Diabas (Buche, Fichte, Eiche) und Kalkstein (Kiefer) waren die Mangangehalte vergleichsweise niedrig, auf Grauwacke und Tonschiefer dagegen hoch. Die Manganversorgung der vier untersuchten Baumarten in Hessen war insgesamt gut. Alle Proben lagen mindestens im Normalbereich, Überschreitungen des Normalbereichs waren bei Kiefer und Eiche die Regel. Bei der Bionetz-Erhebung 1982/1983 lagen die Mangangehalte in den Fichtennadeln höher als bei der BZE II 2007.

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 (WILPERT 2003, AUGUSTIN et al. 2005). Klare Zusammenhänge zwischen Mangantoxizität 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). Im hessischen BZE II-Kollektiv wurden keine signifikanten Unterschiede in den Mangangehalten zwischen gekalkten und ungekalkten BZE II-Punkten festgestellt.

BRAUN u. FLÜCKIGER (2009) nennen Mangantoxizitätsbereiche für Buche ($> 1,2-1,5$ mg/g) und für Fichte (> 5 mg/g). Bei den Fichten in Hessen wurden diese toxischen Bereiche nicht erreicht. Bei der Buche lagen allerdings 55 der 80 Buchenproben über $1,2$ mg/g, 49 Buchenproben überschritten auch die Schwelle von $1,5$ mg/g. Die Buchenblattproben der BZE II 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 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). Buche, Fichte, Kiefer und Eiche sind fast ausschließlich (93-100 %) gut mit Eisen versorgt, eine Überversorgung trat nicht auf. Die Eisengehalte lagen 1982/1983 (Bionetz) höher als 2007 (BZE II).

Die für alle vier Baumarten festgestellte Überversorgung mit Stickstoff macht deutlich, dass die Stickstoffeinträge in die Wälder zu hoch sind. Defizite der Magnesiumversorgung (Buche, Kiefer) und die Überversorgung mit Mangan (Kiefer, Eiche) sind Anzeichen dafür, dass die Bodenversauerung weiterhin einen starken Einfluss auf die Nährstoffversorgung der Wälder hat.

7.5.6 Bodenschutzkalkung

Bei der BZE II-Stichprobe wurden positive Kalkungseffekte auf die *Calcium- und Magnesiumgehalte* der Blätter nur für die Eiche (Calcium, Magnesium) und Buche (Magnesium) ermittelt, während in Versuchen zur wissenschaftlichen Begleitung der Bodenschutzkalkung solche Effekte auch für andere Baumarten beschrieben werden (für Calcium: EVERS et al. 2008, WILPERT 2003, HUBER et al. 2006, GREVE 2014; für Magnesium: EVERS et al. 2008, GUCKLAND et al. 2011, GREVE 2014). Ein Grund dafür, dass sich nicht bei allen Baumarten an den BZE II-Punkten signifikante Unterschiede der Calcium- und Magnesiumgehalte zwischen gekalkten und ungekalkten BZE II-Punkten zeigten, könnte durch die Kalkungspraxis in Hessen bedingt sein, denn es wurden zunächst die relativ ärmsten Standorte gekalkt (Kap. 9.4). Auf den bis 2007 ungekalkten Punkten kann von einem höheren Aus-

gangsniveau der Calcium- und Magnesiumgehalte in den Nadeln und Blättern ausgegangen werden, als es auf den jetzt gekalkten Punkten ursprünglich vorlag. Auf diesen (relativ armen) Standorten wurde durch die Nährstoffzufuhr über die Kalkung das Gehaltsniveau angehoben und an das der (relativ reicheren) ungekalkten Standorte angenähert. Diese Vermutung wird gestützt durch die bodenchemischen Befunde, die zum Zeitpunkt der BZE I auf ungekalkten Standorten höhere Calcium- und Magnesiumvorräte ausweisen als auf den gekalkten Standorten (Kap. 6.5.3.1, Abb. 70 und 6.5.3.2, Abb. 74).

Auf den BZE II-Punkten mit Kiefer war für die gekalkten Standorte eine verbesserte *Phosphorversorgung* festzustellen. Da in Hessen mit der Kalkung keine Zugabe von Phosphor erfolgte, ist vermutlich mit der Kalkung eine Anregung der Mineralisierung organischer Bodensubstanz und ein Rückgang der Versauerung erzielt worden, was die Verfügbarkeit von Phosphor erhöhen kann. In der Literatur finden sich Studien zu einer Erhöhung der Phosphorgehalte im Anschluss an Kalkungsmaßnahmen (KULHAVÝ et al. 2009), häufiger wird kein Kalkungseffekt nachgewiesen (GUCKLAND et al. 2011, JONARD et al. 2010, 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.

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), QUIMET et al. (2013) und FVA (2013). Keine Veränderung beobachteten HUBER et al. (2006), KULHAVÝ et al. (2009) und JONARD et al. (2010). An den gekalkten BZE II-Punkten waren für Fichte und Eiche tendenziell niedrigere Kaliumgehalte als an den ungekalkten BZE II-Punkten zu beobachten. 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. Bei der Buche wurde somit der K/Ca-Antagonismus und bei der Fichte der Mg/Ca-Antagonismus wirksam. 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.

Die angespannte *Schwefelernährung* der Buche ist an den gekalkten BZE II-Punkten ausgeprägter als an den ungekalkten.

Der starke Rückgang der *Eisengehalte* in den Fichtennadeln beim Vergleich der Werte von 1983 (Bionetz) und 2007 (BZE II) könnte sowohl als Anzeichen für

einen Rückgang der Bodenversauerung als auch als Kalkungseffekt interpretiert werden, denn an den gekalkten BZE II-Fichtenpunkten waren die Eisengehalte niedriger als an den ungekalkten BZE II-Punkten. Sowohl die gekalkten als auch die ungekalkten Fichten wiesen aber größtenteils Eisennadelgehalte im Normalbereich auf.

Ein Einfluss der Waldkalkung auf die *Stickstoff-, Mangan- und Zinkgehalte* in den Nadeln und Blättern ließ sich bei der BZE II-Stichprobe nicht nachweisen.

Mit dem Beginn der Bodenschutzkalkung in Hessen wurden Versuchsflächen angelegt, um die Auswirkungen der Bodenschutzkalkungen durch wissenschaftliche Studien zu begleiten. Da in faktoriellen Versuchsanordnungen die Randbedingungen für gekalkte Parzellen und Kontrollparzellen relativ einheitlich sind, können Kalkungseffekte in Versuchen wesentlich sicherer festgestellt werden, als dies im Kollektiv der BZE II mit einem sehr weiten Standortsspektrum und unterschiedlichen Eintragsituationen, Kalkungszeitpunkten und -mengen möglich ist. Die BZE ist notwendig, um die Flächenrelevanz der Versuchsergebnisse zu ermitteln und ist damit eine zusätzliche Stütze für die weitere Planung der Bodenschutzkalkung. Die positive Wirkung der Kalkung auf die Phosphorgehalte, die sich im BZE II-Kalkungsvergleich für Kiefer (sowie tendenziell für Fichte und Eiche) zeigte, war in den Untersuchungen zur Fichte und Buche von GUCKLAND et al. (2011) nicht erkennbar. Die auf den Versuchsflächen zur Bodenschutzkalkung festgestellte Verbesserung der Calcium- und Magnesiumgehalte nach Kalkungen (EVERS et al. 2008, GUCKLAND et al. 2011) zeigte sich auch an den BZE II-Punkten mit Buche (Magnesium) und Eiche (Calcium und Magnesium). Die geringeren Kaliumgehalte gekalkter Versuchsparzellen gegenüber der Kontrolle bestätigten sich im Kalkungsvergleich der BZE II-Punkte für Fichte und Eiche, allerdings waren hier die Ergebnisse nicht signifikant.

Bei der Kalkungsplanung sind aus Sicht der Waldernährung neben den Aspekten der Verminderung von Auswirkungen der Bodenversauerung auch die möglichen negativen Wirkungen auf die Kalium-(und Schwefel-)Ernährung der Waldbäume zu berücksichtigen.

7.5.7 Vollbaumnutzung

Neben den standörtlichen Gegebenheiten können auch Informationen zum Ernährungszustand der Waldbäume zur Steuerung der Nutzung von Nichtderbholz herangezogen werden. Da die Nadel- und Blattprobennahme an den BZE II-Punkten unter „durchschnittlichen“ Rahmenbedingungen stattfand und nur geringe Alters- effekte der Nährelementversorgung sowie eine geringe Differenzierung der Blatt- und Nadelgewichte vorlagen, geben die BZE II-Ernährungsdaten mittlere Verhältnisse der Ernährungssituation in Hessen wieder. Darüber hinaus zeigten auf den Intensivmonitoringflächen die Mediane der Elementgehalte und Stickstoffquotienten in Buchenblättern eine gute Übereinstimmung (Ausnahme: Magnesium) mit der

Ernährungssituation der Buche im BZE II-Kollektiv. Die Nährstoffgehalte und Stickstoffquotienten der Momentaufnahme BZE II 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. Für eine Intensivierung der Nutzung unterhalb der Derbholzgrenze sollten daher die geeigneten Baumarten und Standorte ausgewählt werden, um den Nährstoffentzug an den Standortpotentialen und der Ernährungssituation auszurichten. 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 II-Punkte einer Substratgruppe, innerhalb bzw. oberhalb des Normalbereichs und die Stickstoffquotienten im Bereich harmonischer Elementverhältnisse, liegen aus waldernährungskundlicher Sicht keine Ausschlussgründe für eine Intensivierung der Nutzung vor. (2) Befindet sich der Median eines Nährstoffs einer Substratgruppe unter dem Normalbereich (latenter Mangel) 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 unter der Symptombegrenze (= Mangel), so wird dies für die betroffene Substratgruppe als Ausschlussgrund für eine Intensivierung der Nutzung gewertet. Dies kam bei keiner der untersuchten Baumarten im BZE II-Kollektiv vor.

Die flächendeckende, repräsentative Stichprobenerhebung BZE II deckt ein sehr weites Spektrum von Waldstandorten ab. Die Anzahl der verschiedenen Substratgruppen, auf denen die einzelnen Baumarten wachsen, ist hoch. Die Anzahl der Stichprobenpunkte pro Substratgruppe ist dagegen oftmals gering. Substratspezifische Aussagen zur Biomassenutzung beschränken sich hier deshalb auf die Hauptsubstrate der Baumarten.

Die zum Zeitpunkt der BZE II unzureichende Phosphorversorgung der Buche und Defizite bei Magnesium, Kalium und Schwefel sowie unausgewogene Stickstoffquotienten lassen eine Ausweitung der Nutzung unterhalb der Derbholzgrenze aus waldernährungskundlicher Sicht nur sehr eingeschränkt zu. Hinzu kommt, dass die Trends aus dem Intensiven Monitoring eine Abnahme der Phosphor-, Kalium-, Calcium- und Magnesiumgehalte ergeben haben.

Aus der Ernährungssituation ergeben sich Einschränkungen für eine wiederholte Vollbaumnutzung der Fichte aufgrund von Defiziten in der Kalium- und

Phosphorernährung. Für Fichten auf Basalt/Diabas und gekalktem Buntsandstein bestehen aufgrund der Ernährungssituation keine Einschränkungen für die Nutzung.

Für die Kiefer werden Defizite bei Phosphor und Magnesium festgestellt, die durch Kalkungsmaßnahmen soweit reduziert werden, dass die gekalkten Kiefern insgesamt die unter (1) genannten Voraussetzungen für die Nutzung erfüllen. Auf Buntsandstein werden durch Kalkungsmaßnahmen zwar ebenfalls die Phosphor- und Magnesiumdefizite vermindert, aber sowohl die gekalkten als auch die ungekalkten Kiefern dieser Substratgruppe entsprechen den unter (2) genannten Kriterien. Vor der Ausweitung der Nutzung auf Nichtderbholzkompimente der Kiefer wird daher empfohlen, den Kalkungs- und Ernährungsstatus zu prüfen.

Bei der Eiche treten Phosphordefizite an einem Drittel der BZE II-Punkte auf. Die Eiche entspricht insgesamt allerdings den unter (1) genannten Kriterien, sodass aus der Ernährungssituation keine Restriktionen für eine intensivere Nutzung abzuleiten sind.

8 Vegetation

Marcus Schmidt, Egbert Schönfelder, Uwe Paar, Jan Evers

8.1 Einführung

Im Zuge der Bodenzustandserhebung II wurde in den Bundesländern Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Bremen 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 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$, 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.

8.2 Methodik

8.2.1 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 m² (20x20 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), Hessen (139), Sachsen-Anhalt (76) und Bremen (4) an den Stichprobenpunkten der BZE II durchgeführt.

8.2.2 *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 bestimmbar Pflanzen Sippen 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).

8.2.3 *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. 127). Diese Muster wurden anschließend in ein sogenanntes Trennartenschema (s. Tab. 33) übertragen, das den Bereich des Vorkommens der an den BZE-Punkten gefundenen Pflanzenarten für die untersuchten 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.

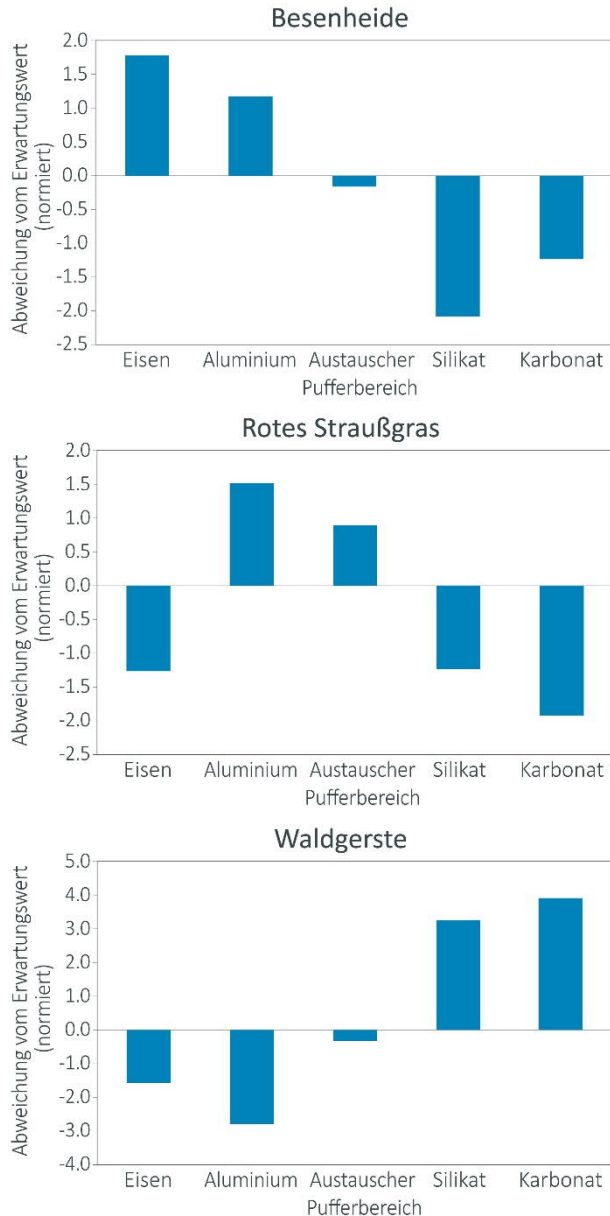


Abbildung 127: Graphische Darstellung der Abweichungen vom normierten Erwartungswert am Beispiel des Auftretens der Pflanzenarten Besenheide, Rotes Straußgras und Waldgerste in den verschiedenen Pufferbereichen

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, Hessen, Sachsen-Anhalt und Bremen. Darüber hinaus können die Ergebnisse auch in angrenzenden Gebieten mit ähnlichen klimatischen und bodenökologischen Bedingungen Anwendung finden.

In das nachfolgende Trennartenschema (s. Tab. 33) 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 33: Beispiel eines Trennartenschemas für das Vorkommen der in Abbildung 127 dargestellten Pflanzenarten in verschiedenen Pufferbereichen

Pufferbereich				
Eisen-	Aluminium-	Austauscher-	Silikat-	Carbonat-
Besenheide				
	Rotes Straußgras			
			Waldgerste	

8.3 Ergebnisse und Diskussion

8.3.1 $pH(H_2O)$

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. 128) 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. 34) deutlich. Nur wenige Pflanzenarten kennzeichnen „grenzüberschreitend“ gleichzeitig den Aluminium- und den Austauscher-Pufferbereich.

Tabelle 34: *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, Zweizähniges Kammkelchmoos				
Artengruppe Echte Brombeere, Besenförmiges Gabelzahnmoos, Besenheide, Breitblättriger Dornfarn, Draht-Schmiele, Echtes Schlafmoos, Einseitswendiges Kleingabelzahnmoos, Europäischer Siebenstern, Faulbaum, Gewöhnlicher Dornfarn, Gewöhnliches Pfeifengras, Glänzendes Schiefbüchsenmoos, Grünstengelmoos, Hänge-Birke, Harzer Labkraut, Heidelbeere, Langgestrecktes Schönschnabelmoos, 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 34)

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-Sauerklee, 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 Wurmfarn, 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-Schwingel	
			Blut-Ampfer, Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnlicher Rainkohl, Gewöhnliches Hexenkraut, Gewöhnliches Rispengras, Kleinblütiges Weidenröschen, Krückenförmiges Kurzbüchsenmoos, Samt-Kurzbüchsenmoos, Stink-Storchschnabel, Wald-Bingelkraut, Waldgerste, Wald-Zwenke, Zaun-Wicke	
				Gewöhnliche Hasel, Gewöhnlicher Efeu

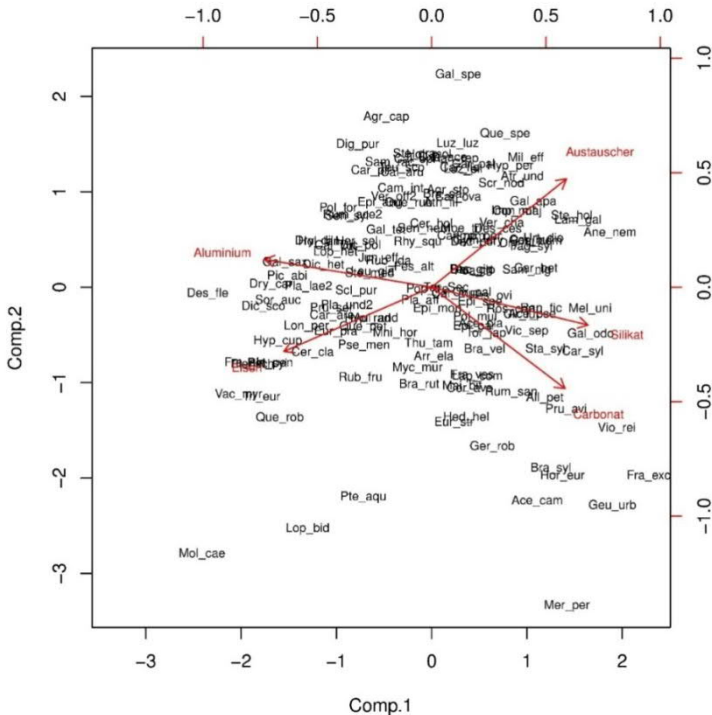


Abbildung 128: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und die fünf Pufferbereiche. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), zwischen dem Eisen- und Aluminium-Pufferbereich auf der einen und dem Silikat- und Carbonat-Pufferbereich auf der anderen 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.

8.3.2 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. 129, Tab. 35). 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. 129) 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 35: *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, Rotstengelmooos, 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 Kammkelchmoos					
	Späte Trauben-Kirsche					
		Grünstengelmooos, 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 35)

Basensättigung [%]						
0-7	> 7-20	> 20-30	> 30-50	> 50-70	> 70-85	> 85-100
				Artengruppe Echte Goldnessel, Artengruppe Gewöhnlicher Wurmfarne, Einblütiges Perlgras, Gewöhnliche Brennnessel, Gewöhnliche Esche, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnliches Flattergras, Gewöhnliches Hexen- kraut, Kleines Springkraut, Klet- ten-Labkraut, Riesen-Schwengel, Waldmeister, Wald-Ziest, Zaun- Wicke		
				Gewelltes Katha- rinenmoos, Große Sternmiere		
					Blut-Ampfer, Gewöhn- liche Knoblauchsrauke, Gewöhnliches Rispen- gras, Kleinblütiges Weidenröschen, Vogel- Kirsche, Waldgerste, Wald-Veilchen	
						Berg-Ahorn, Samt- Kurzbüchsen- moos, Spitz- Ahorn, Wald- Bingelkraut

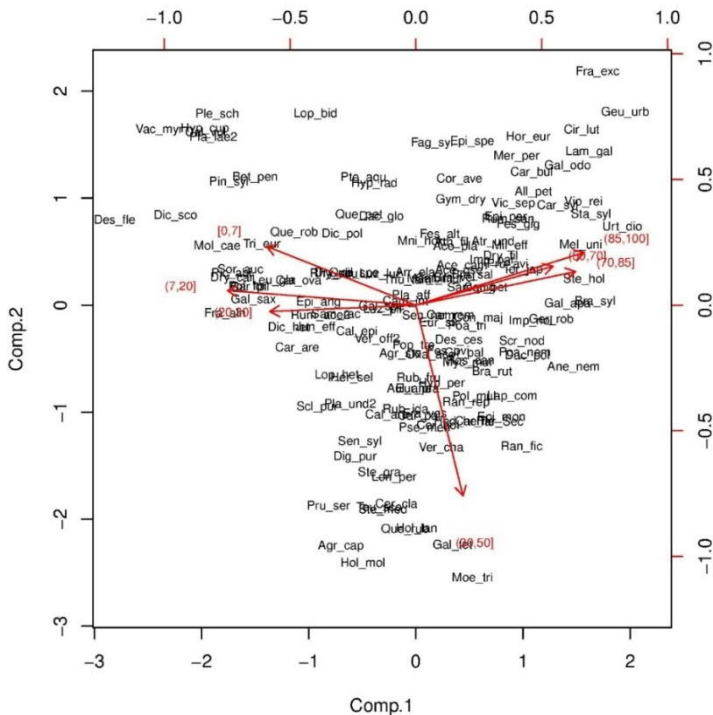


Abbildung 129: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und sieben Klassen der Basensättigung. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), auf der sich die Klassen unter 30 % (sehr gering und gering) und über 50 % Basensättigung (mittel hoch bis sehr hoch) gegenüberstehen.

Im Rahmen der Auswertung der Bodenzustandserhebung II erfolgte für Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Bremen 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 verlehmtten Sande weist überwiegend eine Basensättigung zwischen 30 und 50 % auf (EVERS et al. 2013b).

8.3.3 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. 130, Tab. 36).

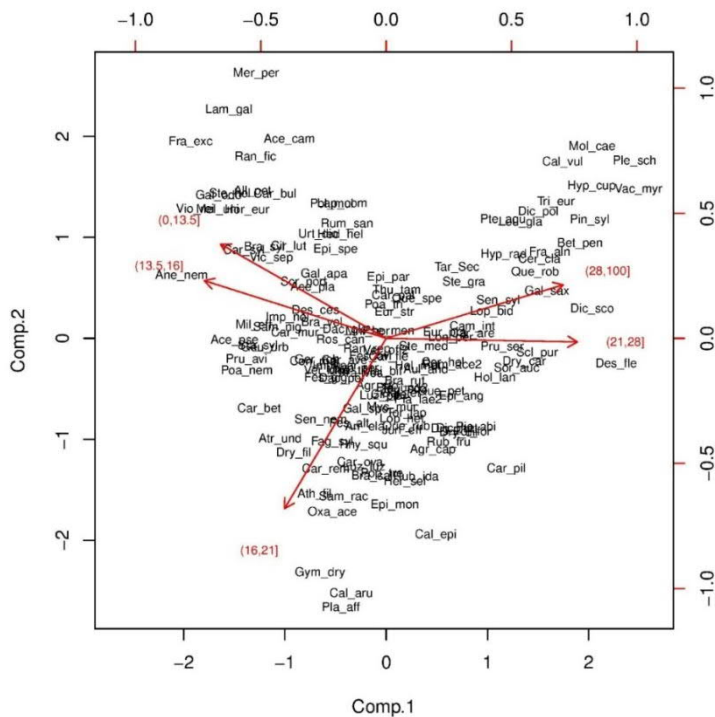


Abbildung 130: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und fünf Klassen des C/N-Verhältnisses. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), auf der sich die Klassen unter 16 und über 21 gegenüberstehen. Unter einem C/N-Verhältnis von 16 und über einem C/N-Verhältnis von 21 ist eine Trennung der Klassen nach dem Auftreten von Pflanzenarten kaum möglich.

Tabelle 36: *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, Flatter-Binse, 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 36)

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 Rainkohl, 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

8.3.4 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.

8.3.4.1 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. 131, Tab. 37).

Tabelle 37: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Calcium-Vorräte [kg/ha] von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0-5 cm Bodentiefe)*

Calcium-Vorrat [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, Zweizähliges 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 37)

Calcium-Vorrat [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 Brennnessel, Gewöhnliches Flattergras, Gewöhnliches Scharbockskraut, Großes Springkraut, Kletten-Labkraut, Riesen-Schwingel, 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

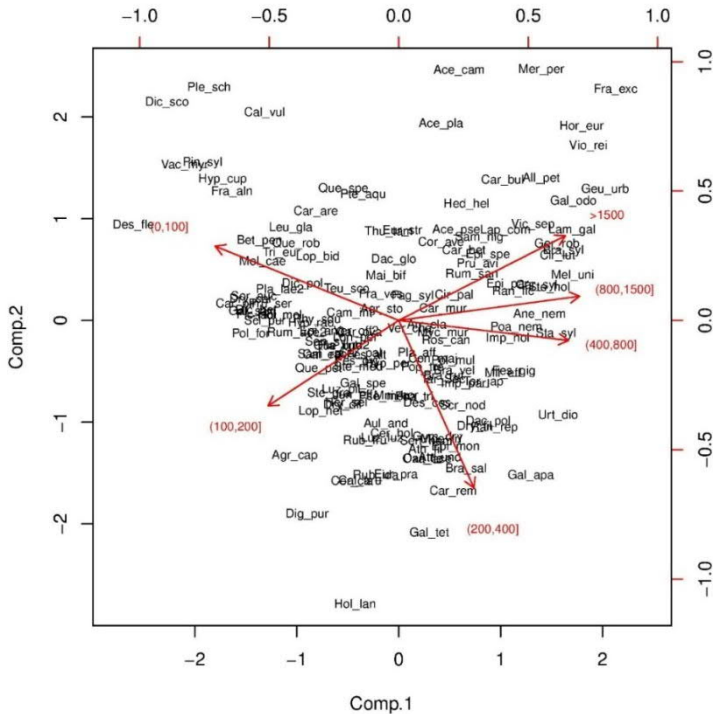


Abbildung 131: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und sechs Klassen des Calcium-Vorrats. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), auf der sich die Klassen unter 100 und über 400 kg/ha gegenüberstehen. Über einem Calcium-Vorrat von 400 kg/ha ist eine Trennung der Klassen nach dem Auftreten von Pflanzenarten weniger gut möglich.

8.3.4.2 Magnesium

Beim Magnesium ist eine ausgeprägte Dreigliederung bereits in der Hauptkomponentenanalyse (s. Abb. 132) 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. 38) wider.

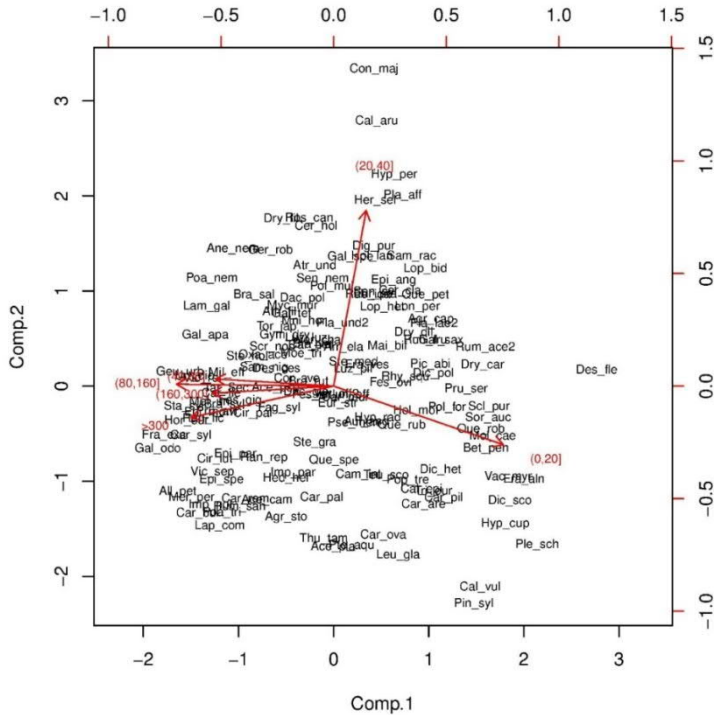


Abbildung 132: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und sechs Klassen des Magnesium-Vorrats. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), auf der sich die Klassen unter 20 und über 40 kg/ha gegenüberstehen. Über einem Magnesium-Vorrat von 40 kg/ha ist eine Trennung der Klassen nach dem Auftreten von Pflanzenarten kaum möglich.

Tabelle 38: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Magnesium-Vorräte [kg/ha] von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0-5 cm Bodentiefe)*

Magnesium-Vorrat [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, Zweizähnes Kammkelchmoos					
Rotes Straußgras					
	Rankender Lerchensporn, Wald-Greiskraut, Waldreitgras				
	Himbeere, Roter Fingerhut, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos, Wolliges Honiggras				
	Gewelltes Katharinenmoos				
	Busch-Windröschen, Wald-Frauenfarn				
	Artengruppe Knäuelgras, Hain-Rispengras				

(Fortsetzung Tabelle 38)

Magnesium-Vorrat [kg/ha]					
0-20	> 20-40	> 40-80	> 80-160	> 160-300	> 300
		Gewöhnlicher Efeu, Weißliche Hainsimse			
		Berg-Weidenröschen, Wald-Sauerklee, Winkel-Segge			
		Einblütiges Perlgras, Gewöhnliche Brennnessel, Gewöhnliche Esche, Gewöhnliche Nelkenwurz, Gewöhnliches Flattergras, Gewöhnliches Hexenkraut, Kletten-Labkraut, Schwarzer Holunder, Vogel- Kirsche, Wald-Bingelkraut, Waldmeister, Wald-Segge, Wald-Zwenke, Zwiebel-Zahnwurz			
			Berg-Ahorn		
			Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Riesen- Schwingel, Gewöhnliches Schar- bockskraut, Wald-Ziest, Waldgerste, Wald-Veilchen		
				Gewöhnliche Hasel	

8.3.4.3 Kalium

Auch beim Kalium ist eine Dreigliederung der Wertebereiche 0-20, > 20-40 und > 40 kg/ha erkennbar (s. Abb. 133). Anders als beim Magnesium ist jedoch die Differenzierung oberhalb von 40 kg/ha etwas deutlicher und es stehen einige Trennarten zur Verfügung (s. Tab. 39).

Tabelle 39: *Auf der Grundlage der BZE II entwickeltes Trennartenschema zur Ansprache der Kalium-Vorräte [kg/ha] von Waldböden (Bezug: Mineralboden in 0-5 cm Bodentiefe)*

Kalium-Vorrat [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 Runzelpeter, Späte Trauben-Kirsche, Verschiedenblättriges Kammkelchmoos, Wald-Greiskraut, Wolliges Honiggras, Zweizähliges 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, Krückenförmiges Kurzbüchsenmoos, Land-Reitgras, Rotes Straußgras, Wald-Ehrenpreis Weiches Honiggras Kleines Springkraut, Wald-Sauerklee Artengruppe Gewöhnlicher Wurmfarn, Gewöhnlicher Efeu Berg-Ahorn				

(Fortsetzung Tabelle 39)

Kalium-Vorrat [kg/ha]					
0-20	> 20-40	> 40-60	> 60-80	> 80-120	> 120
		Eichenfarn			
		Gewelltes Katharinenmoos, Gewöhnlicher Holz Zahn, 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	

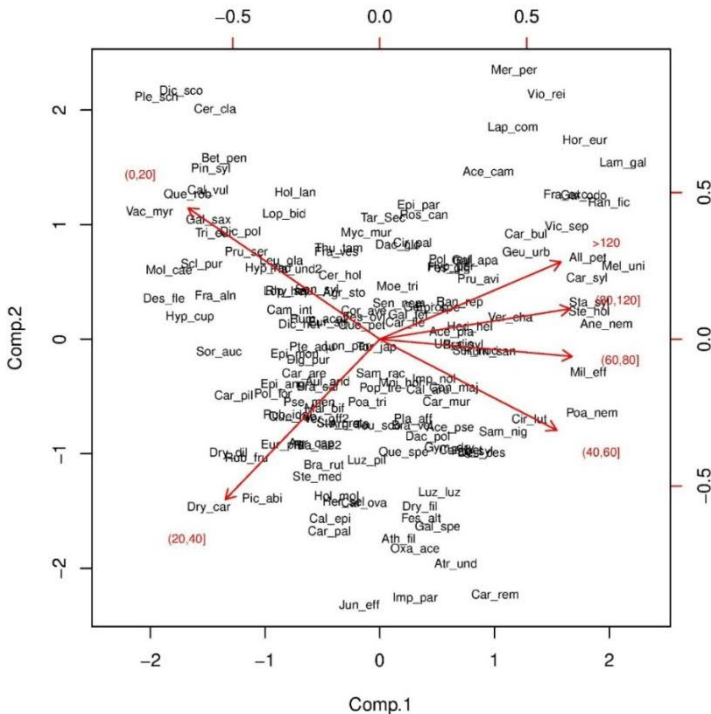


Abbildung 133: Hauptkomponentenanalyse in Bezug auf die untersuchten Pflanzenarten und sechs Klassen des Kalium-Vorrats. Die wichtigste Trennung erfolgt entlang der ersten Achse (X-Achse), auf der sich die Klassen unter 20 und über 40 kg/ha gegenüberstehen. Eine Differenzierung oberhalb von 40 kg/ha erscheint nicht als sinnvoll.

8.3.5 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. 40) 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 40 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. 40) bilden in erster Linie die Bundesländer Niedersachsen, Hessen, Sachsen-Anhalt und Bremen und damit der geographische 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. 40) auf eine Differenzierung nach dem Wasserhaushalt verzichtet.

Tabelle 40: *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, Zweizähliges Kammkelchmoos		
Breitblättriger Dornfarn, Einseitswendiges Kleingabelzahnmoos, Flatter-Binse, Gewöhnlicher Hohlzahn, 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		
	Artengruppe Echte Goldnessel, Artengruppe Gewöhnlicher Wurmfarne, Artengruppe Knäuelgras, Berg-Ahorn, Bleiche Segge, Busch-Windröschen, Dreinervige Nabelmiere, Eichenfarn, Einblütiges Perlgras, Gewelltes Katharinenmoos, Gewöhnliche Brennnessel, 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	
		Blut-Ampfer, Gewöhnliche Knoblauchsrauke, Gewöhnlicher Efeu, Gewöhnlicher Rainkohl, Gewöhnliches Hexenkraut, Gewöhnliches Rispengras, Kleinblütiges Weidenröschen, Riesenschwingel, 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 Austausch-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

9 Hauptergebnisse, Folgerungen für die Verwaltung und die forstliche Praxis

Uwe Paar, Jan Evers, Johannes Eichborn, Thomas Ullrich

9.1 Wie repräsentativ sind die Bodenzustandserhebungen? Sind die Ergebnisse auf die gesamte Fläche des Waldes in Hessen übertragbar?

Vergleicht man die Verteilung der Trophiestufen für die BZE-Stichprobenpunkte mit den Trophiestufen der hessischen Standortskartierung/Forsteinrichtung, so zeigt sich eine bemerkenswert hohe Übereinstimmung zwischen den Häufigkeitsverteilungen der Stichprobe und der Grundgesamtheit. Vergleichbar gut übereinstimmende Ergebnisse bestehen für die Abstufungen des Merkmals Geländewasserhaushalt und die Baumartenverteilung. Die BZE-Stichprobe bildet damit die Verhältnisse des Waldes in Hessen insgesamt sehr gut ab.

Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung liefern Aussagen, die sich auf den gesamten Wald in Hessen beziehen. Dazu zählen insbesondere:

- Darstellung von Eigenschaften der Waldböden in Hessen
- Abschätzung des Kohlenstoffvorrats in hessischen Waldböden differenziert nach organischer Auflage und Mineralboden
- Weiterentwicklung standortkundlicher Größen in Hessen
- Herleitung kalkungsbedürftiger Waldflächen in Hessen
- Darstellung der Nährstoffverhältnisse hessischer Waldböden als Grundlage für eine Bewertung der Nachhaltigkeit unterschiedlicher Nutzungsintensitäten
- Darstellung und Bewertung von Maßnahmen des Bodenschutzes in Hessen

9.2 Wie sieht der Waldboden in Hessen aus? Welche Strukturen können unterschieden werden?

9.2.1 *Geologie, Boden und Bodenentwicklung*

Der Wald in Hessen wächst auf Böden, deren geologische Ausgangsgesteine zwischen reicher und sehr schwacher Nährstoffversorgung einzuordnen sind. Im Wald weit verbreitete Ausgangsgesteine sind Buntsandstein, Lösslehm, Basalt/Diabas und Tonschiefer. Infolge der Siedlungs- und Landnutzungsgeschichte wurden

besonders ertragreiche Löss-Standorte einer landwirtschaftlichen Nutzung zugeführt.

Schuttphasen überprägen vielerorts die Eigenschaften der Ausgangsgesteine in Hessen. Grundsätzlich sind drei Schuttphasen zu unterscheiden. Als ältester Schutt liegt zunächst die dicht gelagerte Basislage. Darüber folgt als Mittellage ein lössreicher Schutt. Am Ende der letzten Kaltzeit folgte die jüngste Phase einer Schuttbildung, deren Weiterentwicklung durch die Wiedererwärmung und das Aufkommen einer dichten Vegetation gestoppt wurde. Erfolgte kein flächiger Abtrag durch Erosion, ist diese Schuttdecke als „Hauptlage“ praktisch überall verbreitet (SABEL 2005).

Die Voraussetzungen der Bodenentwicklung für hessische Wälder sind vielfältig. Die Kenntnis der Grundlagen der Bodenentwicklung ist eine wesentliche Grundlage für nachhaltiges, forstliches Handeln.

9.2.2 *Substratgruppen und Substrat-Lagerung*

Das Ausgangsgestein der Bodenbildung bestimmt wesentlich die sogenannten Substratgruppen. Buntsandstein ist mit 28 % gemäß der BZE-Einteilung das häufigste Ausgangsgestein im hessischen Wald. 14 % der Waldfläche wurden als Lösslehm-Standorte identifiziert, ebenfalls 14 % sind dem Basalt und Diabas zuzuordnen. Auf weiteren 12 % findet sich Tonschiefer. Weitere Substratgruppen haben 5 % oder einen geringeren Flächenanteil. Dazu zählen insbesondere Grauwacken- und Ton-Standorte. Die Sand-Standorte sind unterteilt in unverlehmte Sande (6 %) und schwach verlehmte Sande (4 %). Andere Substratgruppen treten nur selten auf.

Der Begriff „Substrat-Lagerung“ umfasst die Angaben zur Bodenart (wie Sand, Schluff oder Ton) und zu den Lagerungsverhältnissen. An ca. 40 % der BZE-Profile findet man bis zu 70 cm mächtige lehmige, schluffige, sandige Decken (Löss-Lehmdecken) über basenarmem Silikatgestein.

Auf ca. 12 % der hessischen BZE-Standorte zeigen sich bis zu 70 cm mächtige feimbodenreiche Decken über basenreichem Grundgestein (z. B. Basalt, Diabas, Gabbro etc.). Der dritthäufigste Substrat-Lagerungstyp ist charakterisiert durch das Vorkommen von sandig-lehmigen Fließerden (30-70 cm) über Ton, auch Bröckeltonen. Der tonige Untergrund kann hierbei aus unterschiedlichen Ausgangssubstraten (Buntsandsteinmaterial, tertiären Tonen etc.) bestehen. Insgesamt weisen 8 % der hessischen BZE-Punkte diesen Substrat-Lagerungstyp auf. Ebenfalls ca. 8 % der hessischen BZE-Standorte zeigen über 70 cm mächtige Lösslehmdecken über basenarmem Silikatgestein.

Mit etwa 6 % sind Standorte mit Lösslehm und verlehmtten Fließerden (> 70 cm) über Kalk und basenreichem Untergrund vertreten. Ebenfalls knapp 6 % der hessischen BZE-Punkte sind stark skeletthaltige Böden mit höchstens 40 cm Deckschicht über basenreichem Grundstein. Somit können ca. 80 % der hessischen

BZE-Standorte durch insgesamt sechs Substrat-Lagerungstypen beschrieben werden.

9.2.3 Bodentypen

Auf den hessischen Waldstandorten treten vor allem drei Bodentypen auf. 50 % der BZE II-Standorte sind durch den Bodentyp Braunerde gekennzeichnet. Auf ca. 31 % der BZE II-Punkte sind Parabraunerden zu finden und für 10 % der BZE II-Punkte wurde der Bodentyp Pseudogley ausgewiesen. Diese Hauptbodentypen kommen somit insgesamt auf ca. 90 % der hessischen BZE II-Punkte vor. Auf den restlichen BZE-Standorten finden sich Gleye, Fahlerden, Kolluvisole, Pararendzinen, Podsole, Ranker, Regosole, Stagnogleye und Terra-Fusca mit geringen Flächenanteilen.

9.2.4 Trockenrohdichten und Skelettanteile

Im Vergleich der Substrate finden sich auf Grauwacke-Standorten sehr geringe Trockenrohdichten, aber hohe Steingehalte. Wesentlich höhere Trockenrohdichten zeigen Buntsandstein und die schwach verlehmtten Sande. Hohe Steingehalte treten bei Tonschiefer und Basalt/Diabas auf.

9.3 Sind hessische Waldböden sauer? Versauern sie trotz geringerer luftbürtiger Säurebelastungen weiter?

Die Ergebnisse des Intensiven Monitorings zum Stoffeintrag belegen den deutlichen Rückgang des Gesamtsäureeintrages in hessische Wälder seit Mitte der 1980er-Jahre.

Unter Fichte verringerte sich der Säureeintrag zwischen Ende der 1980er-Jahre und 2007 von 3 auf 2 kmol_c je Hektar, unter Buche von 1,4 auf 1,1 kmol_c je Hektar (SCHELER 2015, mdl. Mittl.). Darüber hinaus ist beim Stoffhaushalt zu berücksichtigen, dass in Hessen die Einträge von Calcium seit Ende der 1980er-Jahre bei Buche etwa um 30 % und bei Fichte um etwa 20 % zurückgegangen sind.

Ein Maß für die Bodenversauerung ist der pH-Wert. Der pH-Wert tritt in seiner Bedeutung als integrierendes Merkmal für den chemischen Bodenzustand von Waldböden allerdings gegenüber der Basensättigung zurück. Die Basensättigung kennzeichnet den Nährstoffstatus der Waldböden. Bei gleichem pH-Wert kann eine sehr unterschiedliche Basenversorgung gegeben sein.

Bei durchschnittlichen Werten zwischen 4,2 und 5,3 pH(H₂O) befinden sich zum Zeitpunkt der BZE II die meisten Böden in Hessen im Austausch- und teilweise sogar im besseren Silikat-Pufferbereich. Die Mittelwerte je Tiefenstufe und auch die Streuungswerte bleiben oberhalb der Grenze zum „wurzeltoxischen“ Aluminium-Pufferbereich. Seit der BZE I ist generell ein Anstieg der pH(H₂O)-Werte

festzustellen. Mit geringerem Säureeintrag geht eine Verbesserung des $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wertes der Bodenlösung einher.

Durch die Erhöhung der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte in der Bodenlösung haben sich auch die Lösungsgleichgewichte verändert. Aluminiumsalze lösen sich, Sulfat wird vom Austauscher abgelöst. Mit dem daraus resultierenden Sulfataustrag werden verstärkt Calcium, Magnesium und Kalium ausgewaschen und gehen dem Boden verloren. Dies verstärkt die säurebedingte Basenabnahme und stellt eine Spätfolge jahrzehntelanger hoher Schwefeleinträge mit teilweise erheblichen Schwefelakkumulationen im Boden dar. Die Schwefelanreicherung kann als ein Memory-Effekt des Bodens angesehen werden.

Eine Abnahme der Schwefelkonzentrationen ist sowohl in Fichtennadeln im zeitlichen Vergleich zwischen 1982/83 (Bionetz) und 2007 (BZE II) als auch für Buchenblätter auf Intensivmonitoringflächen sehr deutlich und statistisch signifikant nachweisbar. Die Blattgehalte spiegeln somit eher die rasant abnehmende Entwicklung der Schwefeldeposition wider als die Trends für Sulfat in der Bodenlösung.

Kalkungsempfohlene, aber bislang noch ungekalkte Standorte werden zur Beantwortung der Frage herangezogen, wie sich die Säurebelastung seit 1992 auf den Basenzustand der Waldböden ausgewirkt hat. Zu der Gruppe mit Kalkungsempfehlung (die sogenannte „Kalkungskulisse“) zählen die Substratgruppen Buntsandstein, Grauwacke, Tonschiefer, Quarzit etc. und damit insgesamt Böden aus saurem Ausgangsgestein, die vor allem im Hauptwurzelraum stark versauert sind. Tatsächlich sind die Waldböden dieser Gruppe seit der BZE I weiter versauert, erkennbar an einer Reduktion der Basensättigung in den Tiefenstufen bis 60 cm. Die Basensättigung erreicht für den oberen Mineralboden (5-30 cm) mit unter 15 % kritische Werte. Dies zeigt sich deutlich am Beispiel des Buntsandsteins, der nur sehr geringe Anteile an Calcium und Magnesium aufweist. Die Ergebnisse der BZE II belegen seit der BZE I eine weitere Verarmung der ungekalkten Buntsandsteine an Calcium- und Magnesium: 500 kg/ha Calciumabnahme im für die Durchwurzelung wichtigen Mineralboden bis 60 cm Bodentiefe innerhalb von nur 15 Jahren. Die Magnesiumvorräte sind an den gekalkten BZE II-Punkten seit der BZE I angestiegen, an den ungekalkten BZE II-Punkten fand eine Abnahme statt. Es ist zu vermuten, dass auf ähnlich sauren Standorten, wie z. B. auf Quarzit, die Entwicklung vergleichbar zum Buntsandstein abgelaufen ist. Allerdings ist dies in den Ergebnissen aufgrund der geringen Stichprobenzahl nicht abzusichern.

Sauer wirkende Kationen, vor allem Aluminium, sind in Waldböden häufig. Unter einer Basensättigung von etwa 20 % wird Aluminium jedoch zu einem dominierenden Kation in der Bodenlösung und entfaltet seine für Ökosysteme destabilisierenden Wirkungen.

9.3.1 *Bewertung*

Trotz des Rückgangs übersteigt auch aktuell der Säureeintrag unter Fichte das nachhaltige Puffervermögen basenarmer Waldböden. Obwohl sich anhand des $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Wertes eine gewisse Verbesserung des Säurezustandes ablesen lässt, zeigt die Basensättigung und die darin enthaltenen Kationen Calcium und Magnesium eine ungünstige Entwicklung für die Gruppe der kalkungsempfohlenen, aber bislang ungekalkten Standorte. Die Waldböden in Hessen versauern in Teilbereichen weiter.

Infolge jahrzehntelanger hoher Säureinträge und deren Nachwirkungen zeigen Stoffbilanzen für nicht gekalkte Intensivflächen des Forstlichen Umweltmonitorings, dass teilweise bereits normale Derbholznutzungen zu negativen Nährstoffbilanzen für Calcium führen würden. Für die Waldentwicklung relevant ist dies auf Standorten mit geringer Basenausstattung.

Die Ergebnisse belegen nachdrücklich, dass die Themen Säureeintrag und Bodenversauerung bei einer Betrachtung der Stabilität hessischer Wälder auch heute noch aktuell sind. Eine weitere politisch unterstützte Verminderung der Säureinträge ist geboten.

9.4 Wie hat sich die Bodenschutzkalkung in Hessen ausgewirkt?

Brauchen wir sie auch in Zukunft?

Das Ziel der Bodenschutzkalkung, für definierte Standorte den Zustand von weniger als 20 % Basensättigung zu verhindern oder seinen Eintritt zu verlangsamen und die durch Säure ausgewaschenen Nährstoffe Calcium und Magnesium zu ergänzen, bleibt auch unter den heutigen Gegebenheiten aktuell.

In Hessen werden die Waldflächen der BZE II unterschieden nach Standorten, die zu kalkan sind und Standorten, für die eine Bodenschutzkalkung nicht empfohlen wird. Als nicht kalkungsnotwendig bewertet sind beispielsweise Basalt, Diabas, Zechstein, Kalk sowie Sand.

Zum Zeitpunkt der BZE II sind in Hessen etwa die Hälfte des Waldes (44 % der BZE II-Punkte) mindestens einmal gekalkt worden. Knapp zwei Drittel der in Hessen gekalkten BZE-Punkte sind Buntsandstein- bzw. Tonschiefer-Standorte, wobei 72 % der BZE II-Buntsandsteinpunkte und 88 % der BZE-Tonschieferpunkte gekalkt wurden. Wie vorgegeben wurden Basalt- und Diabas-Standorte nahezu vollständig von Kalkungsmaßnahmen ausgeschlossen. 60 % der hessischen Lösslehm-Standorte sind bislang nicht gekalkt worden.

Innerhalb der Kulisse der kalkungsbedürftigen Standorte erfolgte in Hessen die Auswahl der zu kalkenden Standorte in der Weise, dass die am stärksten versauerten Standorte prioritär gekalkt wurden. Dieses Vorgehen ist an den Ergebnissen der BZE II nachzuvollziehen. Die bislang ungekalkten BZE II-Punkte weisen mit durchschnittlich $800 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ eine deutlich höhere Ausgangs-Austauschkapazität auf, als die gekalkten BZE-Punkte mit $550 \text{ kmol}_c/\text{ha}$ (BZE I).

Die BZE II-Ergebnisse belegen Kalkungseffekte für die Austauschkapazität, die sich in den Oberböden (0-30 cm) erhöht hat. Auf Profilebene ergibt sich eine Zunahme von 33 kmol_c/ha. Die Basensättigung verbesserte sich im gekalkten Kollektiv bis 30 cm Bodentiefe deutlich. Positive Effekte der Waldkalkung zeigen sich insbesondere für den Buntsandstein (bis in 60 cm Mineralbodentiefe) und für den Tonschiefer (0-5 cm). Im gekalkten Kollektiv fand eine deutliche Calciumzunahme statt. Bezogen auf das Gesamtprofil erhöhten sich die Calciumvorräte um etwa 160 kg/ha.

Die Abnahmen von 500 kg Calcium pro Hektar auf ungekalkten Buntsandstein-Standorten in 15 Jahren begründen die Größenordnung einer üblichen Bodenschutzkalkung mit Dolomit in Höhe von drei Tonnen je Hektar (650 kg Calcium).

Mit der Kalkung ist ebenfalls eine Verbesserung der Magnesiumvorräte verbunden.

Hinsichtlich der Kaliumvorräte unterscheiden sich gekalkte und nicht gekalkte Standorte nicht wesentlich.

Zusammenfassend ergeben sich hinsichtlich der Kalkungsplanungen für die Substratgruppen folgende grundsätzliche Empfehlungen:

Aufgrund der bodenchemischen Entwicklungen seit der BZE I hin zu niedrigeren Basensättigungen und den erheblichen Verlusten von Calcium sind die ungekalkten Buntsandsteine bei der Kalkungsplanung prioritär zu berücksichtigen.

Des Weiteren gehören die ungekalkten Standorte der Substratgruppen Tonschiefer, Grauwacke, Quarzit und Granit weiterhin zur Kalkungskulisse.

Die ausgeprägte Heterogenität der Lösslehme und deren Potentiale im Unterboden (Basensättigung, Nährstoffe) sind bei der Kalkungsplanung für die Lösslehme zu berücksichtigen. Eine genauere Analyse der Lösslehme vor Kalkungsmaßnahmen erscheint erforderlich.

Kalkungsmaßnahmen für die Substratgruppen Basalt/Diabas, Ton(stein), Zechstein und Kalk sind weiterhin nicht erforderlich.

9.4.1 Wirkungen der Bodenschutzkalkung auf die Waldernährung

Die Bewertung der Waldernährung stützt sich auf chemische Analysen der Nährstoffe in Blättern und Nadeln. Die Calciumversorgung von Fichte, Kiefer und Eiche ist gut, rund ein Drittel der ungekalkten Buchen weist jedoch Calciumdefizite auf. Bodenschutzkalkungen führen hier zu einer weiteren Stabilisierung der Calciumernährung.

Mit der Kalkung verbessert sich die Magnesiumernährungssituation bei Buche und Eiche. Außerdem kann die Bodenschutzkalkung dazu beitragen, die Phosphorversorgung der Kiefer zu stabilisieren.

Die Verringerung der Kaliumgehalte nach Bodenschutzkalkungen, die auf Versuchsfeldern teilweise nachgewiesen wurde, im BZE-Kollektiv jedoch nur tendenziell auftrat, sowie die Trends abnehmender Kaliumgehalte erfordern weitere Untersuchungen, um detailliertere Aussagen zu verschiedenen Standorten und Baumarten machen zu können. Die Effekte der Kalkung auf die Kalium-, Schwefel- und Eisengehalte bedürfen näherer Untersuchung.

9.4.2 *Bewertung*

Eine Bodenschutzkalkung puffert Säure ab. Auch werden Basenverluste vor allem infolge hoher Säureeinträge, aber auch durch Sulfatausträge, Biomasseentzug und verringerte basische Einträge aus der Luft durch die Kalkung ausgeglichen. Auf den gekalkten Standorten zeigt sich eine Verbesserung der durchschnittlichen Basensättigung bis 30 cm Mineralbodentiefe. Die Bodenschutzkalkung hat einen langfristig positiven Einfluss auf den chemischen Bodenzustand und auf die Stabilisierung des Nährstoffhaushalts. Außerdem zeigen die Ergebnisse der BZE II deutliche Risiken für schwach nährstoffversorgte Standorte, die bislang nicht gekalkt wurden, auf.

Für das Kollektiv der ungekalkten – aber kalkungsempfohlenen – Standorte und insbesondere für Buntsandstein zeigt sich sehr deutlich, dass sich der schon kritische bodenchemische Zustand im Hauptwurzelraum ohne eine Bodenschutzkalkung weiter verschlechtert. Eine Kalkung dieser Standorte erscheint deshalb von besonderer Dringlichkeit.

Das bisherige Konzept der Bodenschutzkalkung in Hessen hat sich bewährt. Insbesondere bei wiederkehrenden Kalkungen sollte sie standorts- und bedarfsangepasst weitergeführt werden.

9.5 Wie ist der Zustand von Humus und organischer Substanz in hessischen Waldböden? Haben hohe Stickstoffeinträge Auswirkungen auf den Stoffhaushalt und auf die Waldernährung?

9.5.1 *Humusformen*

Die durchschnittliche Trockenmasse im Auflagehumus für alle BZE II-Punkte in Hessen hat sich um 13 % verringert, bei den gekalkten Waldflächen sogar um 20 %.

Obwohl hessische Wälder ein weites Spektrum an Standorten von reich bis arm abdecken und im Basenhaushalt eine ungünstige Entwicklung auf nicht gekalkten Standorten der Kalkungskulisse nachzuweisen ist, zeigt sich für den morphologisch ansprechbaren Humuszustand und die bodenbiologische Aktivität ein eher günstiges Bild. Mit Mull und Mullartigem Moder sind über die Hälfte der Waldböden im hessischen Wald durch eine rasche Zersetzung durch Mikroorganismen und gute Bodendurchmischung durch Bodenwühler geprägt. Beide Humusformen zeigen

eine günstige und zügige Stoffumsetzung im Boden an. Zwischen der BZE I und der BZE II haben sich die Humusformen verbessert. Neben der großflächigen Bodenschutzkalkung sind dafür langjährig hohe Stickstoffeinträge, mehr Wärme und mehr Laubbaumarten in zudem höheren Mischungsanteilen als Gründe zu nennen.

9.5.2 *Stickstoffvorräte*

Parallel zur Trockenmasse verringerte sich zwischen BZE I und II auch der Stickstoffvorrat im Auflagehumus um 14 %. Auf Profilebene beträgt die Abnahme 7 %. Die Stickstoffvorräte verlagerten sich vom Auflagehumus und aus der Bodentiefe von 0-5 cm in den Mineralboden bis 30 cm Tiefe. Diese Entwicklung wird durch die Bodenschutzkalkung weiter begünstigt.

Trotz des luftgetragenen Eintrages von ca. 16 kg pro Hektar und Jahr (Buche) bzw. ca. 25 kg pro Hektar und Jahr (Fichte) anorganischem Stickstoff in der Periode von 1992-2006 haben sich die Stickstoffvorräte auf Profilebene in diesem Zeitraum insgesamt tendenziell verringert. Demgegenüber ergeben modellierte Austragsraten für Stickstoff aus Messdaten des Intensiven Monitorings in Hessen Austräge mit dem Sickerwasser von durchschnittlich ca. 12 kg pro Hektar und Jahr für den Zeitraum 1997-2010, wobei die Austragsraten stark variieren. So zeigen sich unter Buche in der Regel nahezu keine Nitratausträge mit dem Sickerwasser. Auf den Fichtenflächen liegen die Stickstoffausträge dagegen zwischen 1,5 kg und 48 kg pro Hektar im Jahr. Diese Bilanzierungsansätze sind von großen Unsicherheiten und Variabilitäten beeinflusst. Sie geben allerdings Hinweise, dass in den meisten hessischen Waldökosystemen eine erhöhte Stickstoffaufnahme durch die oberirdische Biomasse stattfindet bzw. Lachgasemissionen (N_2O) aus den Waldböden wahrscheinlich sind. Andererseits belegen hohe Stickstoffausträge, dass in Teilbereichen, insbesondere unter Fichte, Stickstoff nicht mehr vollständig im System gespeichert wird, sondern mit dem Sickerwasser in Form von Nitrat ausgewaschen wird. Diese Waldbestände können als stickstoffgesättigt angesehen werden.

9.6 Tragen Waldböden zum Klimaschutz bei? Stellen hessische Waldböden eine Senke für Kohlendioxid dar?

Hessische Waldböden stellen eine wichtige Kohlenstoffsенке dar und dienen damit direkt dem Klimaschutz. Die durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte in Hessens Waldböden von über 80 t/ha zeugen von einer langfristigen Nettospeicherung.

Im Zeitraum 1992 (BZE I) bis 2007 (BZE II) haben die Kohlenstoffvorräte in hessischen Waldböden insgesamt moderat zugenommen (10 %).

Die Ergebnisse für Hessen geben Hinweise auf einen positiven Einfluss der Kalkung auf den Kohlenstoffhaushalt: Zwar wird durch die Waldkalkung der Kohlenstoffvorratsabbau im Auflagehumus deutlich angeregt, insgesamt werden jedoch

diese Kohlenstoffverluste über Vorratsaufbau im Mineralbodenhumus des Oberbodens mehr als kompensiert. Die Kalkung könnte somit die Senkenfunktion für Kohlenstoff in hessischen Waldböden verbessert haben.

Die bislang vorliegenden Ergebnisse zur Höhe der Kohlenstoffvorräte müssen aufgrund erheblicher Variabilitäten und Unsicherheiten hinsichtlich der Quantifizierung des Kohlenstoffhaushaltes von Waldböden mit großer Vorsicht interpretiert werden. Die ermittelten Veränderungen seit der BZE I beruhen auf einer einheitlichen Berechnungsbasis und sind daher als gesichert anzunehmen.

9.7 Auf welchen Standorten ist Trockenstress bei Waldbäumen zu erwarten?

Die Auswertungen zur nutzbaren Feldkapazität der BZE II-Profile belegen, dass für Teilbereiche der Substratgruppen Kalk, Grauwacke und Tonschiefer die Werte der nutzbaren Feldkapazität (nFK) unter 90 mm liegen. Diese Standorte liegen somit im mäßig frischen Bereich bzw. in Bereichen mit noch geringerem Wasserspeichervermögen. Vor dem Hintergrund möglicher Klimaveränderungen sind v. a. die Baumarten Fichte und Buche auf solchen Standorten insbesondere im subkontinentalen Klimabereich einer erhöhten Trockenstressgefährdung ausgesetzt. Wasserhaushaltsmodellierungen für sämtliche BZE II-Punkte werden Wahrscheinlichkeiten der Trockenstressgefährdung für die Hauptbaumarten generieren. Die Modelle sind in Bearbeitung.

9.8 Welche Folgerungen ergeben sich für die Energieholznutzung in hessischen Wäldern?

Dem Schutz der im Boden gespeicherten Nährstoffe und damit dem Erhalt der Bodenfruchtbarkeit kommt bei einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung eine große Bedeutung zu. Die in den Waldökosystemen verfügbaren Nährstoffvorräte sind neben dem Wasser- und Wärmehaushalt eines Standortes entscheidend für das Wachstum und die Vitalität der Waldbestände.

Die Quantifizierung der Nährstoffvorräte im Hauptwurzelraum hessischer Waldböden belegen für die Substratgruppen Quarzit, unverlehmte Sande, schwach verlehmte Sande, Granit, Buntsandstein (sandige Ausprägung) und Tonschiefer, dass sich auf diesen Standorten in der Regel jeweils entweder Calcium oder Magnesium, z. T. auch beide Hauptnährelemente im geringen bzw. im gering-mittleren Bewertungsbereich befinden. Auf diesen Standorten kann eine wiederkehrende Vollbaumnutzung grundsätzlich nicht empfohlen werden.

Wegen der Ernährungsdefizite ist für die *Buche* eine Intensivierung der Nutzung durch die zusätzliche Entnahme von Nichtderbholz (Vollbaumnutzung) aus ernährungskundlicher Sicht nicht zu empfehlen. Für *Fichten* auf Basalt/Diabas und gekalk-

tem Buntsandstein bestehen aufgrund der Ernährungssituation keine Einschränkungen für eine intensivere Nutzung. Für die *Kiefer* zeigten sich Defizite hinsichtlich Phosphor und Magnesium. Vor einer intensiveren Nutzung wird eine Prüfung der örtlichen Kalkungs- und Ernährungssituation empfohlen. Aus der Ernährungssituation der Eiche ergeben sich keine Restriktionen für eine intensivere Nutzung.

9.9 Welche Folgerungen ergeben sich aus den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung II für die hessische Standortkartierung?

Bodenchemische Analysen sind von besonderer Wichtigkeit für eine differenzierte Standortdiagnostik. Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen ermöglichen eine Überprüfung der Trophiebewertungstufen, die im Rahmen der Standortkartierung angewendet 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. Tonschiefer, Grauwacke), durch weitere bodenchemische Untersuchungen verbessert werden sollte. Dies könnte die Nährstoffeinschätzung der Standortkartierung präzisieren, um das standörtliche Potenzial einzelner Standorte besser abschätzen zu können. Dadurch ließen sich forstliche Maßnahmen (u. a. Baumartenwahl, Waldkalkungen und Vollbaumnutzungen) verlässlicher am Standortpotenzial orientieren und nachhaltiger ausrichten.

Die direkte Gegenüberstellung der BZE II-Vegetationsdaten und der auf den Stichprobenpunkten erhobenen bodenchemischen Kenngrößen ermöglichte Analysen der Zusammenhänge zwischen der Pflanzenartenzusammensetzung der Waldbestände und dem chemischen Bodenzustand. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse konnten Zeigerarten identifiziert werden, die operationale Hilfestellungen für die Trophieeinschätzung hessischer Waldstandorte 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 den Waldökosystemen Hessens vorkommen.

9.10 Wer nutzt die Information der Bodenzustandserhebung (BZE als Informationsplattform)? Braucht die forstliche Umweltbeobachtung (Monitoring) eine Bodenzustandserhebung?

9.10.1 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 Veränderungen 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 hessischer Waldböden belegen. Die Information der Bodenzustandserhebung wird ergänzt durch Daten der Waldzustandserhebung, des Intensiven Forstlichen Umweltmonitorings und durch Ergebnisse aus experimentellen Ansätzen. Mit dieser Vernetzung entstehen Möglichkeiten, die bei der BZE vorgefundenen Ergebnisse zu bewerten und Schlussfolgerungen daraus zu entwickeln. Die Informationen zu hessischen Waldböden bieten für die Daseinsvorsorge und Forschung eine äußerst wertvolle Daten- und Planungsgrundlage.

9.10.2 Nationale/Internationale Partner

Die Information aus der BZE eines Bundeslandes ist mit Ergebnissen anderer Bundesländer kompatibel. Daher sind bundesweite Auswertungen der Daten möglich. Die BZE trägt somit zur Erfüllung nationaler und internationaler Berichtspflichten bei. Die BZE Wald besteht 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.

9.10.3 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, Trinkwasser und saubere Luft zu nennen. Daneben schützen Wälder vor Erosion in steileren Lagen und bieten Schutz und Lebensraum für Tiere und Pflanzen. Nicht zuletzt sind kulturelle Leistungen des Waldes zu nennen, die eine Grundlage für die Erholung und für den Tourismus 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 und die Politik in Hessen. 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.

9.10.4 Forstliche Betriebe verschiedener Waldbesitzarten

Die Ergebnisse der BZE I und II sind nach Bodensubstraten und weiteren Standortmerkmalen aufgegliedert. Anhand von regionalisierenden Modellen 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. Wie die BZE II deutlich zeigt, ist in der Bodenschutzkalkung ein wesentlicher Beitrag zu einer Stabilisierung der hessischen Waldböden und damit der hessischen Wälder zu sehen. Die BZE liefert Informationen zur besseren Differenzierung der 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 hessischen 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.

9.10.5 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.

10 Qualitätssicherung

Nils König

10.1 Probenvorbereitung und -analyse

Die im Rahmen der BZE I und BZE II genommenen Humus-, Boden- und Pflanzenproben wurden in unterschiedlichen Laboren der Bundesländer analysiert. In der folgenden Tabelle 41 sind die jeweiligen Labore aufgelistet:

Tabelle 41: Übersicht der an der BZE I und BZE II beteiligten Labore der Bundesländer

Land	BZE I	BZE II
Hessen	bis 2000: Hessische Landwirtschaftliche Versuchsanstalt (HLVA)*, Kassel ab 2000: Hessisches Dienstleistungszentrum für Landwirtschaft, Gartenbau und Naturschutz (HDLGN)*, Kassel Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA)*, Kassel	Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL)*, Kassel und: Umweltlabor der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), Göttingen (teilweise) sowie: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover (teilweise)
Niedersachsen	Umweltlabor der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Göttingen Ab 2006: Umweltlabor der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), Göttingen	Umweltlabor der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), Göttingen und: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover (teilweise)
Sachsen-Anhalt	Landesanstalt für Forstplanung Brandenburg, Labor Eberswalde	Umweltlabor der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) Göttingen und: 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 sind in den folgenden Tabellen 42a bis 42r 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 vorliegen. Die HFA-Codes (GAFA 2014) sind in den Tabellen 43a bis 43r aufgelistet.

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	=	Contineous-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 orange unterlegt	=	Daten im Labor Kassel erhoben
Felder grün unterlegt	=	Daten im Labor Eberswalde 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 42a: Angewandte Methoden bei der BZE I in Hessen, Probenart Boden

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode						
	HFA	HFA	HFA	HFA	HFA	HFA	Methode	Methode	HFA
Effektiv austauschbare Kationen									
Al	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.1.1	ICP	ICP	D1.1.5.2	
Ca	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.1.1	ICP	ICP	D11.1.5.2	
Fe	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.1.1	ICP	ICP	D17.1.5.3	
K	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.1.1	ICP	ICP	D30.1.5.4	
Mg	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.1.1	ICP	ICP	D36.1.5.2	
Mn	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.1.1	ICP	ICP	D37.1.5.3	
Na	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.1.1	ICP	ICP	D39.1.5.4	
pH	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.1.1	pH	pH	D76.1.5.1	
Potentiell austauschbare Kationen									
Ca	A1.2.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	CaCages CPI13.1	CaCages CPI13.1	D11.1.5.2	
K	A1.2.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	KKges CPI13.1	KKges CPI13.1	D30.1.5.4	
Mg	A1.2.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	MgNigges CPI13.1	MgNigges CPI13.1	D36.1.5.2	
Na	A1.2.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	NaNages CPI13.1	NaNages CPI13.1	D39.1.5.4	
Ba- Rücktausch	A1.2.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	BaBages CPI10.1	BaBages CPI10.1	D4.1.5.3	
Wässriger 1:2 Extrakt									
Al	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.2.1	ICP	ICP	D1.1.4.2	
Ca	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.2.1	ICP	ICP	D11.1.4.2	
Cl	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.2.1	IC	IC	D13.2.4.1	
Cges	x	x	x	x	x	x	x	x	
Fe	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.2.1	ICP	ICP	D17.1.4.2	
K	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.2.1	Flammenphotometer	Flammenphotometer	D30.1.4.3	
Mg	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.2.1	ICP	ICP	D36.1.4.2	
Mn	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.2.1	ICP	ICP	D37.1.4.3	
Na	A1.2.1	A1.3.1	x	x	A3.2.2.1	Flammenphotometer	Flammenphotometer	D39.1.4.4	

(Fortsetzung Tabelle 42a)

Niges	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
NH4-N		A1.2.1	A1.3.1	x	x	x	x	x	A3.2.2.1	CFC	D58.3.4.3			
NO3-N		A1.2.1	A1.3.1	x	x	x	x	x	A3.2.2.1	CFC	D58.4.4.2			
PO4-P		A1.2.1	A1.3.1	x	x	x	x	x	A3.2.2.1	IC	D44.2.4.1			
pH		A1.2.1	A1.3.1	x	x	x	x	x	A3.2.2.1	pH	D76.1.4.3			
SO4-S		A1.2.1	A1.3.1	x	x	x	x	x	A3.2.2.1	IC	D54.2.4.1			
Säureextrakt Königswasser														
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
P	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	A3.2.7	ICP	D44.1.6.1								
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		

(Fortsetzung Tabelle 42a)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Untersuchungsmethoden				Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	HFA	Sieben Methode	HFA	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	
Elementaranalyse											
C _{org}		A1.2.1		A1.3.1		A1.4.1	x		EA	D31.1.1.1	
N		A1.2.1		A1.3.1		A1.4.1	x		EA	D58.1.1.1	
Carbonat-Gehalt											
x		x		x		x			x	x	
pH-Wert (H₂O)											
pH		A1.2.1		A1.3.1	x			A3.1.1.1	pH	D76.1.4.1	
pH-Wert (CaCl₂)											
x		x		x		x			x	x	
pH-Wert (KCl)											
pH		A1.2.1		A1.3.1	x			A3.1.1.3	pH	D76.1.5.1	
Trockenrohhdichte des Feinbodens											
TRDF	T5.1	x		x		x		TRDF2.1	A2.8	x	
Skelettanteil											
SKA	T5.1	x		x		x		TRDF2.1	A2.8	x	

Tabelle 42b: Angewandte Methoden bei der BZE II in Hessen, Probenart Boden

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode						
	HFA	HFA	HFA	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	Methode
Effektiv austauschbare Kationen									
Al	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKE	A3.2.1.1	ICP	D11.1.5.2	D11.1.5.2
Ca	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKE	A3.2.1.1	ICP	D17.1.5.3	D30.1.5.4
Fe	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKE	A3.2.1.1	ICP	D36.1.5.2	D37.1.5.3
K	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKE	A3.2.1.1	ICP	D39.1.5.4	D76.1.5.1
Mg	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKE	A3.2.1.1	ICP		
Mn	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKE	A3.2.1.1	ICP		
Na	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKE	A3.2.1.1	ICP		
pH	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKE	A3.2.1.1	pH		
Potentiell austauschbare Kationen									
Ca	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	AKT2.1	A3.2.1.2	CaCagesICP13.1	D11.1.5.2	D30.1.5.4
K	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	AKT2.1	A3.2.1.2	KKgesICP13.1	D36.1.5.2	D39.1.5.4
Mg	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	AKT2.1	A3.2.1.2	MgMggesICP13.1	D39.1.5.4	D4.1.5.3
Na	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	AKT2.1	A3.2.1.2	NaNagesICP13.1		
Ba-Rücktausch	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	AKT2.1	A3.2.1.2	BaBagesICP10.1		
Wässriger 1:2 Extrakt									
Al	A1.2.1		A1.3.2	x	EXTH2O	A3.2.2.1	ICP	D11.1.4.2	D11.1.4.2
Ca	A1.2.1		A1.3.2	x	EXTH2O	A3.2.2.1	ICP	D13.2.4.1	D31.1.4.1
Cl	A1.2.1		A1.3.2	x	EXTH2O	A3.2.2.1	IC	D17.1.4.2	
Cges	A1.2.1		A1.3.2	x	EXTH2O	A3.2.2.1	E/A		
Fe	A1.2.1		A1.3.2	x	EXTH2O	A3.2.2.1	ICP		

(Fortsetzung Tabelle 42b)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Untersuchungsmethoden				Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	HFA	Sieben Methode	HFA	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	Methode	HFA	Methode
K		A1.2.1		A1.3.2	x		EXTH2O	A3.2.2.1		ICP		D30.1.4.4
Mg		A1.2.1		A1.3.2	x		EXTH2O	A3.2.2.1		ICP		D36.1.4.2
Mn		A1.2.1		A1.3.2	x		EXTH2O	A3.2.2.1		ICP		D37.1.4.3
Na		A1.2.1		A1.3.2	x		EXTH2O	A3.2.2.1		ICP		D39.1.4.4
Niges		A1.2.1		A1.3.2	x		EXTH2O	A3.2.2.1		EA		D58.1.4.4
NH4-N		A1.2.1		A1.3.2	x		EXTH2O	A3.2.2.1		CFC		D58.3.4.3
NO3-N		A1.2.1		A1.3.2	x		EXTH2O	A3.2.2.1		IC		D58.4.4.2
PO4-P		A1.2.1		A1.3.2	x		x	x				x
pH		A1.2.1		A1.3.2	x		EXTH2O	A3.2.2.1		pH		D76.1.4.3
SO4-S		A1.2.1		A1.3.2	x		EXTH2O	A3.2.2.1		IC		D54.2.4.1
Säureextrakt Königswasser												
Al		A1.2.1		A1.3.2			KW	A3.2.7		ICP		D1.1.6.2
Ca		A1.2.1		A1.3.2			KW	A3.2.7		ICP		D11.1.6.2
Cd		A1.2.1		A1.3.2			KW	A3.2.7		ICP-MS		D9.1.6.5
Cr		A1.2.1		A1.3.2			KW	A3.2.7		ICP		D14.1.6.5
Cu		A1.2.1		A1.3.2			KW	A3.2.7		ICP-MS		D32.1.6.8
Fe		A1.2.1		A1.3.2			KW	A3.2.7		ICP		D17.1.6.2
K		A1.2.1		A1.3.2			KW	A3.2.7		ICP		D30.1.6.4
Mg		A1.2.1		A1.3.2			KW	A3.2.7		ICP		D36.1.6.2
Mn		A1.2.1		A1.3.2			KW	A3.2.7		ICP		D37.1.6.3
Ni		A1.2.1		A1.3.2			KW	A3.2.7		ICP		D42.1.6.6
P		A1.2.1		A1.3.2			KW	A3.2.7		ICP		D44.1.6.1
Pb		A1.2.1		A1.3.2			KW	A3.2.7		ICP-MS		D6.1.6.7
S		A1.2.1		A1.3.2			KW	A3.2.7		ICP		D54.1.6.1
Zn		A1.2.1		A1.3.2			KW	A3.2.7		ICP		D73.1.6.4

(Fortsetzung Tabelle 42b)

Elementaranalyse									
Corg		A1.2.1	A1.3.2	A1.4.1	x	x	EA	D31.1.1.1	
N		A1.2.1	A1.3.2	A1.4.1	x	x	EA	D58.1.1.1	
Carbonat-Gehalt									
CO ₃ -C		A1.2.1	A1.3.2	A1.4.1	x	x	EA	D31.3.1.3	
pH-Wert (H₂O)									
pH		A1.2.1	A1.3.2	x	pH H ₂ O	A3.1.1.2	pH	D76.1.5.1	
pH-Wert (CaCl₂)									
pH		A1.2.1	A1.3.2	x	pH CaCl ₂	A3.1.1.7	pH	D76.1.5.1	
pH-Wert (KCl)									
pH		A1.2.1	A1.3.2	x	pH KCl	A3.1.1.4	pH	D76.1.5.1	
Trockenrohichte des Feinbodens									
TRDF	T5.1	x	x	x	TRDF2.1	A2.8	x	x	
Skelettanteil									
SKA	T5.1	x	x	x	TRDF2.1	A2.8	x	x	

Tabelle 42c: Angewandte Methoden bei der BZE I in Hessen, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Mahlen		Untersuchungsmethoden		Elementbestimmungsmethoden	
	Trocknen Methode	HF/A	Sieben Methode	HF/A	Methode	HF/A	Methode	HF/A	Methode	HF/A
Austauschbare Kationen										
Al	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ca	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Fe	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
K	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mg	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mn	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Na	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
pH	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Säureextrakt Königswasser										
Al	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	KW	A3.3.3	ICP	D1.1.6.2			
Ca	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	KW	A3.3.3	ICP	D11.1.6.2			
Cd	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	KW	A3.3.3	ICP	D9.1.4.3			
Cr	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	KW	A3.3.3	ICP	D14.1.6.5			
Cu	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	KW	A3.3.3	ICP	D32.1.4.4			
Fe	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	KW	A3.3.3	ICP	D17.1.6.2			
K	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	KW	A3.3.3	ICP	D30.1.6.4			
Mg	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	KW	A3.3.3	ICP	D36.1.6.2			
Mn	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	KW	A3.3.3	ICP	D37.1.6.3			

(Fortsetzung Tabelle 42c)

Ni	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	KW	A3.3.3	ICP	D42.1.6.6
P	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	KW	A3.3.3	ICP	D44.1.6.1
Pb	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	KW	A3.3.3	ICP	D6.1.4.3
S	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	KW	A3.3.3	ICP	D54.1.6.1
Zn	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	KW	A3.3.3	ICP	D73.1.6.4
Elementaranalyse							
C	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	x	x	EA	D31.1.2.1
N	A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	x	x	EA	D58.1.2.1
Carbonat-Gehalt							
CO ₃ -C	x	x	x	x	x	x	x
pH-Wert (H₂O)							
pH	A1.2.1	A1.3.1	x	pH H ₂ O	A3.1.1.1	pH	D76.1.4.1
pH-Wert (CaCl₂)							
pH	x	x	x	x	x	x	x
pH-Wert (KCl)							
pH	A1.2.1	A1.3.1	x	pH KCl	A3.1.1.3	pH	D76.1.5.1
Humusvorrat							
HV	A1.2.1	x	x	HV	A ₂ .4	x	x

Tabelle 42d: Angewandte Methoden bei der BZE II in Hessen, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode						
	HFA	HFA	HFA	HFA	HFA	HFA	HFA	Methode	Methode
Austauschbare Kationen									
Al	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKH	A3.2.1.9	ICP	D1.1.5.2	
Ca	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKH	A3.2.1.9	ICP	D11.1.5.2	
Fe	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKH	A3.2.1.9	ICP	D17.1.5.3	
K	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKH	A3.2.1.9	ICP	D30.1.5.4	
Mg	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKH	A3.2.1.9	ICP	D36.1.5.2	
Mn	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKH	A3.2.1.9	ICP	D37.1.5.3	
Na	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKH	A3.2.1.9	ICP	D39.1.5.4	
pH	A1.2.1	A1.3.2	x	x	AKH	A3.2.1.9	pH	D76.1.5.1	
Säureextrakt Königswasser									
Al	A1.2.1	A1.3.2	x	x	KW	A3.3.3	ICP	D1.1.6.2	
Ca	A1.2.1	A1.3.2	x	x	KW	A3.3.3	ICP	D11.1.6.2	
Cd	A1.2.1	A1.3.2	x	x	KW	A3.3.3	ICP-MS	D9.1.6.5	
Cr	A1.2.1	A1.3.2	x	x	KW	A3.3.3	ICP	D14.1.6.5	
Cu	A1.2.1	A1.3.2	x	x	KW	A3.3.3	ICP-MS	D32.1.6.8	
Fe	A1.2.1	A1.3.2	x	x	KW	A3.3.3	ICP	D17.1.6.2	
K	A1.2.1	A1.3.2	x	x	KW	A3.3.3	ICP	D30.1.6.4	
Mg	A1.2.1	A1.3.2	x	x	KW	A3.3.3	ICP	D36.1.6.2	
Mn	A1.2.1	A1.3.2	x	x	KW	A3.3.3	ICP	D37.1.6.3	
Ni	A1.2.1	A1.3.2	x	x	KW	A3.3.3	ICP	D42.1.6.6	
P	A1.2.1	A1.3.2	x	x	KW	A3.3.3	ICP	D44.1.6.1	

(Fortsetzung Tabelle 42d)

Pb	A1.2.1	A1.3.2	x	x	KW	A3.3.3	ICP-MS	D6.1.6.7	
S	A1.2.1	A1.3.2	x	x	KW	A3.3.3	ICP	D54.1.6.1	
Zn	A1.2.1	A1.3.2	x	x	KW	A3.3.3	ICP	D73.1.6.4	
Elementaranalyse									
C	A1.2.1	A1.3.2		A1.4.1	x	x	EA	D31.1.2.1	
N	A1.2.1	A1.3.2		A1.4.1	x	x	EA	D58.1.2.1	
Carbonat-Gehalt									
CO ₃ -C	A1.2.1	A1.3.2		A1.4.1	x	x	EA	D31.3.2.3	
pH-Wert (H₂O)									
pH	A1.2.1	A1.3.2	x	x	pH	A3.1.1.2	pH	D76.1.5.1	
pH-Wert (CaCl₂)									
pH	A1.2.1	A1.3.2	x	x	pH	A3.1.1.7	pH	D76.1.5.1	
pH-Wert (KCl)									
pH	A1.2.1	A1.3.2	x	x	pH	A3.1.1.4	pH	D76.1.5.1	
Humusvorrat									
HV	T4.1	A1.2.1	x	x	HV4.1	A2.6	x	x	

Tabelle 42e: Angewandte Methoden bei der BZE I in Hessen, Probenart Pflanze

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA
Säureextrakt Salpetersäure										
Al	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ca	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cd	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Co	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cr	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cu	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Fe	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
K	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Mg	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Mn	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Na	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ni	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
P	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pb	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
S	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Zn	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Elementaranalyse										
C	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
N	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Blattgewichte										
BGW	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Nadelgewichte										
NWG	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabelle 42f: Angewandte Methoden bei der BZE II in Hessen, Probenart Pflanze

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	HFA	HFA	Methode	Methode	Methode	
Säureextrakt Salpetersäure										
Al	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	AlAgcsICP15.1	D1.1.6.2
Ca	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CaCagesICP15.1	D11.1.6.3
Cd	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CdCdgesICP15.1	D9.1.6.4
Co	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CoCogesICP15.1	D15.1.6.6
Cr	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CrCragesICP15.1	D14.1.6.5
Cu	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CuCuagesICP15.1	D32.1.6.6
Fe	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	FeFeagesICP15.1	D17.1.6.2
K	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	KKgesICP15.1	D30.1.6.4
Mg	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	MgMggesICP15.1	D36.1.6.2
Mn	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	MnMngesICP15.1	D37.1.6.4
Na	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	NaNagesICP15.1	D39.1.6.4
Ni	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	NiNiagesICP15.1	D42.1.6.6
P	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	PPgesICP15.1	D44.1.6.1
Pb	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	PbPbagesICP15.1	D6.1.6.6
S	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	SSgesICP15.1	D54.1.6.1
Zn	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	ZnZngesICP15.1	D73.1.6.4
Elementaranalyse										
C	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	ATNULL	x	CCgesCNS5.1	D31.1.3.1
N	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	ATNULL	x	NNgesCNS5.1	D58.1.3.1
Blattgewichte										
BGW	T4.1	B1.2.1	x	x	x	x	BGW1.1	B2.3	x	x
Nadelgewichte										
NGW	T4.1	B1.2.1	x	x	x	x	NWG1.2	B2.2	x	x

Tabelle 42g: Angewandte Methoden bei der BZE I in Niedersachsen, Probenart Boden

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Untersuchungsmethoden				Elementbestimmungsmethoden				
	Trocknen Methode	HFA	Sieben Methode	HFA	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	Methode	HFA	Methode	HFA
Effektiv austauschbare Kationen													
Al	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	AlAgcsAAS2.1	D1.1.5.1			
Ca	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	CaCagesAAS2.1	D11.1.5.1			
Fe	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	FeFegcsAAS2.1	D17.1.5.1			
K	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	KKgcsAAS2.1	D30.1.5.2			
Mg	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	MgMgcsAAS2.1	D36.1.5.1			
Mn	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	MnMngcsAAS2.1	D37.1.5.1			
Na	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	NaNagcsAAS2.1	D39.1.5.2			
pH	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKE1.1	A3.2.1.1	HH+2PHMI.1	D76.1.5.1			
Potentiell austauschbare Kationen													
Ca	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	A3.2.1.2	CaCagesAAS2.1	D11.1.5.1			
K	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	A3.2.1.2	KKgcsAAS2.1	D30.1.5.2			
Mg	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	A3.2.1.2	MgMgcsAAS2.1	D36.1.5.1			
Na	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	A3.2.1.2	NaNagcsAAS2.1	D39.1.5.2			
Ba-Rücktausch	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	AKT2.1	A3.2.1.2	BaBagesICP1.1	D4.1.5.2			
Wässriger Extrakt													
Al	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	AlAgcsAAS1.1	D1.1.4.1			
Ca	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	CaCagesAAS1.1	D11.1.4.1			
									CaCagesICP1.1	D11.1.4.2			

(Fortsetzung Tabelle 42g)

Cl	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	ClCFC1.1	D13.2.4.3
Cges	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	CgesTOC1.1	D31.1.4.1
Canorg	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	CCanorgTOC1.1	D31.3.4.3
Fe	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	FeFegesAAS1.1	D17.1.4.1
									FeFegesICP1.1	D17.1.4.2
K	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	KKgesAAS1.1	D30.1.4.2
									KKgesICP1.1	D30.1.4.4
Leitfähigkeit	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	LFLFLM1.1	D77.1.4.2
Mg	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	MgMggesAAS1.1	D36.1.4.1
									MgMggesICP1.1	D36.1.4.2
Mn	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	MnMngesAAS1.1	D37.1.4.1
									MnMngesICP1.1	D37.1.4.3
Na	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	NaNagesAAS1.1	D39.1.4.2
									NaNagesICP1.1	D39.1.4.4
Nges	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	NNgesCFC1.1	D58.1.4.2
NH4-N	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	NNH4CFC1.1	D58.3.4.3
NO3-N	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	NNO2+3CFC2.1	D58.4.4.2
Pges	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	PPgesICP1.1	D44.1.4.1
PO4-P	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	PPO4CFC1.2	D44.2.4.3
pH	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	HH+PHM1.1	D76.1.4.1
SO4-S	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	SSO4CFC1.1	D54.2.4.3

(Fortsetzung Tabelle 42g)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	HFA	HFA	Methode	Methode	Methode	
Säureextrakt Salpetersäure										
P	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	DAN1.1	A.3.3.4	PPO4CFC2.1	D44.2.6.1
									PPO4CFC2.2	D44.2.6.1
Säureextrakt Königswasser										
Al	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	AlAlgesICP16.1	D11.1.6.2
									AlAlgesICP19.1	D11.6.2
Ca	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CaCagesICP16.1	D11.1.6.3
									CaCagesICP19.1	D11.1.6.3
Cd	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CdCdgesICP16.1	D9.1.6.4
									CdCdgesAAS8.1	D9.1.6.3
Co	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CoCogesICP16.1	D15.1.6.6
									CoCogesICP19.1	D15.1.6.6
Cr	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CrCgesICP16.1	D14.1.6.5
									CrCgesICP19.1	D14.1.6.5
Cu	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CuCuGesICP16.1	D32.1.6.6
									CuCuGesICP19.1	D32.1.6.6
Fe	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	FeFegesICP16.1	D17.1.6.2
									FeFegesICP19.1	D17.1.6.2
K	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	KKgesICP16.1	D30.1.6.4
									KKgesICP19.1	D30.1.6.4
Mg	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MgMggesICP16.1	D36.1.6.2
									MgMggesICP19.1	D36.1.6.2
Mn	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MnMngesICP16.1	D37.1.6.3
									MnMngesICP19.1	D37.1.6.3

(Fortsetzung Tabelle 42g)

Na	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NaNagesICP16.1	D39.1.6.4
									NaNagesICP19.1	D39.1.6.4
Ni	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NiNigesICP16.1	D42.1.6.6
									NiNigesICP16.2	D42.1.6.6
P	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PPgesICP16.1	D44.1.6.1
									PPgesICP16.2	D44.1.6.1
Pb	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PbPbgesICP16.1	D6.1.6.6
									PbPbgesICP19.1	D6.1.6.6
S	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	SSgesICP16.1	D54.1.6.1
									SSgesICP19.1	D54.1.6.1
Zn	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	ZnZngesICP16.1	D73.1.6.4
									ZnZngesICP19.1	D73.1.6.4

Gesamtgehalte

Al	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Ca	x	x	x	x	x	x		x	x	x
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	x	x	x	x	x	x		x	x	x
K	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Mg	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Mn	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Na	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Ni	x	x	x	x	x	x		x	x	x
P	x	x	x	x	x	x		x	x	x
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

(Fortsetzung Tabelle 42g)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	HFA	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	
Elementaranalyse										
C	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	x	CgesCNS1.1	D31.1.1.1
N	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	x	NNgesCNS1.1	D58.1.1.1
Carbonat-Gehalt										
CO3-C	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	CO3ges1.1	x	CCO3SCH1.1	D31.1.1.1
pH-Wert (H2O)										
pH	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	pHH2O1.1	A3.1.1.1	HH+PHM1.1	D76.1.4.1
							pHH2O1.2	A3.1.1.1	HH+PHM1.1	D76.1.4.1
pH-Wert (CaCl2)										
pH	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
pH-Wert (KCl)										
pH	T3.1	A1.2.1	SBP1.1	A1.3.1	x	x	pHKCl1.1	A3.1.1.3	HH+PHM1.1	D76.1.5.1
							pHKCl1.2	A3.1.1.3	HH+PHM1.1	D76.1.5.1
Trockenrohichte des Feinbodens										
TRDF	T5.1	x	x	x	x	x	TRD1.1	A2.2	x	x
Skelettanteil										
SKA	T5.1	x	x	x	x	x	TRDF2.1	A2.8	x	x
							TRD1.1	A2.2	x	x

Tabelle 42b: Angewandte Methoden bei der BZE II in Niedersachsen, Probenart Boden

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Untersuchungsmethoden				Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	HFA	Sieben Methode	HFA	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA
Effektiv austauschbare Kationen												
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		
Potenitiell austauschbare Kationen												
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		
Wässriger Extrakt												
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	ClClCFE3.2	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		

(Fortsetzung Tabelle 42h)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	Methode	Methode	Methode	Methode	Methode	Methode
Canorg	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	HFA A1.3.2	x	EXTH2O1.1	HFA A3.2.2.1	CCanorgTOC3.1	D31.3.4.3	
Fe	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	FeFegesICP7.2	D17.1.4.2	
K	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	KKgesICP7.2	D30.1.4.4	
Leitfähigkeit	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	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	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	MgNagesICP7.2	D36.1.4.2	
Mn	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	MnMngesICP7.2	D37.1.4.3	
Na	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	NaNagesICP7.2	D39.1.4.4	
Nges	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	NNgesTOC2.1	D58.1.4.4	
NH4-N	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	NNgesTOC2.2	D58.1.4.4	
NO3-N	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	NNH4CFC6.1	D58.3.4.3	
Pges	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	NNO2+3CFC5.4	D58.4.4.2	
PO4-P	x	x	x	x	x	x	PPgesICP7.2	D44.1.4.1	
pH	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	HH+PHM6.1	D76.1.4.3	
SO4-S	x	x	x	x	x	x	x	x	
Sges	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	SSgesICP10.2	D54.1.4.1	
Säureextrakt Salpetersäure									
P	x	x	x	x	x	x	x	x	
Säureextrakt Königswasser									
Al	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1 OAKW1.1	A3.3.3	AlAlgesICP16.1	D1.1.6.2	
Al					A1.4.1 KW	A3.3.3		D1.1.6.2	
Ca	T3.1	A1.2.1 SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1 OAKW1.1	A3.3.3	CaCagesICP16.1	D11.1.6.3	
Ca					A1.4.1 KW	A3.3.3		D11.1.6.3	

(Fortsetzung Tabelle 42h)

Cd	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CdCdggesICP16.1	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	CoCogesICP16.1	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	CrCrgesICP16.1	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	CuCuogesICP16.1	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	FeFegesICP16.1	D17.1.6.2
Fe						A1.4.1	KW	A3.3.3		D17.1.6.4
K	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	KKggesICP16.1	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	MgMggesICP16.1	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	NiNiggesICP16.1	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

(Fortsetzung Tabelle 42h)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Mahlen	Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden	
	Trocknen Methode	Sieben Methode	HFA		HFA	Methode	HFA		Methode
Zn	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	ZnZngesICP16.1	D73.1.6.4
Zn						A1.4.1	KW	A3.3.3	D73.1.6.6
Gesamtgehalte									
Al	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	AlAlgesICP16.1	D11.1.6.2
Ca	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	CaCagesICP16.1	D11.1.6.3
Cd	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	CdCdgesAAS8.1	D9.1.6.3
Co	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	CoCogesICP16.1	D15.1.6.6
Cr	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	CrCragesICP16.1	D14.1.6.5
Cu	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	CuCuagesICP16.1	D32.1.6.6
Fe	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	FeFegesICP16.1	D17.1.6.2
K	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	KKgesICP16.1	D30.1.6.4
Mg	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	MgNlgesICP16.1	D36.1.6.2
Mn	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	MnMngesICP16.1	D37.1.6.3
Na	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	NaNagesICP16.1	D39.1.6.4
Ni	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	NiNlgesICP16.1	D42.1.6.6
P	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	PPgesICP16.1	D44.1.6.1
Pb	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	PbPbgesICP16.1	D6.1.6.6
S	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	SSgesICP16.1	D54.1.6.1
Zn	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	DANF1.1	ZnZngesICP16.1	D73.1.6.4
Elementaranalyse									
C	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	CCgesCNS5.1	D31.1.1.1
N	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	NNgesCNS5.1	D58.1.1.1

(Fortsetzung Tabelle 42h)

Carbonat-Gehalt										
CO ₃ -C	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	ATNULLCO ₃	x	CCO ₃ C1.1	D31.3.1.3
pH-Wert (H₂O)										
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
pH									HH+PHM7.1	D76.1.5.1
pH-Wert (CaCl₂)										
pH	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	x	pHCaCl26.1	A3.1.1.7	HH+PHM5.1	D76.1.5.1
									HH+PHM7.1	D76.1.5.1
pH-Wert (KCl)										
pH	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	x	pHKCl6.1	A3.1.1.4	HH+PHM5.1	D76.1.5.1
Trockenrohddichte des Feinbodens										
x	T5.1	x	x	x	x	x	TRDF2.1	A2.8	x	x
Skelettanteil										
x	T5.1	x	x	x	x	x	TRDF2.1	A2.8	x	x

Tabelle 42i: Angewandte Methoden bei der BZE I in Niedersachsen, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Untersuchungsmethoden				Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	HFA	Sieben Methode	HFA	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA
Austauschbare Kationen												
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
Säureextrakt Salpetersäure												
Al	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	DAN2.1	A3.3.4	AlAgessICP1.1	D1.1.6.2		
Ca	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	DAN2.1	A3.3.4	CaCagesICP1.1	D1.1.6.2		
Cd	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	DAN2.1	A3.3.4	CdCdAAS3.1	D9.1.6.3		
Cu	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	DAN2.1	A3.3.4	CuCuAAS3.1	D32.1.6.4		
Fe	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	DAN2.1	A3.3.4	FeFeGesICP1.1	D17.1.6.2		
K	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	DAN2.1	A3.3.4	KKGesICP1.1	D30.1.6.4		
Mg	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	DAN2.1	A3.3.4	MgMggesICP1.1	D36.1.6.2		
Mn	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	DAN2.1	A3.3.4	MnMngesICP1.1	D37.1.6.3		
P	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	DAN2.1	A3.3.4	PPgesICP1.1	D44.1.6.1		
Pb	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	DAN2.1	A3.3.4	PbPbAAS3.1	D6.1.6.3		
Zn	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	DAN2.1	A3.3.4	ZnZngesICP1.1	D73.1.6.4		

(Fortsetzung Tabelle 42i)

Säureextrakt Königswasser										
Al	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	AlAlgesICP16.1	D11.1.6.2
Al							KW	A3.3.3	ICP	D11.1.6.2
Ca	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CaCagesICP16.1	D11.1.6.3
Ca							KW	A3.3.3	ICP	D11.1.6.2
Cd	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CdCdgesAAS8.1	D9.1.6.3
Cd							KW	A3.3.3	ICP-MS	D9.1.6.5
Co	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CoCogesICP16.1	D15.1.6.6
Cr	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CrCagesICP16.1	D14.1.6.5
Cr							KW	A3.3.3	ICP	D14.1.6.5
Cu	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CuCogesICP16.1	D32.1.6.6
Cu							KW	A3.3.3	ICP-MS	D32.1.6.8
Fe	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	FeFegesICP16.1	D17.1.6.2
Fe							KW	A3.3.3	ICP	D17.1.6.2
K	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	KKgesICP16.1	D30.1.6.4
K							KW	A3.3.3	ICP	D30.1.6.4
Mg	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MgNagesICP16.1	D36.1.6.2
Mg							KW	A3.3.3	ICP	D36.1.6.2
Mn	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MnMngesICP16.1	D37.1.6.3
Mn							KW	A3.3.3	ICP	D37.1.6.3
Na	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NaNagesICP16.1	D39.1.6.4
Ni	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NiNigesICP16.1	D42.1.6.6
Ni							KW	A3.3.3	ICP	D42.1.6.6
P	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PPgesICP16.1	D44.1.6.1
P							KW	A3.3.3	ICP	D44.1.6.1

(Fortsetzung Tabelle 42)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode							
Pb	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	HFA A1.3.1	MBP1.1	HFA A1.4.1	Methode OAKW1.1	HFA A3.3.3	Methode PbPbgesICP16.1	D6.1.6.6
Pb							KW	A3.3.3	ICP-MS	D6.1.6.7
S	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	SSgesICP16.1	D54.1.6.1
S							KW	A3.3.3	ICP	D54.1.6.1
Zn	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	ZnZngesICP16.1	D73.1.6.4
Zn							KW	A3.3.3	ICP	D73.1.6.4
Elementaranalyse										
C	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	x	CCgesCNS1.1	D31.1.2.1
N	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	x	NNgesCNS1.1	D58.1.2.1
Carbonat-Gehalt										
C-CO ₃	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
pH-Wert (H₂O)										
pH	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	x	x	pHH2O2.1	A3.1.1.1	HH+PHM1.1	D76.1.4.1
pH-Wert (CaCl₂)										
pH	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
pH-Wert (KCl)										
pH	T4.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.1	x	x	pHKCl2.1	A3.1.1.3	HH+PHM1.1	D76.1.5.1
Humusvorrat										
HV	T4.1	A1.2.1	x	x	x	x	HV1.1	A2.4	x	x

Tabelle 42j: Angewandte Methoden bei der BZE II in Niedersachsen, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Untersuchungsmethoden		Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode		Methode		Methode		
Austauschbare Kationen									
Al	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	AlAlgesICP10.1	D1.1.5.2
Ca	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	CaCagesICP10.1	D11.1.5.2
Fe	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	FeFegesICP10.1	D17.1.5.3
K	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	KKgesICP10.1	D30.1.5.4
Mg	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	MgMggesICP10.1	D36.1.5.2
Mn	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	MnMngesICP10.1	D37.1.5.3
Na	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	NaNagesICP10.1	D39.1.5.4
pH	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	A3.2.1.9	HH+2PHM4.1	D76.1.5.1
Säureextrakt Salpetersäure									
Al	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ca	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cd	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cu	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
Mg	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mn	x	x	x	x	x	x	x	x	x
P	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Pb	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Zn	x	x	x	x	x	x	x	x	x

(Fortsetzung Tabelle 42)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Mahlen	Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	Sieben Methode	HFA		HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	Methode
Säureextrakt Königswasser										
Al	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	AlAlgesICP16.1	D11.1.6.2
Ca	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CaCagesICP16.1	D11.1.6.3
Cd	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CdCdgesAAAS8.1	D9.1.6.3
Co	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CoCogesICP16.1	D15.1.6.6
Cr	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CrCagesICP16.1	D14.1.6.5
Cu	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CuCuGesICP16.1	D32.1.6.6
Fe	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	FeFegesICP16.1	D17.1.6.2
K	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	KKgesICP16.1	D30.1.6.4
Mg	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MgMggesICP16.1	D36.1.6.2
Mn	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MnMngesICP16.1	D37.1.6.3
Na	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NaNaGesICP16.1	D39.1.6.4
Ni	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NiNiGesICP16.1	D42.1.6.6
P	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PPgesICP16.1	D44.1.6.1
Pb	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PbPbgesICP16.1	D6.1.6.6
S	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	SSgesICP16.1	D54.1.6.1
Zn	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	ZnZngesICP16.1	D73.1.6.4
Elementaranalyse										
C	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CCgesCNS5.1	D31.1.2.1
N	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NNgesCNS5.1	D58.1.2.1
Carbonat-Gehalt										
CO3-C	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	x	CCO3C1.1	D31.3.2.3

(Fortsetzung Tabelle 42)

pH-Wert (H₂O)										
pH	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	x	pHH ₂ O6.1	A3.1.1.2	HH+PHM5.1	D76.1.5.1
pH-Wert (CaCl₂)										
pH	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	x	pHCaCl ₂ 6.1	A3.1.1.7	HH+PHM5.1	D76.1.5.1
pH-Wert (KCl)										
pH	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	x	pHKCl6.1	A3.1.1.4	HH+PHM5.1	D76.1.5.1
Humusvorrat										
HV	T4.1	A1.2.1	x	x	x	x	HV4.1	A2.6	x	x

Tabelle 42k: Angewandte Methoden bei der BZE I in Niedersachsen, Probenart Pflanze

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	HFA	HFA	HFA	Methode	Methode
Säureextrakt Salpetersäure									
Al	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	AlAgcsICP1.1	D1.1.6.2	
Ca	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	CaCagesICP1.1	D11.1.6.2	
Cd	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	CdCdAAS3.1	D9.1.6.3	
Co	x	x	x	x	x	x	x	x	
Cr	x	x	x	x	x	x	x	x	
Cu	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	CuCuAAS3.1	D32.1.6.4	
Fe	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	FeFeAgcsICP1.1	D17.1.6.2	
K	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	KKAgcsICP1.1	D30.1.6.4	
Mg	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	MgMgAgcsICP1.1	D36.1.6.2	
Mn	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	MnMnAgcsICP1.1	D37.1.6.3	
Na	x	x	x	x	x	x	x	x	
Ni	x	x	x	x	x	x	x	x	
P	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	PPAgcsICP1.1	D44.1.6.1	
Pb	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	PbPbAAS3.1	D6.1.6.3	
S	x	x	x	x	x	x	x	x	
Zn	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	DAN2.1	B3.2.1	ZnZnAgcsICP1.1	D73.1.6.4	
Elementaranalyse									
C	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	ATNULL	x	CCAgcsCNS1.1	D31.3.2.1	
N	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	ATNULL	x	NNAgcsCNS1.1	D58.1.3.1	
S	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	ATNULL	x	SSAgcsCNS1.1	D54.1.3.1	
Cl	T4.1 B1.2.1	x	MBP3.1	B1.3.1	ClAgcs1.1	B3.2.2	ClClCF1.2	D13.2.4.3	
Blattgewichte									
X	T4.1 B1.2.1	x	x	x	BGW1.1	B2.3	x	x	
Nadelgewichte									
X	T4.1 B1.2.1	x	x	x	NWG1.1	B2.2	x	x	

Tabelle 421: Angewandte Methoden bei der BZE II in Niedersachsen, Probenart Pflanze

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	HFA	HFA	HFA	Methode	Methode	HFA
Säureextrakt Salpetersäure										
Al	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	AlAgelCP15.1	D1.1.6.2
Ca	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CaCagesCP15.1	D11.1.6.3
Cd	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CdCdgesCP15.1	D9.1.6.4
Co	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CoCogesCP15.1	D15.1.6.6
Cr	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CrCragesCP15.1	D14.1.6.5
Cu	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CuCuagesCP15.1	D32.1.6.6
Fe	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	FeFegesCP15.1	D17.1.6.2
K	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	KKgesCP15.1	D30.1.6.4
Mg	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	MgMggesCP15.1	D36.1.6.2
Mn	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	MnMngesCP15.1	D37.1.6.4
Na	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	NaNagesCP15.1	D39.1.6.4
Ni	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	NiNigesCP15.1	D42.1.6.6
P	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	PPgesCP15.1	D44.1.6.1
Pb	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	PbPbgesCP15.1	D6.1.6.6
S	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	SSgesCP15.1	D54.1.6.1
Zn	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	ZnZngesCP15.1	D73.1.6.4
Elementaranalyse										
C	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	ATNUILL	x	CCgesCNS5.1	D31.1.3.1
N	T4.1	B1.2.1	x	x	MP3.2	B1.3.1	ATNUILL	x	NNgesCNS5.1	D58.1.3.1
Blattgewichte										
x	T4.1	B1.2.1	x	x	x	x	BGW1.1	B2.3	x	x
Nadelgewichte										
x	T4.1	B1.2.1	x	x	x	x	NWG1.2	B2.2	x	x

Tabelle 42m: Angewandte Methoden bei der BZE I in Sachsen-Anhalt, Probenart Boden

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Untersuchungsmethoden				Elementbestimmungsmethoden	
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA
Effektiv austauschbare Kationen										
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			
Potentiell austauschbare Kationen										
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
Wässriger Extrakt										
Al	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ca	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cl	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cges	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Canorg	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Fe	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
K	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

(Fortsetzung Tabelle 42)

(Fortsetzung Tabelle 42m)

Leitfähigkeit	x	x	x	x	x	x	x	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	x	x	x	x	x	x	x
Mn	x	x	x	x	x	x	x	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	x	x	x	x	x	x	x
Nges	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
NH4-N	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
NO3-N	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Pges	x	x	x	x	x	x	x	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	x	x	x	x	x	x	x
Säureextrakt Salpetersäure																			
Cd		A1.2.1		A1.3.1		A1.4.1	DA											AAS-G	
Cu		A1.2.1		A1.3.1		A1.4.1	DA											AAS-G	
Pb		A1.2.1		A1.3.1		A1.4.1	DA											AAS-G	
Zn		A1.2.1		A1.3.1		A1.4.1	DA											AAS	
Säureextrakt Königswasser																			
Al		A1.2.1		A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3										AlAlges CP16.1	D1.1.6.2
Ca		A1.2.1		A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3										CaCages CP16.1	D11.1.6.3
Cd		A1.2.1		A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3										CdCdges CP16.1	D9.1.6.4
Co		A1.2.1		A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3										CoCoges CP16.1	D15.1.6.6
Cr		A1.2.1		A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3										CrCrges CP16.1	D14.1.6.5

(Fortsetzung Tabelle 42m)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	Methode	Methode	Methode	Methode	Methode	Methode	
Cu	HFA A1.2.1	HFA A1.3.1	HFA A1.4.1	HFA A1.4.1	HFA A1.4.1	HFA A1.4.1	HFA A1.4.1	HFA A1.4.1	HFA A1.4.1	CuGesICP16.1 D32.1.6.6
Fe	A1.2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	FeFegesICP16.1 D17.1.6.2	
K	A1.2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	KKgesICP16.1 D30.1.6.4	
Mg	A1.2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MgMggesICP16.1 D36.1.6.2	
Mn	A1.2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MnMngesICP16.1 D37.1.6.3	
Na	A1.2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NaNagesICP16.1 D39.1.6.4	
Ni	A1.2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NiNigesICP16.1 D42.1.6.6	
P	A1.2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PPgesICP16.1 D44.1.6.1	
Pb	A1.2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PbPbgesICP16.1 D6.1.6.6	
S	A1.2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	SSgesICP16.1 D54.1.6.1	
Zn	A1.2.1	A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	ZnZngesICP16.1 D73.1.6.4	

(Fortsetzung Tabelle 42m)

Gesamtgehalte									
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
Elementaranalyse									
C		A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	nasse Oxidation				
N		A1.2.1	A1.3.1	A1.4.1	Kjeldahl				
Carbonat-Gehalt									
C-CO ₃	x	x	x	x	x	x	x	x	x

(Fortsetzung Tabelle 42m)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Untersuchungsmethoden				Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	HFA	Sieben Methode	HFA	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	Methode
pH-Wert (H2O)											
pH		A1.2.1		A1.3.1	x	x	pH H2O	A3.1.1.1	pH		D76.1.4.1
pH-Wert (CaCl2)											
pH	x		x		x	x			x		x
pH-Wert (KCl)											
pH		A1.2.1		A1.3.1	x	x	pH KCl	A3.1.1.3	pH		D76.1.5.1
Trockenrohichte des Feinbodens											
TRDF	T5.1	x	x	x	x	x	TRDF2.1	A2.8	x		x
Skeletteranteil											
SKA	T5.1	x	x	x	x	x	TRDF2.1	A2.8	x		x

Tabelle 42n: Angewandte Methoden bei der BZE II in Sachsen-Anhalt, Probenart Boden

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	HFA	HFA	Methode	Methode	Methode
Effektiv austauschbare Kationen									
Al	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	AKEL1	A3.2.1.1	AlAlgesICP10.1	D1.1.5.2
Ca	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	AKEL1	A3.2.1.1	CaCagesICP10.1	D1.1.5.2
Fe	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	AKEL1	A3.2.1.1	FeFegesICP10.1	D17.1.5.3
K	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	AKEL1	A3.2.1.1	KKgesICP10.1	D30.1.5.4
Mg	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	AKEL1	A3.2.1.1	MgMggesICP10.1	D36.1.5.2
Mn	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	AKEL1	A3.2.1.1	MnMngesICP10.1	D37.1.5.3
Na	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	AKEL1	A3.2.1.1	NaNagesICP10.1	D39.1.5.4
pH	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	AKEL1	A3.2.1.1	HH+2PHM4.1	D76.1.5.1
Potenitiell austauschbare Kationen									
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
Wässriger Extrakt									
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 42n)

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	KKges 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
	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	x	x	EXTH2O1.1	A3.2.2.1	MgMgges 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	MnMnges 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	NNH4CFC6.1	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+3CFC5.4	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
Säureextrakt Königswasser										
Al	T3.1	A1.2.1	SBP2.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	AlAlges CP16.1	D1.1.6.2
Al						A1.4.1	KW	A3.3.3		D1.1.6.2
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										
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 42n)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Mahlen	Untersuchungsmethoden		Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen	HFA	Methoden	HFA		Methoden	HFA	Methoden	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
Gesamtgehalte										
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 42n)

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
Elementaranalyse										
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
Carbonat-Gehalt										
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 42n)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Mahlen	Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	HFA	Sieben Methode		HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	Methode
pH-Wert (H₂O)										
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
pH-Wert (CaCl₂)										
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
pH-Wert (KCl)										
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
Trockenrohhdichte des Feinbodens										
TRDF	T5.1	x	x	x	x		TRDF2.1	A2.8	x	x
Skelettranteil										
SKA	T5.1	x	x	x	x		TRDF2.1	A2.8	x	x

Tabelle 42o: Angewandte Methoden bei der BZE I in Sachsen-Anhalt, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Untersuchungsmethoden		Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	HFA	Sieben Methode	HFA	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	
Austauschbare Kationen										
Al	x		x		x		x		x	
Ca	x		x		x		x		x	
Fe	x		x		x		x		x	
K	x		x		x		x		x	
Mg	x		x		x		x		x	
Mn	x		x		x		x		x	
Na	x		x		x		x		x	
pH	x		x		x		x		x	
Säureextrakt Salpetersäure										
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		
Säureextrakt Königswasser										
Al	A1.2.1	A1.3.1			MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	AlAgcesICP19.1	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	CrCragesICP19.1	D14.1.6.5
Cu	A1.2.1	A1.3.1			MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	CuCuagesICP19.1	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 42)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Mahlen	Untersuchungsmethoden				Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	HF-A	Sieben Methode	HF-A		HF-A	Methode	HF-A	Methode	HF-A	Methode	Methode	HF-A
Mg		A1.2.1		A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MgMggesICP19.1	D36.1.6.2		
Mn		A1.2.1		A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	MnMngesICP19.1	D37.1.6.3		
Na		A1.2.1		A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NaNagesICP19.1	D39.1.6.4		
Ni		A1.2.1		A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	NiNigesICP16.2	D42.1.6.6		
P		A1.2.1		A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PPgesICP16.2	D44.1.6.1		
Pb		A1.2.1		A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	PbPbgesICP19.1	D6.1.6.6		
S		A1.2.1		A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	SSgesICP19.1	D54.1.6.1		
Zn		A1.2.1		A1.3.1	MBP1.1	A1.4.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	ZnZngesICP19.1	D73.1.6.4		

Gesamtgehalte

Al		A1.2.1		A1.3.1		A1.4.1		GA		AAS	
Ca		A1.2.1		A1.3.1		A1.4.1		GA		AAS	
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	
P		A1.2.1		A1.3.1		A1.4.1		GA		AAS	

Elementaranalyse

C		A1.2.1		A1.3.1		A1.4.1	nasse Oxidation		x		
N		A1.2.1		A1.3.1		A1.4.1	Kjeldahl		x		

Carbonat-Gehalt

C-CO ₃	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
-------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

(Fortsetzung Tabelle 42o)

pH-Wert (H2O)									
pH		A1.2.1	A1.3.1	x	x	pH	A3.1.1.1	D76.1.4.1	
pH-Wert (CaCl2)									
pH	x	x	x	x	x	x	x	x	x
pH-Wert (KCl)									
pH		A1.2.1	A1.3.1	x	x	pH	A3.1.1.3	D76.1.5.1	
Humusvorrat									
X		A1.2.1	x	x	x	HV1.1	A2.4	x	x

Tabelle 42p: Angewandte Methoden bei der BZE II in Sachsen-Anhalt, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden		Untersuchungsmethoden		Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	Methode	Methode	Methode		
Austauschbare Kationen								
Al	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	AlAgessICP10.1	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	FeFegessICP10.1	D17.1.5.3	
K	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	KKgessICP10.1	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	MnMngessICP10.1	D37.1.5.3	
Na	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	NaNagessICP10.1	D39.1.5.4	
pH	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	AKH3.1	HH+2PHM4.1	D76.1.5.1	
Säureextrakt Königswasser								
Al	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	AlAgessICP16.1	D1.1.6.2
Ca	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	CaCagesICP16.1	D11.1.6.3
Cd	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	CdCdgesAAS8.1	D9.1.6.3
Co	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	CoCogessICP16.1	D15.1.6.6
Cr	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	CrCrgeessICP16.1	D14.1.6.5
Cu	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	CuCuagesICP16.1	D32.1.6.6
Fe	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	FeFegessICP16.1	D17.1.6.2
K	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	KKgessICP16.1	D30.1.6.4
Mg	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	MgMggesICP16.1	D36.1.6.2
Mn	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	MnMngessICP16.1	D37.1.6.3
Na	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	NaNagessICP16.1	D39.1.6.4
Ni	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	NiNiagesICP16.1	D42.1.6.6
P	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	PPgessICP16.1	D44.1.6.1
Pb	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	PbPbgessICP16.1	D6.1.6.6

(Fortsetzung Tabelle 42p)

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden				Untersuchungsmethoden				Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	HFA	Sieben Methode	HFA	Mahlen Methode	HFA	Methode	HFA	Methode		
S	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	SSgesICP16.1	D54.1.6.1	
Zn	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	OAKW1.1	A3.3.3	ZnZngesICP16.1	D73.1.6.4	
Elementaranalyse											
C	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	x	CCgesCNS5.1	D31.1.2.1	
N	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	x	NNgesCNS5.1	D58.1.2.1	
Carbonat-Gehalt											
CO ₃ -C	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	MBP1.1	A1.4.1	ATNULL	x	CCO3C1.1	D31.3.2.3	
pH-Wert (H₂O)											
pH	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	x	pHH2O6.1	A3.1.1.2	HH+PHM5.1	D76.1.5.1	
pH-Wert (CaCl₂)											
pH	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	x	pHCaCl26.1	A3.1.1.7	HH+PHM5.1	D76.1.5.1	
pH-Wert (KCl)											
pH	T4.1	A1.2.1	SHBZE1.1	A1.3.2	x	x	pHKCl6.1	A3.1.1.4	HH+PHM5.1	D76.1.5.1	
Humusvorrat											
X	T4.1	A1.2.1	x	x	x	x	HV4.1	A2.6	x	x	

Tabelle 42q: Angewandte Methoden bei der BZE I in Sachsen-Anhalt, Probenart Pflanze

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Mahlen			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden		
	Trocknen Methode	HFA	Sieben Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA
Säureextrakt Salpetersäure												
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
Cr		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
Ni		x	x			x	x			x		x
P		B1.2.1	x			B1.3.1	DA			x		x
Pb		B1.2.1	x			B1.3.1	DA			B3.2.1	AAS-G	
S		x	x			x	x			x		x
Zn		B1.2.1	x			B1.3.1	DA			B3.2.1	AAS	
Säureextrakt Salpetersäure + Perchlorsäure												
P							DA-PCI					Spektrophotometrisch
S							DA-PCI					Gravimetrisch
Elementaranalyse												
C		B1.2.1	x				nasse Oxidation			x		
N		B1.2.1	x				Kjeldahl			x		

(Fortsetzung Tabelle 42q)

Blattgewichte												
BGW	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Nadelgewichte												
NGW	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabelle 42r: Angewandte Methoden bei der BZE II in Sachsen-Anhalt, Probenart Pflanze

Parameter	Probenvorbereitungsmethoden			Untersuchungsmethoden			Elementbestimmungsmethoden			
	Trocknen Methode	Sieben Methode	Mahlen Methode	HFA	HFA	HFA	Methode	HFA	Methode	HFA
Säureextrakt Salpetersäure										
Al	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	AlAgcsICP15.1	D1.1.6.2	
Ca	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CaCagesICP15.1	D11.1.6.3	
Cd	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CdCdgesICP15.1	D9.1.6.4	
Co	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CoCogesICP15.1	D15.1.6.6	
Cr	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CrCragesICP15.1	D14.1.6.5	
Cu	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	CuCuagesICP15.1	D32.1.6.6	
Fe	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	FeFeagesICP15.1	D17.1.6.2	
K	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	KKgesICP15.1	D30.1.6.4	
Mg	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	MgMggesICP15.1	D36.1.6.2	
Mn	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	MnMngesICP15.1	D37.1.6.4	
Na	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	NaNagesICP15.1	D39.1.6.4	
Ni	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	NiNigesICP15.1	D42.1.6.6	
P	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	PPgesICP15.1	D44.1.6.1	
Pb	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	PbPbgesICP15.1	D6.1.6.6	
S	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	SSgesICP15.1	D54.1.6.1	
Zn	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	DAN2.2	B3.2.1	ZnZngesICP15.1	D73.1.6.4	
Elementaranalyse										
cC	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	ATNULL	x	CCgesCNS5.1	D31.1.3.1	
N	T4.1	B1.2.1	x	MP3.2	B1.3.1	ATNULL	x	NNgesCNS5.1	D58.1.3.1	
Blattgewichte										
BGW	T4.1	B1.2.1	x	x	x	BGW1.1	B2.3	x	x	
Nadelgewichte										
NGW	T4.1	B1.2.1	x	x	x	NWG1.2	B2.2	x	x	

Tabelle 43a: Angewandte Methoden bei der BZE I in Hessen: HFA-Methodencode, Probenart Boden

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Effektiv austauschbare Kationen			
Al	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Ca	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Fe	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
K	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Mg	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Mn	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Na	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
pH	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;11;-3;-3;-3;	D;11;-9;-9;-9;-9;-3;
Potentiell austauschbare Kationen			
Ca	B1;-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;-3;-3;	C1;12;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Mg	B1;-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;-3;-3;	C1;12;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
Ba-Rücktausch	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;12;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;6;
Wässriger 1:2 Extrakt			
Al	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Ca	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Cl	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;	D;7;-9;-9;-9;-9;-9;
Cges	x	x	x
Fe	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
K	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;	D;13;-9;-9;-9;-9;-9;
Mg	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Mn	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Na	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;	D;13;-9;-9;-9;-9;-9;
Nges	x	x	x
NH4-N	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;	D;9;-9;-9;-9;-9;-9;
NO3-N	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;	D;9;-9;-9;-9;-9;-9;
PO4-P	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;	D;7;-9;-9;-9;-9;-9;
pH	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;	D;11;-9;-9;-9;-9;-3;
SO4-S	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;	D;7;-9;-9;-9;-9;-9;
Säureextrakt Königswasser			
Al	x	x	x
Ca	x	x	x
Cd	x	x	x
Cr	x	x	x
Cu	x	x	x

(Fortsetzung Tabelle 43a)

Säureextrakt Königswasser

Fe	x	x	x
K	x	x	x
Mg	x	x	x
Mn	x	x	x
Ni	x	x	x
P	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Pb	x	x	x
S	x	x	x
Zn	x	x	x

Elementaranalyse

Corg	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;-9;-9;-9;-9;-9;
N	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;-9;-9;-9;-9;-9;

Carbonat-Gehalt

x	x	x	x
---	---	---	---

pH-Wert (H2O)

pH	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;1;-3;-3;-3;	D;11;-9;-9;-9;-9;-3;
----	--------------------------------	----------------	----------------------

pH-Wert (CaCl2)

x	x	x	x
---	---	---	---

pH-Wert (KCl)

pH	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;3;-3;-3;-3;	D;11;-9;-9;-9;-9;-3;
Trockenrohddichte des Feinbodens			
TRDF	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;118;0-1;1-5;-3	x
Skelettanteil			
SKA	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;118;0-1;1-5;-3	x

Tabelle 43b: Angewandte Methoden bei der BZE II in Hessen: HFA-Methodencode, Probenart Boden

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Effektiv austauschbare Kationen			
Al	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;1
Ca	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;1
Fe	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
K	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
Mg	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
Mn	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D4;2;1;-1;-1;1
Na	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
pH	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;11;0;0;-1;2;-3
Potentiell austauschbare Kationen			
Ca	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3	C1;12;-3;-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;-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;-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;-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;-3	D;4;1;2;-1;-1;6
Wässriger 1:2 Extrakt			
Al	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;4;2;1;-1;-1;1
Ca	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;1
Cl	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;7;1;4;1;2;2
Cges	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;8;2;1;4;7;-1
Fe	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
K	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
Mg	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
Mn	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;4;2;1;-1;-1;1
Na	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
Nges	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;9;2;6;1;2;1
NH4-N	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;9;2;1;1;2;6
NO3-N	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;7;1;4;1;2;2
PO4-P	x	x	x
pH	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;11;0;0;-1;2;-3
SO4-S	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;7;1;4;1;2;2
Säureextrakt Königswasser			
Al	B1;1;1;-1;-1;6;2;1;6;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;4;2;1;-1;-1;1
Ca	B1;1;1;-1;-1;6;2;1;6;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;1
Cd	B1;1;1;-1;-1;6;2;1;6;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;5;1;1;1;-1;1
Cr	B1;1;1;-1;-1;6;2;1;6;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;4;2;1;-1;-1;1
Cu	B1;1;1;-1;-1;6;2;1;6;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;5;1;1;-1;-1;0

(Fortsetzung Tabelle 43b)

Säureextrakt Königswasser			
Fe	B1;1;1;-1;-1;6;2;1;6;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0
K	B1;1;1;-1;-1;6;2;1;6;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0
Mg	B1;1;1;-1;-1;6;2;1;6;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0
Mn	B1;1;1;-1;-1;6;2;1;6;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;1;-1;-1;1
Ni	B1;1;1;-1;-1;6;2;1;6;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;1;-1;-1;1
P	B1;1;1;-1;-1;6;2;1;6;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;1;-1;-1;2
Pb	B1;1;1;-1;-1;6;2;1;6;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;	D;5;1;1;1;-1;6
S	B1;1;1;-1;-1;6;2;1;6;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;3
Zn	B1;1;1;-1;-1;6;2;1;6;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;1;-1;-1;1
Elementaranalyse			
Corg	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;3;1;3;1;-1
N	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;3;2;4;1;-1
Carbonat-Gehalt			
C-CO3	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;3;1;1;1;-1
pH-Wert (H2O)			
pH	B1;1;1;-1;-1;6;2;-1;-1;-3;-3	C1;2;-3;-3;-3;	D;11;0;0;-1;2;-3
pH-Wert (CaCl2)			
pH	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;11;0;0;-1;2;-3
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;4;-3;-3;-3;	D;11;0;0;-1;2;-3
Trockenrohichte des Feinbodens			
TRDF	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;118;0-1;1-5;-3	x
Skelettanteil			
SKA	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;118;0-1;1-5;-3	x

Tabelle 43c: Angewandte Methoden bei der BZE I in Hessen: HFA-Methodencode, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Austauschbare Kationen			
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
Säureextrakt Königswasser			
Al	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Ca	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Cd	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Cr	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Cu	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Fe	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
K	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Mg	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Mn	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Ni	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
P	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Pb	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
S	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Zn	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;-9;-9;-9;-9;-9;
Elementaranalyse			
C	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;-9;-9;-9;-9;-9;
N	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;-9;-9;-9;-9;-9;
Carbonat-Gehalt			
CO ₃ -C	x	x	x
pH-Wert (H₂O)			
pH	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;1;-3;-3;-3;-3;	D;11;-9;-9;-9;-9;-3;
pH-Wert (CaCl ₂)			
pH	x	x	x
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;3;-3;-3;-3;-3;	D;11;-9;-9;-9;-9;-3;
Humusvorrat			
HV	B1;1;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;114;-3;-3;-3	x

Tabelle 43d: *Angewandte Methoden bei der BZE II in Hessen: HFA-Methodencode, Probenart Humus*

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Austauschbare Kationen			
Al	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;19;-3;-3;-3;-3	D;4;2;1;-1;-1;1
Ca	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;19;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;1
Fe	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;19;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
K	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;19;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
Mg	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;19;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
Mn	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;19;-3;-3;-3;-3	D;4;2;1;-1;-1;1
Na	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;19;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
pH	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;19;-3;-3;-3;-3	D;11;0;0;-1;2;-3
Säureextrakt Königswasser			
Al	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;4;2;1;-1;-1;1
Ca	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;1
Cd	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;5;1;1;1;-1;1
Cr	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;4;2;1;-1;-1;1
Cu	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;5;1;1;-1;-1;0
Fe	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
K	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
Mg	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;0
Mn	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;4;2;1;-1;-1;1
Ni	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;4;2;1;-1;-1;1
P	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;4;2;1;-1;-1;2
Pb	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;5;1;1;1;-1;6
S	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;3
Zn	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;52;-3;-3;-3;-3	D;4;2;1;-1;-1;1
Elementaranalyse			
C	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;3;1;3;1;-1
N	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;3;2;4;1;-1
Carbonat-Gehalt			
CO ₃ -C	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;3;1;1;1;-1
pH-Wert (H₂O)			
pH	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;2;-3;-3;-3;-3	D;11;0;0;-1;2;-3
pH-Wert (CaCl₂)			
pH	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;7;-3;-3;-3;-3	D;11;0;0;-1;2;-3
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;1;3;-2;4;2;2;-1;-1;-3;-3	C1;4;-3;-3;-3;-3	D;11;0;0;-1;2;-3
Humusvorrat			
HV	B1;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3	C3;116;-3;-3;-3	x

Tabelle 43e: Angewandte Methoden bei der BZE I in Hessen: HFA-Methodencode, Probenart Pflanze

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Säureextrakt Salpetersäure			
Al	x	x	x
Ca	x	x	x
Cd	x	x	x
Co	x	x	x
Cr	x	x	x
Cu	x	x	x
Fe	x	x	x
K	x	x	x
Mg	x	x	x
Mn	x	x	x
Na	x	x	x
Ni	x	x	x
P	x	x	x
Pb	x	x	x
S	x	x	x
Zn	x	x	x
Elementaranalyse			
C	x	x	x
N	x	x	x
Blattgewichte			
BGW	x	x	x
Nadelgewichte			
NWG	x	x	x

Tabelle 43f: *Angewandte Methoden bei der BZE II in Hessen: HFA-Methodencode, Probenart Pflanze*

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Säureextrakt Salpetersäure			
Al	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;2;2;
Ca	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;5;
Cd	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
Co	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
Cr	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Cu	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Fe	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;1;
K	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Mg	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Mn	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;9;
Na	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Ni	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
P	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;1;
Pb	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
S	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Zn	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;4;1;
Elementaranalyse			
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;
Blattgewichte			
BGW	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C4;213;1;1;-3;	x
Nadelgewichte			
NGW	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C4;212;1;2;-3;	x

Tabelle 43g: Angewandte Methoden bei der BZE I in Niedersachsen: HFA-Methodencode, Probenart Boden

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Effektiv austauschbare Kationen			
Al	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;1;2;2;-1;1;0;
Ca	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;2;0;
Fe	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;-1;0;
K	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;1;1;
Mg	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;2;0;
Mn	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;-1;0;
Na	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;1;1;
pH	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;11;-3;-3;-3;-3	D;11;0;0;2;2;-3;
Potentiell austauschbare Kationen			
Ca	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;12;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;2;0;
K	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;12;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;1;1;
Mg	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;12;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;2;0;
Na	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;12;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;1;1;
Ba-Rücktausch	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;12;-3;-3;-3;-3	D;4;1;1;-1;-1;1;
Wässriger Extrakt			
Al	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;1;2;2;-1;1;0;
			D;4;1;1;-1;-1;1;
Ca	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;1;2;2;-1;3;0;
			D;4;1;1;-1;-1;2;
Cl	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;9;2;1;1;2;0;
Cges	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;8;2;1;4;2;-1;
Canorg	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;8;2;1;3;-1;-1;
Fe	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;1;0;
			D;4;1;1;-1;-1;0;
K	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;1;1;
			D;4;1;1;-1;-1;0;
Leitfähigkeit	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;12;1;3;2;-3;-3;
Mg	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;1;2;2;-1;1;0;
			D;4;1;1;-1;-1;1;
Mn	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;-1;0;
			D;4;1;1;-1;-1;0;
Na	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;1;1;2;-1;1;1;
			D;4;1;1;-1;-1;0;
Nges	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;9;2;3;3;-1;3;
NH4-N	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;9;2;-1;1;2;1;
NO3-N	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;-3	D;9;2;-1;5;2;2;

(Fortsetzung Tabelle 43g)

Wässriger Extrakt

Pges	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
PO4-P	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;	D;9;2;-1;5;2;5;
pH	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
SO4-S	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3	C1;30;-3;-3;-3;	D;9;2;4;1;-1;2;

Säureextrakt Salpetersäure

P	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;9;2;-1;1;2;3;
			D;9;2;-1;1;2;3;

Säureextrakt Königswasser

Al	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
			D;4;2;2;-1;-1;0;
Ca	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;5;
			D;4;1;2;-1;-1;0;
Cd	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;2;2;
			D;2;1;4;2;7;0;
Co	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
			D;4;2;2;-1;1;0;
Cr	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
			D;4;2;2;-1;-1;0;
Cu	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
			D;4;2;2;-1;-1;0;
Fe	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
			D;4;1;2;-1;-1;1;
K	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
			D;4;1;2;-1;-1;0;
Mg	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
			D;4;1;2;-1;-1;0;
Mn	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;3;
			D;4;1;2;-1;-1;9;
Na	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
			D;4;1;2;-1;-1;0;
Ni	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
			D;4;2;2;-1;-1;0;
P	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;1
			D;4;2;2;-1;-1;1;
Pb	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
			D;4;2;2;-1;1;0;
S	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
			D;4;2;2;-1;-1;0;
Zn	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
			D;4;2;2;-1;4;1;

(Fortsetzung Tabelle 43g)

Gesamtgehalte			
Al	x	x	x
Ca	x	x	x
Cd	x	x	x
Co	x	x	x
Cr	x	x	x
Cu	x	x	x
Fe	x	x	x
K	x	x	x
Mg	x	x	x
Mn	x	x	x
Na	x	x	x
Ni	x	x	x
P	x	x	x
Pb	x	x	x
S	x	x	x
Zn	x	x	x
Elementaranalyse			
C	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;1;-1;
N	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;1;-1;
Carbonat-Gehalt			
CO3-C	B1;1;2;2;1;2;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1;	D;14;1;1;2;2;0;
pH-Wert (H2O)			
pH	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;1;-3;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
		C1;1;-3;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
pH-Wert (CaCl2)			
pH	x	x	x
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;1;2;2;1;2;2;-3;-3;-3;-3	C1;3;-3;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
		C1;3;-3;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Trockenrohichte des Feinbodens			
TRDF	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;112;6;2;-3	x
Skelettanteil			
SKA	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;118;0-1;1-5;-3	x
		C3;112;6;5;-3	x

Tabelle 43b: *Angewandte Methoden bei der BZE II in Niedersachsen: HFA-Methodencode, Probenart Boden*

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Effektiv austauschbare Kationen			
Al	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;11;-3;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Potentiell austauschbare Kationen			
Ca	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;12;-3;-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;-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;-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;-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;-3;	D;4;1;2;-1;-1;6;
Wässriger Extrakt			
Al	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
PO4-P	x	x	x
pH	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
SO4-S	x	x	x
Sges	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;

(Fortsetzung Tabelle 43h)

Säureextrakt Salpetersäure			
P	x	x	x
Säureextrakt Königswasser			
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
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;
Gesamtgehalte			
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;

(Fortsetzung Tabelle 43h)

Gesamtgehalte			
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;
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;
Elementaranalyse			
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;
Carbonat-Gehalt			
CO ₃ -C	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1-1	D;8;1;1;1;-1;-1;
pH-Wert (H₂O)			
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;
pH-Wert (CaCl₂)			
pH	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;7;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
			D;11;0;0;2;2;-3;
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;4;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Trockenrohichte des Feinbodens			
TRDF	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;118;0-1;1-5;-3	x
Skelettanteil			
SKA	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;118;0-1;1-5;-3	x

Tabelle 43i: Angewandte Methoden bei der BZE I in Niedersachsen: HFA-Methodencode, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Austauschbare Kationen			
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
Säureextrakt Salpetersäure			
Al	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;1;
Ca	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;2;
Cd	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;2;1;4;1;6;0;
Cu	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;2;1;2;1;-1;0;
Fe	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
K	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
Mg	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;1;
Mn	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
P	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
Pb	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;2;1;4;1;6;0;
Zn	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;53;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;1;
Säureextrakt Königswasser			
Al	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Al		C1;52;-3;-3;-3;	D4;2;1;-1;-1;
Ca	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;5;
Ca		C1;52;-3;-3;-3;	D4;1;1;-1;-1;
Cd	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;2;1;4;2;7;0;
Cd		C1;52;-3;-3;-3;	D5;1;1;1;-1;1;
Co	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
Cr	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Cr		C1;52;-3;-3;-3;	D4;2;1;-1;-1;1;
Cu	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Cu		C1;52;-3;-3;-3;	D5;1;1;-1;-1;0;
Fe	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
Fe		C1;52;-3;-3;-3;	D4;1;1;-1;-1;0;
K	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
K		C1;52;-3;-3;-3;	D4;1;1;-1;-1;0;
Mg	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Mg		C1;52;-3;-3;-3;	D4;1;1;-1;-1;0;

(Fortsetzung Tabelle 43i)

Säureextrakt Königswasser			
Mn	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;3;
Mn		C1;52;-3;-3;-3;	D4;2;1;-1;-1;1
Na	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Ni	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Ni		C1;52;-3;-3;-3;	D4;2;1;-1;-1;1
P	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;1
P		C1;52;-3;-3;-3;	D4;2;1;-1;-1;2
Pb	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
Pb		C1;52;-3;-3;-3;	D5;1;1;1;-1;6
S	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
S		C1;52;-3;-3;-3;	D4;1;1;-1;-1;3
Zn	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Zn		C1;52;-3;-3;-3;	D4;2;1;-1;-1;1
Elementaranalyse			
C	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;1;-1;
N	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;1;-1;
Carbonat-Gehalt			
C-CO3	x	x	x
pH-Wert (H2O)			
pH	B1;1;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;1;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
pH-Wert (CaCl2)			
pH	x	x	x
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;1;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;3;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Humusvorrat			
HV	B1;1;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;114;-3;-3;-3	x

Tabelle 43j: Angewandte Methoden bei der BZE II in Niedersachsen: HFA-Methodencode, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Austauschbare Kationen			
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;
Säureextrakt Salpetersäure			
Al	x	x	x
Ca	x	x	x
Cd	x	x	x
Cu	x	x	x
Fe	x	x	x
K	x	x	x
Mg	x	x	x
Mn	x	x	x
P	x	x	x
Pb	x	x	x
Zn	x	x	x
Säureextrakt Königswasser			
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;

(Fortsetzung Tabelle 43)

Elementaranalyse			
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;
Carbonat-Gehalt			
CO ₃ -C	B1;2;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;1;1;-1;-1;
pH-Wert (H₂O)			
pH	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;2;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
pH-Wert (CaCl₂)			
pH	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;7;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;4;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Humusvorrat			
HV	B1;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;116;-3;-3;-3	x

Tabelle 43k: *Angewandte Methoden bei der BZE I in Niedersachsen: HFA-Methodencode, Probenart Pflanze*

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Säureextrakt Salpetersäure			
Al	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;1;
Ca	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;2;
Cd	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;2;1;4;1;6;0;
Co	x	x	x
Cr	x	x	x
Cu	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;2;1;2;1;-1;0;
Fe	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
K	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
Mg	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;1;
Mn	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
Na	x	x	x
Ni	x	x	x
P	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;0;
Pb	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;2;1;4;1;6;0;
S	x	x	x
Zn	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;1;-1;-1;1;
Elementaranalyse			
C	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;1;-1;
N	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;1;-1;
S	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;1;5;-1;-1;
Cl	B2;1;3;-3;-3;-3;-3;4;2;-3;-3;	C1;71;-3;-3;-3;	D;9;2;1;5;2;0;
Blattgewichte			
BGW	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C4;213;1;1;-3;	x
Nadelgewichte			
NGW	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C4;212;1;2;-3;	x

Tabelle 431: *Angewandte Methoden bei der BZE II in Niedersachsen: HFA-Methodencode, Probenart Pflanze*

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Säureextrakt Salpetersäure			
Al	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;2;2;
Ca	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;5;
Cd	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
Co	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
Cr	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Cu	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Fe	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;1;
K	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Mg	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Mn	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;9;
Na	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Ni	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
P	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;1;
Pb	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;1;0;
S	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Zn	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;70;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;4;1;
Elementaranalyse			
C	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;4;-2;-1;
N	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;5;6;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;2;5;-2;-1;
Blattgewichte			
X	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C4;213;1;1;-3;	x
Nadelgewichte			
X	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C4;212;1;2;-3;	x

Tabelle 43m: Angewandte Methoden bei der BZE I in Sachsen-Anhalt: HFA-Methodencode, Probenart Boden

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Effektiv austauschbare Kationen			
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;
Potentiell austauschbare Kationen			
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;
Wässriger Extrakt			
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
Säureextrakt Salpetersäure			
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 43m)

Säureextrakt Königswasser

Al	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Ca	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;5;
Cd	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;2;2;
Co	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Cr	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Cu	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Fe	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;1;
K	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Mg	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;2;
Mn	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;3;
Na	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;1;2;-1;-1;0;
Ni	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
P	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;1;
Pb	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
S	B1;-9;2;-3;-3;-9;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-3;-3;	D;4;2;2;-1;-1;0;
Zn	B1;-9;2;-3;-3;-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 43m)

Gesamtgehalte			
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
Elementaranalyse			
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;
Carbonat-Gehalt			
C-CO3	x	x	x
pH-Wert (H2O)			
pH	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;1;-3;-3;-3;	D;11;-9;-9;-9;-9;-9;
pH-Wert (CaCl2)			
pH	x	x	x
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;3;-3;-3;-3;	D;11;-9;-9;-9;-9;-9;
Trockenrohichte des Feinbodens			
TRDF	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;118;0-1;1-5;-3	x
Skelettanteil			
SKA	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;118;0-1;1-5;-3	x

Tabelle 43n: *Angewandte Methoden bei der BZE II in Sachsen-Anhalt: HFA-Methodencode, Probenart Boden*

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Effektiv austauschbare Kationen			
Al	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;11;-3;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Potentiell austauschbare Kationen			
Ca	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;12;-3;-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;-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;-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;-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;-3;	D;4;1;2;-1;-1;6;
Wässriger Extrakt			
Al	B1;2;2;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;30;-3;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-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;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Säureextrakt Königswasser			
Al	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;52;-3;-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;-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;-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;-3;	D;4;1;1;-1;-1;5;

(Fortsetzung Tabelle 43n)

Säureextrakt Königswasser			
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
Gesamtgehalte			
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 43n)

Gesamtgehalte			
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;
Elementaranalyse			
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;
Carbonat-Gehalt			
C-CO ₃	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;1;1;-1;-1;
pH-Wert (H₂O)			
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;
pH-Wert (CaCl₂)			
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;
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;2;2;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;4;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Trockenrohichte des Feinbodens			
TRDF	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;118;0-1;1-5;-3	x
Skelettanteil			
SKA	B1;1;4;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;118;0-1;1-5;-3	x

Tabelle 43o: Angewandte Methoden bei der BZE I in Sachsen-Anhalt: HFA-Methodencode, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Austauschbare Kationen			
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
Säureextrakt Salpetersäure			
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;
Säureextrakt Königswasser			
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;
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;
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 43o)

Gesamtgehalte			
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;
Elementaranalyse			
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;
Carbonat-Gehalt			
C-CO ₃	x	x	x
pH-Wert (H₂O)			
pH	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;1;-3;-3;-3;	D;11;-9;-9;-9;-9;-9;
pH-Wert (CaCl₂)			
pH	x	x	x
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-9;-3;-3;	C1;3;-3;-3;-3;	D;11;-9;-9;-9;-9;-9;
Humusvorrat			
x	B1;1;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;114;-3;-3;-3	x

Tabelle 43p: Angewandte Methoden bei der BZE II in Sachsen-Anhalt: HFA-Methodencode, Probenart Humus

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Austauschbare Kationen			
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;
Säureextrakt Königswasser			
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;
Elementaranalyse			
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;
Carbonat-Gehalt			
CO ₃ -C	B1;1;3;-3;-3;6;2;3;3;-3;-3;	C1;-1;-1;-1;-1	D;8;1;1;1;-1;-1;
pH-Wert (H₂O)			
pH	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;2;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
pH-Wert (CaCl₂)			
pH	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;7;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
pH-Wert (KCl)			
pH	B1;2;3;-3;-3;6;2;-3;-3;-3;-3;	C1;4;-3;-3;-3;	D;11;0;0;2;2;-3;
Humusvorrat			
X	B1;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C3;116;-3;-3;-3	x

Tabelle 43q: *Angewandte Methoden bei der BZE I in Sachsen-Anhalt: HFA-Methodencode, Probenart Pflanze*

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Säureextrakt Salpetersäure			
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;
Säureextrakt Salpetersäure + Perchlorsäure			
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;
Elementaranalyse			
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;
Blattgewichte			
BGW	x	x	x
Nadelgewichte			
NGW	x	x	x

Tabelle 43r: *Angewandte Methoden bei der BZE II in Sachsen-Anhalt: HFA-Methodencode, Probenart Pflanze*

Parameter	Probenvorbereitung	Untersuchung	Messung
Säureextrakt Salpetersäure			
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;
Elementaranalyse			
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;
Blattgewichte			
BGW	B2;2;3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;-3;	C4;213;1;1;-3;	x
Nadelgewichte			
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 44 Auskunft.

Tabelle 44: Vergleichbarkeit der in den drei Bundesländern angewandten Probenvorbereitungs- und Untersuchungsmethoden (Boden, Humus, Pflanze) (x = nicht durchgeführt)

Boden: 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	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 Königswasseraufschluss für Ca, Fe, Mn, P	x
Druckaufschluss Salpetersäure (P)	liegt nur von BZE I vor; vergleichbar mit Königswasseraufschluss für P	x	x	x
Druckaufschluss Salpetersäure (Cd, Cu, Pb, Zn)	x	x	liegt nur für BZE I vor; vergleichbar mit Königswasseraufschluss für Zn, Cu, Pb	x

(Fortsetzung Tabelle 44)

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
Trockenrohichte 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 44)

<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	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	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	vergleichbar jeweils für BZE I und BZE II zwischen den Ländern; Vergleich zwischen BZE I und BZE II siehe Anmerkungen bei den Ländern

	Fraktion 2-20 mm geschreddert und 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	Fraktion 2-20 mm geschreddert und 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	Fraktion 2-20 mm geschreddert und 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, Cd, Pb, Zn;	x	x	x

	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
Humusvorrat	vergleichbar, wenn die Summe aus Feinhumusvorrat und organischer Restfraktion aus	vergleichbar, wenn die Summe aus Feinhumusvorrat und organischer Restfraktion aus	vergleichbar, wenn die Summe aus Feinhumusvorrat und organischer Restfraktion aus	vergleichbar, wenn die Summe aus Feinhumusvorrat und organischer Restfraktion aus

	der BZE II mit dem Humusvorrat der BZE I verglichen wird	der BZE II mit dem Humusvorrat der BZE I verglichen wird	der BZE II mit dem Humusvorrat der BZE I verglichen wird	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
Pflanze: 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	liegt nur von der BZE II vor	vermutlich vergleichbar	soweit vorhanden vergleichbar
Siebung	vergleichbar	liegt nur von der BZE II vor	vermutlich vergleichbar	soweit vorhanden vergleichbar
Mahlung	vergleichbar	liegt nur von der BZE II vor	vermutlich vergleichbar	soweit vorhanden vergleichbar

(Fortsetzung Tabelle 44)

<i>Untersuchungsmethode</i>				
Druckaufschluss Salpetersäure	vergleichbar	liegt nur von der BZE II vor	vergleichbar	soweit vorhanden vergleichbar
Elementaranalyse	vergleichbar	liegt nur von der BZE II vor	vergleichbar	soweit vorhanden vergleichbar
Nadel-/Blattgewichte	vergleichbar	liegt nur von der BZE II vor	liegt nur von der BZE II vor	soweit vorhanden vergleichbar
<i>Elementbestimmungen</i>				
Einzelementbestimmungen	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	liegt nur von der BZE II vor	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	soweit vorhanden 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

10.2 Methodendokumentation und Qualitätssicherung in den beteiligten Laboren

Die Dokumentation der verwendeten Methoden und die Qualitätssicherung erfolgten in den Laboren auf unterschiedliche Weise.

10.2.1 *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 Laboraten der BZE I und BZE II in das forstökologische Datenbanksystem ECO (s. Kap. 11) 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.

10.2.2 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.

10.2.3 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, Prüfmethoden etc.), ihre Dokumentenlenkung (über Qualitätsmanagement (QM), Intranet, Zuständigkeitspläne, Fortbildungsmanagement, 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.

10.2.4 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.

10.3 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_{Lab}) zum Mittelwert aller Labore (MW_{ges}) und der Standardabweichung aller Labore:

$$\text{Z-Score} = (MW_{\text{Lab}} - MW_{\text{ges}}) / SD_{\text{ges}}$$

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 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ und $\text{pH}(\text{KCl})$ (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 45 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 46 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 Analyse-daten 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 (EXTH₂O). 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 45: Zusammenfassung der Ergebnisse der Auswertung der die BZE begleitenden Ringanalysen und Standardmessungen (KÖNIG et al. 2014) für die einzelnen Untersuchungsmethoden (Parameter-Gruppen)

Untersuchungs- methode/ Parametergruppe	Mittlere Variation der Mittelwerte der Standard- messungen	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 ₃ im wässr. 1:2-Extrakt	+/- 15 %	+/- 20 %		
Korngrößen- bestimmung	+/- 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 46: 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	Para- meter	BZE- Mittelwert 2009	BZE- Mittelwert 2005/6	NWIVA				FILH				BCR				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	13,74	2,7	4,5	10,5	4,2	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	13,15	1,888	1,67	2,3	1,2	5,2	4,7	1,69	4,4	24	6,4	19	1,2	1,65	5,6	3,6	237	1,5	
BZE-SAC	OAKW1.1	Cages	136	116	137	-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	9,17	9,54	6,77	4,3	9,4	5,1	47	10,73	7,5	17,0	12,5	19	9,62	6,3	4,9	0,8	237	4,1	
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	37,54	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	Miges	6,98	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	Miges	0,624	0,61	0,61	1,8	-2,2	0,0	47	0,63	3,7	1,4	3,7	19	-3,7	0,61	5,1	-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	-3,5	32,37	7,5	0,5	2,2	237	1,0
BZE-SAC	OAKW1.1	Pesa	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	1,0	4,8	10,2	47	0,10	10,5	-16,5	-12,5	19	20,4	0,12	6,6	-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	Kiges	0,5	0,661	0,99	4,5	98,0	49,8	47	0,48	6,3	-3,9	-27,3	19	31,5						
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	ATNULL	Cages	7,974	7,858	8,06	1,1	1,1	2,6	89	7,87	6,1	-1,3	0,2	13	2,5	8,13	1,8	1,9	3,4	274	-0,8
BZE-THUE	ATNULL	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	AKEL1	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	AKEL1	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	AKEL1	Fages	0,27	0,47	0,54	13,3	106,0	14,9	73	0,55	19,6	103,1	16,7	86	-1,6						
BZE-THUE	AKEL1	Kiges	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	AKEL1	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	AKEL1	Miges	1,1	1,81	1,76	10,2	60,0	-2,8	73	1,95	8,7	77,0	7,6	86	-10,6						
BZE-THUE	AKEL1	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	AKEL1	Niges	0,35	0,38	0,47	21,8	34,3	23,7	73												
BZE-THUE	AKT21	Cages	5,35	5,47	5,47	4,8	2,2		39												
BZE-THUE	AKT21	Niges	102,3	x	101,9	3,4	-0,4		39												
BZE-THUE	AKT21	Miges	1,41	x	1,59	11,5	12,8		39												
BZE-THUE	AKT21	Niges	0,37	x	0,29	7,2	-21,6		39												
BZE-SAC	EXH201.1	Kiges	1,28	x	1,32	8,1	3,1		39												
BZE-SAC	EXH201.1	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	EXH201.1	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	EXH201.1	Ci	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	EXH201.1	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	EXH201.1	Fages	0,46	0,46	0,35	10,6	23,9	23,9	17	0,53	36,3	14,5	14,5	25	50,5						
BZE-SAC	EXH201.1	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	EXH201.1	Kiges	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	EXH201.1	IF	64	80	73,53	4,6	14,9	-8,1	17												
BZE-SAC	EXH201.1	Miges	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 46)

Standard	U-Methode	Parameter	NWFWA				HLH				BGR				Abw.BGR - NW:FVA		
			BZE-Mittelwert 2009/6	BZE-Mittelwert 2009	Std Abw. vom MW 2005/6 (%)	Abw. vom MW 2005/6	Abw. vom MW 2009	n	2007- 2009	Std Abw. vom MW 2005/6 (%)	Abw. vom MW 2005/6	Abw. vom MW 2009	n	2006- 2011		Std Abw. vom MW 2005/6 (%)	Abw. vom MW 2009
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	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 ₄	0,32	0,59	0,48	18,3	30,1	-18,6	17	0,41	29,1	29,6	-29,7	25	13,6		
BZE-SAC	EXH2O1.1	NO ₃	0,6	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	Spes	x	x	4,77	8,3	x	x	17	x	x	x	x	x	x	x	x
BZE-SAC	EXH2O1.1	SO ₄ 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	pHCaCl26.1	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	pHKG36.1	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	pH1206.1	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	AKH3.1	Alges	121	x	21,8	14,7	-9,9	42	29,09	10,9	20,2	9	-33,4	9	-20,3		
BZE-HUM	AKH3.1	Cages	5,24	x	4,96	16,3	-5,3	42	132,50	5,6	9,5	9	-14,2	9	-14,2		
BZE-HUM	AKH3.1	H ⁺	2,8	x	2,9	7,2	3,6	42	2,84	1,5	1,3	15	2,2	15	2,2		
BZE-HUM	AKH3.1	Miges	11,15	x	10,12	11,4	-9,2	42	12,24	3,1	9,8	9	-21,0	9	-13,1		
BZE-HUM	AKI3.1	Nages	1,1	x	1,19	28,8	8,2	42	1,55	12,1	40,7	9	30,0	9	30,0		
BZE-HUM	AKH3.1	Kges	9,3	x	8,88	11,5	-4,5	42	10,87	6,3	16,9	9	22,5	9	22,5		
BZE-HUM	OKKW1.1	Alges	2	x	1,88	8,7	-6,0	36	1,79	6,0	-10,7	6	5,0	6	5,0		
BZE-HUM	OKKW1.1	Cages	2,91	x	2,85	2,6	-2,1	36	3,14	3,2	7,8	6	-10,0	6	-10,0		
BZE-HUM	OKKW1.1	Cdges	273	x	320	29,1	17,2	36	280,54	4,2	2,8	6	12,3	6	12,3		
BZE-HUM	OKKW1.1	Cages	1,1	x	1,24	13	12,7	36	1,27	8,5	15,6	6	-2,6	6	-2,6		
BZE-HUM	OKKW1.1	Cuges	18,8	x	18,78	3,7	-0,1	36	22,18	13,9	18,0	6	-18,1	6	-18,1		
BZE-HUM	OKKW1.1	Feges	2,33	x	2,22	4,4	-4,7	36	2,20	5,5	-5,5	6	0,8	6	0,8		
BZE-HUM	OKKW1.1	Kges	0,536	x	0,57	8,3	6,3	36	0,57	4,2	7,0	6	-0,6	6	-0,6		
BZE-HUM	OKKW1.1	Miges	0,479	x	0,445	2,9	-4,1	36	0,47	2,6	-0,9	6	-5,5	6	-5,5		
BZE-HUM	OKKW1.1	Nages	7,28	x	7,72	8,8	6,0	36	8,81	7,6	21,0	6	-14,1	6	-14,1		
BZE-HUM	OKKW1.1	Phages	60,3	x	59,95	3,4	-0,6	36	63,70	1,3	5,6	6	-6,3	6	-6,3		
BZE-HUM	OKKW1.1	Pges	0,678	x	0,68	2,9	0,3	36	0,69	1,6	2,1	6	-1,8	6	-1,8		
BZE-HUM	OKKW1.1	Spes	2,09	x	2,07	2,7	-1,0	36	2,04	2,2	-2,5	6	1,6	6	1,6		
BZE-HUM	OKKW1.1	Znges	3,97	x	3,751	4,9	1,4	36	42,58	8,5	15,1	6	-13,5	6	-13,5		
BZE-HUM	OKKW1.1	Mages	0,395	x	0,39	2,9	-1,3	36	0,42	5,8	5,4	6	-6,8	6	-6,8		
BZE-HUM	OKKW1.1	Cages	5,2	x	6,73	11,5	29,4	36	7,62	9,4	46,3	6	-13,2	6	-13,2		
BZE-HUM	ATN01L	Nages	17,75	x	17,48	1,6	-1,5	31									
BZE-HUM	ATN01L	Cges	466,3	x	458,11	1,6	-1,8	31									
BZE-HUM	pHCaCl26.1	H+	3,05	x	3,07	5,2	0,7	36									
BZE-HUM	pHKG36.1	H+	2,86	x	2,87	5,4	0,3	38									
BZE-HUM	pH1206.1	H+	3,69	x	3,65	8,8	-1,1	38									

10.4 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.

10.4.1 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 Humusauflage 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.

10.4.1.1 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.

10.4.1.2 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 verachtfacht und zu hohe 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.

10.4.1.2.1 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. 134).

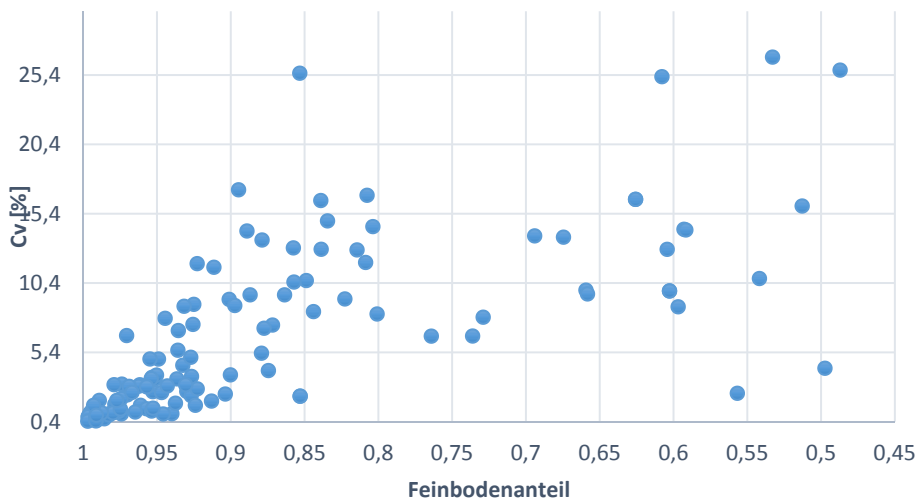


Abbildung 134: Variationskoeffizient C_v [%] des Feinbodenanteils in Abhängigkeit vom Feinbodenanteil

Auch für die Trockenrohdichte des Feinbodens gilt, dass ihr Variationskoeffizient C_v mit steigendem Skelettgehalt zunimmt. Dies zeigt der Vergleich der Abbildungen 135 und 136, 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. Feinboden-vorrat 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.

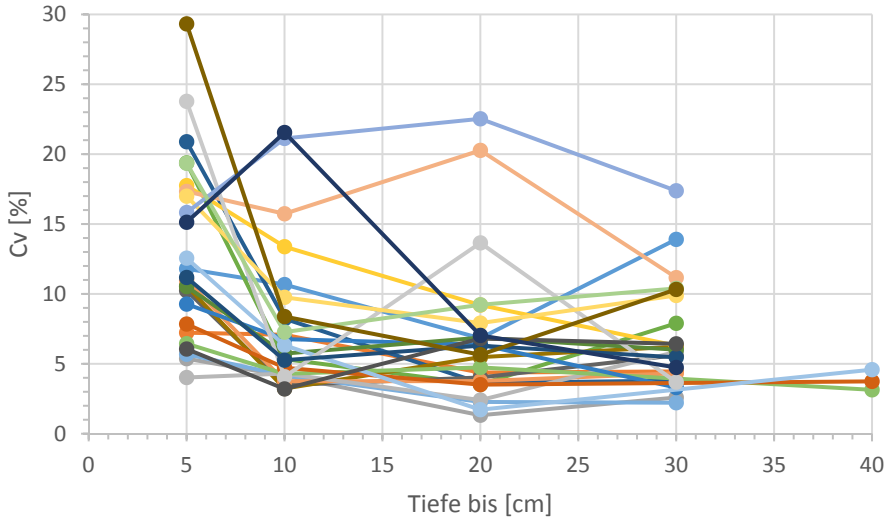


Abbildung 135: Variationskoeffizient C_v [%] der Trockenrohdichte des Feinbodens in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für Böden verschiedener Intensivmonitoringflächen mit Skelettgehalten unter 10 % (jede Farbe symbolisiert eine andere Fläche)

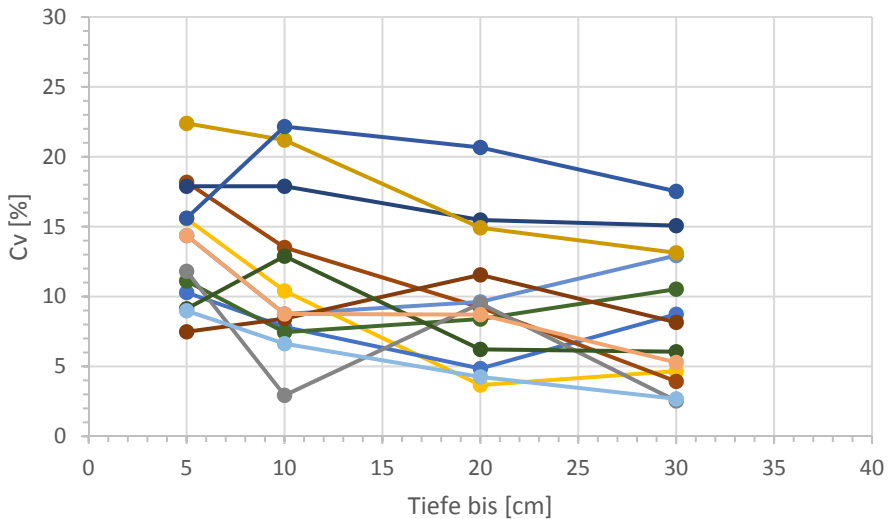


Abbildung 136: Variationskoeffizient C_v [%] der Trockenrohdichte des Feinbodens in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für Böden verschiedener Intensivmonitoringflächen mit Skelettgehalten über 10 % (jede Farbe symbolisiert eine andere Fläche)

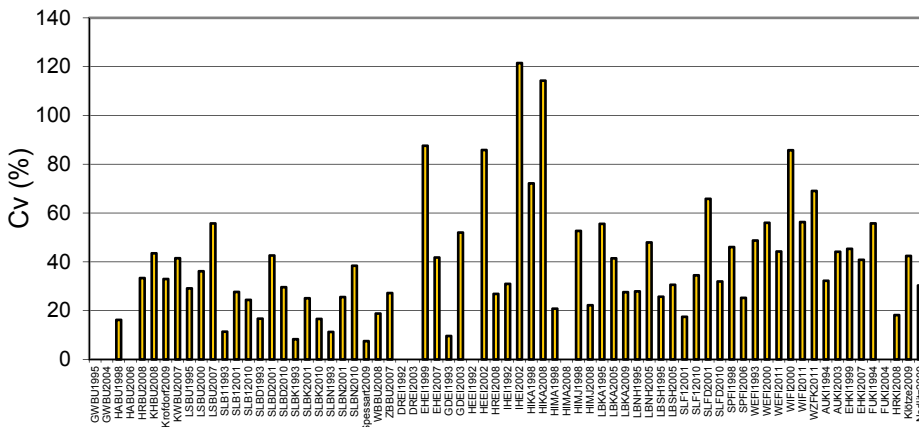
10.4.1.2.2 Variabilität des Humusvorrats und der organischen Kohlenstoffgehalte

Eine wichtige Fragestellung der BZE ist die Ermittlung der Veränderungen der Kohlenstoffvorräte im Wald und damit verbunden die Verlagerung des organischen Kohlenstoffs (Corg) zwischen Humusauflage und Boden und innerhalb der Tiefenstufen des Mineralbodens. Daher ist es besonders wichtig, zu klären, wie genau die Humusvorräte und der Kohlenstoffgehalt in den Bodenkompartimenten 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. 137 bis 140).

Dabei zeigt sich, dass die Variationskoeffizienten (Cv) in der Of-Lage (s. Abb. 138) geringer als in der L- (s. Abb. 137) und Oh-Lage (s. Abb. 139) 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. 140), 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 137: Variationskoeffizienten Cv [%] der Humusvorräte der L-Lage für 30 Monitoringflächen aus drei Bundesländern in verschiedenen Probennahmejahren

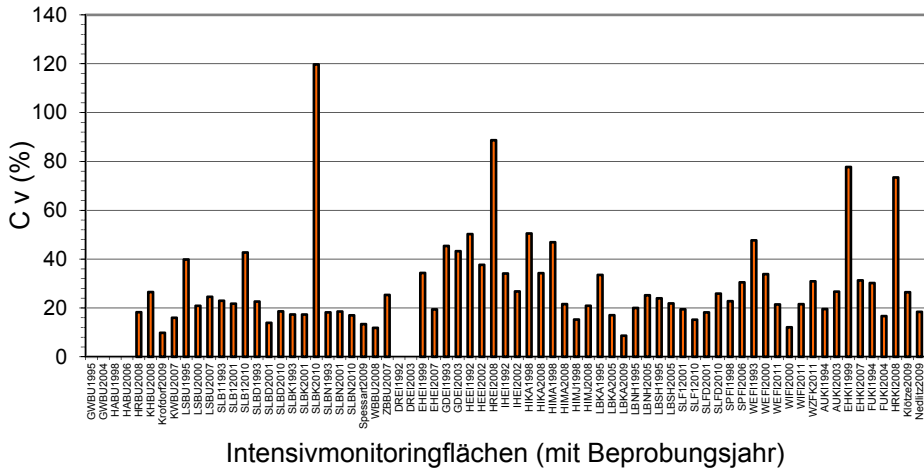


Abbildung 138: Variationskoeffizienten C_v [%] der Humusvorräte der Of-Lage für 30 Monitoringflächen aus drei Bundesländern in verschiedenen Probennahmejahren

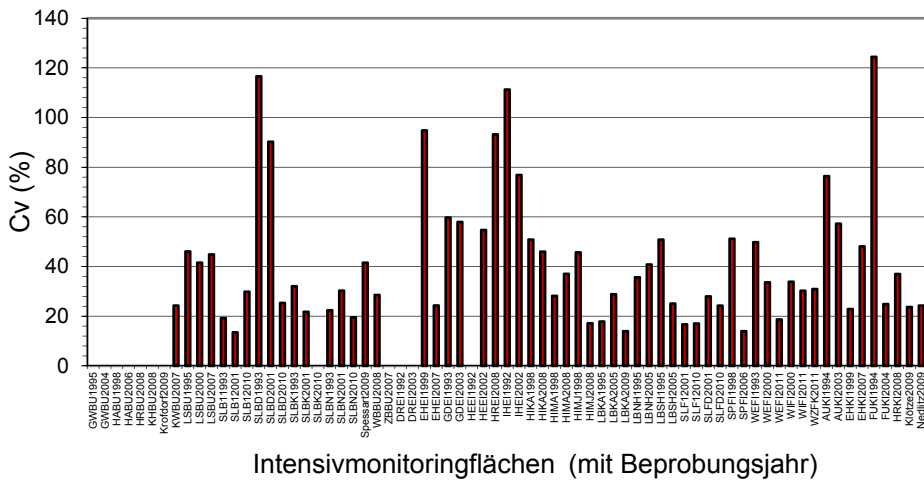
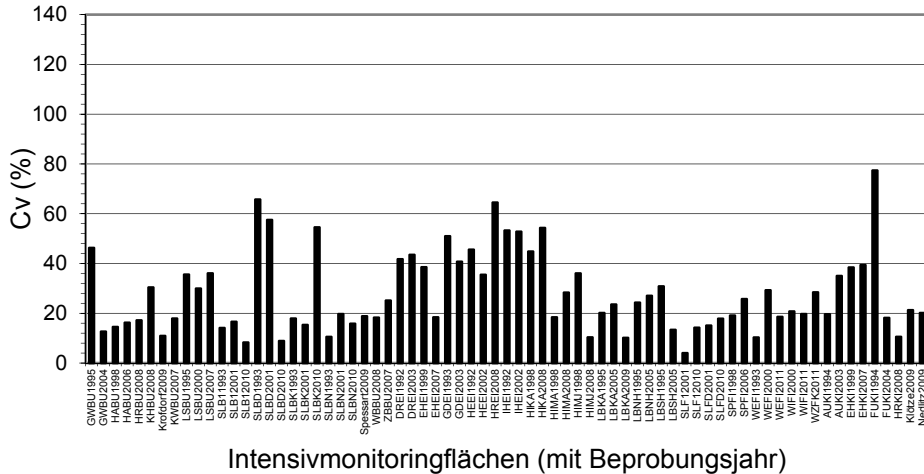


Abbildung 139: Variationskoeffizienten C_v [%] der Humusvorräte der Oh-Lage für 30 Monitoringflächen aus drei Bundesländern in verschiedenen Probennahmejahren



Intensivmonitoringflächen (mit Beprobungsjahr)

Abbildung 140: Variationskoeffizienten C_v [%] der Gesamtbiumsvorräte (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. 141 u. 142). 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. 143), 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.

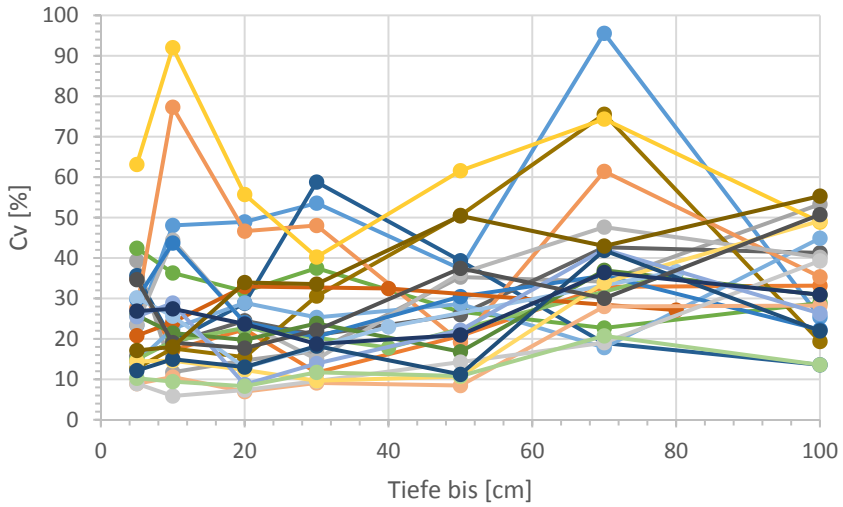


Abbildung 141: Variationskoeffizient C_v [%] des Corg-Gehalts in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für Böden mit Skelettgehalten unter 10 %

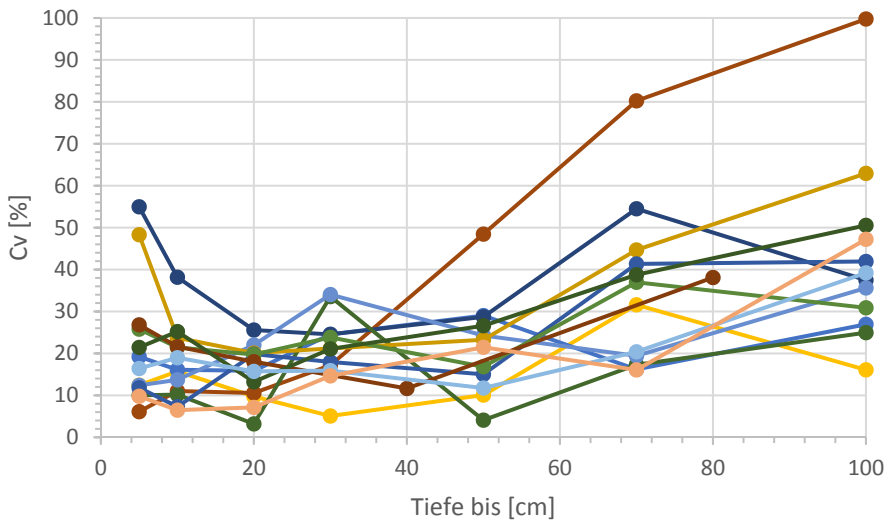


Abbildung 142: Variationskoeffizient C_v [%] des Corg-Gehalts in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für Böden mit Skelettgehalten über 10 %

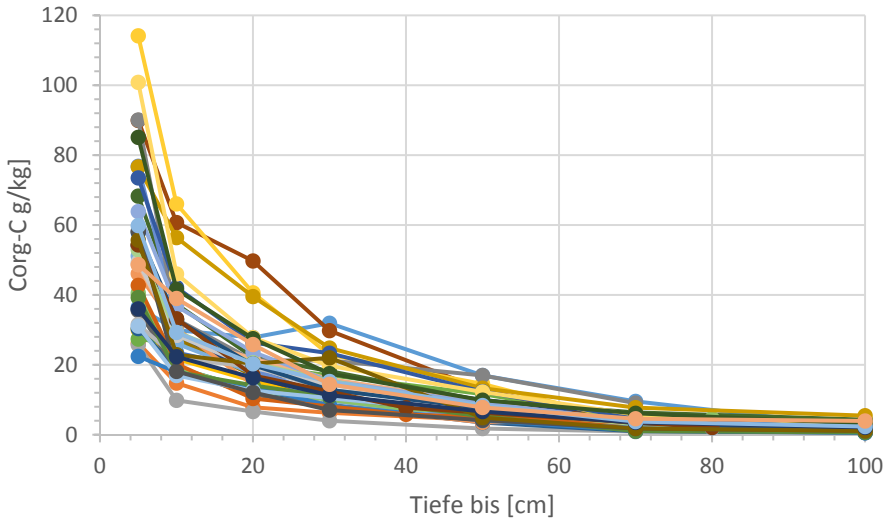


Abbildung 143: Mittlere Corg-Gehalte [g/kg] in Abhängigkeit von der Tiefenstufe [cm] für 30 Intensivmonitoringflächen

10.4.1.2.3 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 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. 144), 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. 47).



Abbildung 144: Bodenprofil auf der Kiefernfläche in Augustendorf

Tabelle 47: *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	C_v [%]	C_v [%]	C_v [%]	C_v [%]	C_v [%]	C_v [%]	C_v [%]	C_v [%]	C_v [%]
von (cm)	0	5	10	20	30	40	50	70	80
bis (cm)	5	10	20	30	40	50	70	80	100
OAKW Al (g/kg)	18	30	27	71	59	18	14	9	10
OAKW Ca (g/kg)	66	65	26	83	51	23	20	10	14
OAKW Cd (mg/kg)	40	75	65	39	52	222	100	45	98
OAKW Co (mg/kg)	21	25	21	21	59	28	20	16	22
OAKW Cr (mg/kg)	83	12	21	47	48	19	11	5	11
OAKW Cu (mg/kg)	19	25	43	26	29	22	7	10	9
OAKW Fe (g/kg)	12	15	27	78	76	32	36	8	10
OAKW K (g/kg)	9	9	9	18	35	20	15	9	10
OAKW Mg (g/kg)	23	14	25	76	84	31	18	11	11
OAKW Mn (g/kg)	41	19	9	18	21	27	21	21	21
OAKW Na (g/kg)	71	82	90	78	71	80	69	70	67
OAKW Ni (mg/kg)	98	18	37	34	49	19	15	10	11
OAKW Pges (g/kg)	26	29	28	86	49	42	36	37	29
OAKW Pb (mg/kg)	20	15	49	56	18	31	17	9	5
OAKW Sges (g/kg)	24	34	44	57	42	58	38	37	30
OAKW 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. 145) 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. 48).



Abbildung 145: Bodenprofil auf der Buchenfläche im Göttinger Wald

Tabelle 48: Variationskoeffizienten C_v [%] der Elementgehalte im Königswasseranflussschluss (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
Sgcs (g/kg)	7	10	12	15	13	12	13	12	19
Zn (mg/kg)	10	12	13	13	24	20	18	15	16

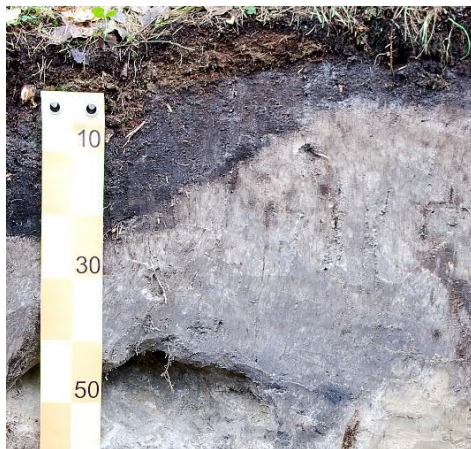
Diese Beispiele zeigen, dass mithilfe bestimmter Königswasser-extrahierbarer Elementgehalte Einschätzungen zur Homogenität der Fläche möglich sind und somit auch bei der BZE, durch Vergleich der Königswasser-extrahierbaren Elementgehalte bei der BZE I gegenüber der BZE II, abgeschätzt werden kann, ob am jeweiligen BZE-Punkt der Einfluss der Flächenvariabilität größer ist als der Einfluss der zeitlichen Veränderung.

10.4.1.3 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. 146).



Punkt 585: Horizontierung gestört



Punkt 540: Tiefpflug



Punkt 916: Tiefpflug



Punkt 642: Durchwurzelung und Störung

Abbildung 146: Mögliche Störungen an Bodenprofilen der BZE

10.4.1.4 *Verschleppung*

Das Verschleppungsproblem tritt nicht bei Probennahmen an der Profilgrube auf. Bei Probenahme mit Bohrzylindern kann jedoch C-reicherer 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.

10.4.1.5 *Veränderung der Trockenrohddichte 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 Trockenrohddichte) 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. (2010) zeigen, dass der Fehler bei den aus den Elementkonzentrationen und der Trockenrohddichte 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 Trockenrohddichte und der Skelettanteil sich nicht verändert haben.

10.4.2 *Probleme der Probenanalyse*

10.4.2.1 *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 49 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 49: 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			

10.4.2.2 *Eingeschränkte Repräsentativität von Teilproben*

10.4.2.2.1 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, 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.

10.4.2.2.2 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 Perkolation 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 49.

11 Aspekte des BZE-Datenmanagements

Andreas Schulze, Jan Evers

11.1 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:

11.1.1 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. 147).

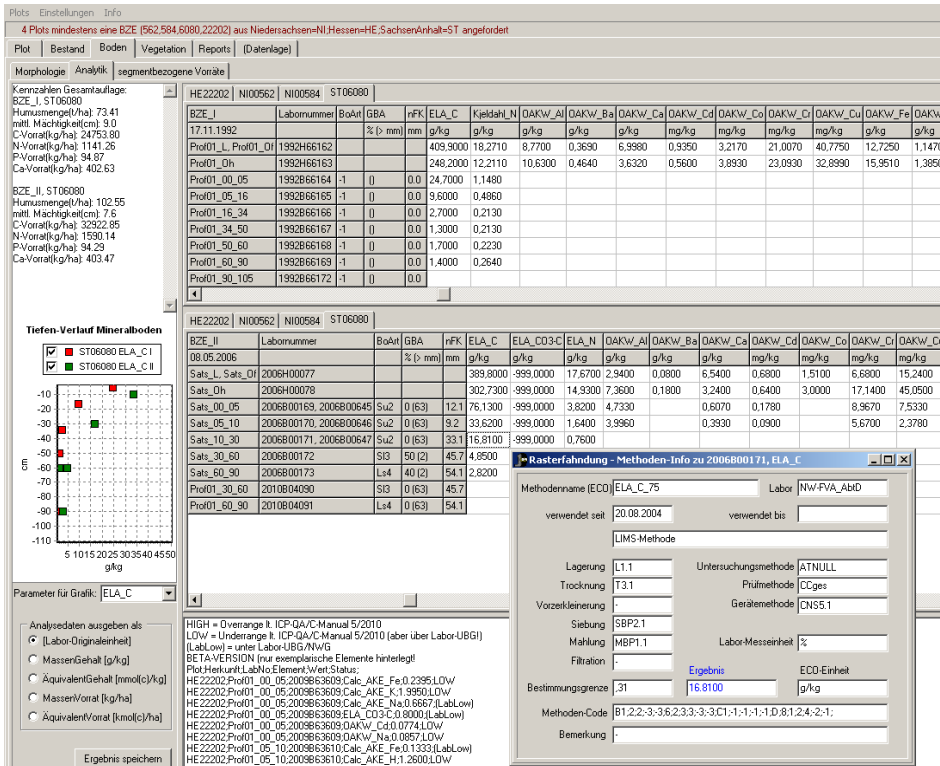


Abbildung 147: Integrierende BZE-Programmierfläche

11.1.2 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. 147). Hieraus erwachsen nicht nur technische, sondern auch fachlich-inhaltliche Anforderungen, wie z. B. die Harmonisierung mehrerer tradierter Standortkartierungsverfahren im Hinblick auf eine länderübergreifende Auswertbarkeit (vgl. SCHMIDT et al. 2015), die zusätzlich den Vorteil hatte, dass zuvor nicht ausreichend besetzte Straten nun besser ausgestattet waren. Dies sei am Beispiel der Kategorisierungen der Nährstoffversorgung im Rahmen der Standortkartierung der beteiligten Bundesländer in Tabelle 50 verdeutlicht.

Tabelle 50: 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

11.1.3 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. 147). 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.

11.1.4 Integration von Methodeninformationen

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. 147).

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?).

11.1.5 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 (weitere Integrationsebenen) erforderte.

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 potentiellen 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. 148, linker Teil) vermieden wird.

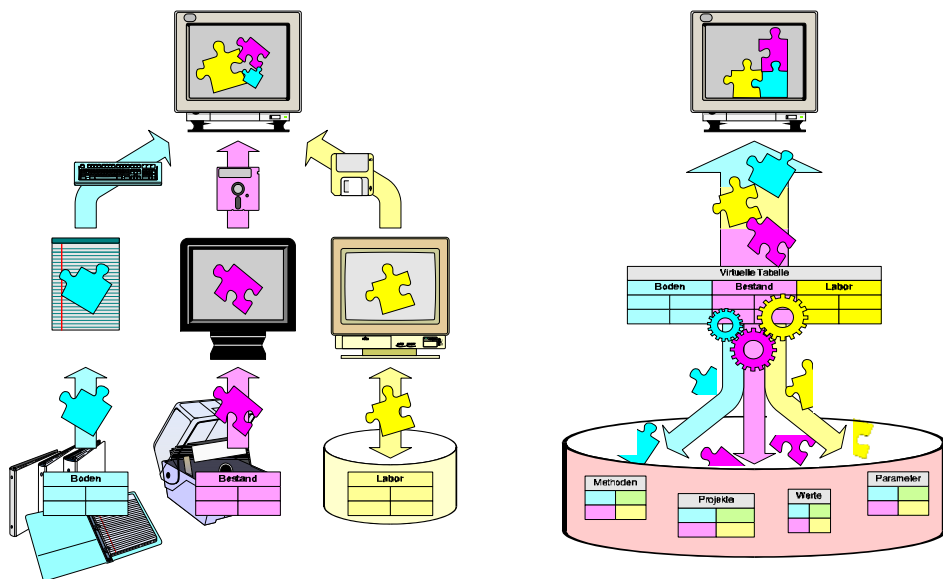


Abbildung 148: Gegenüberstellung von Datenverwaltung in Teildatenbanken (links) und mit zentraler Datenintegration (rechts)

11.2 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). 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. 149, s. SCHULZE 2012).

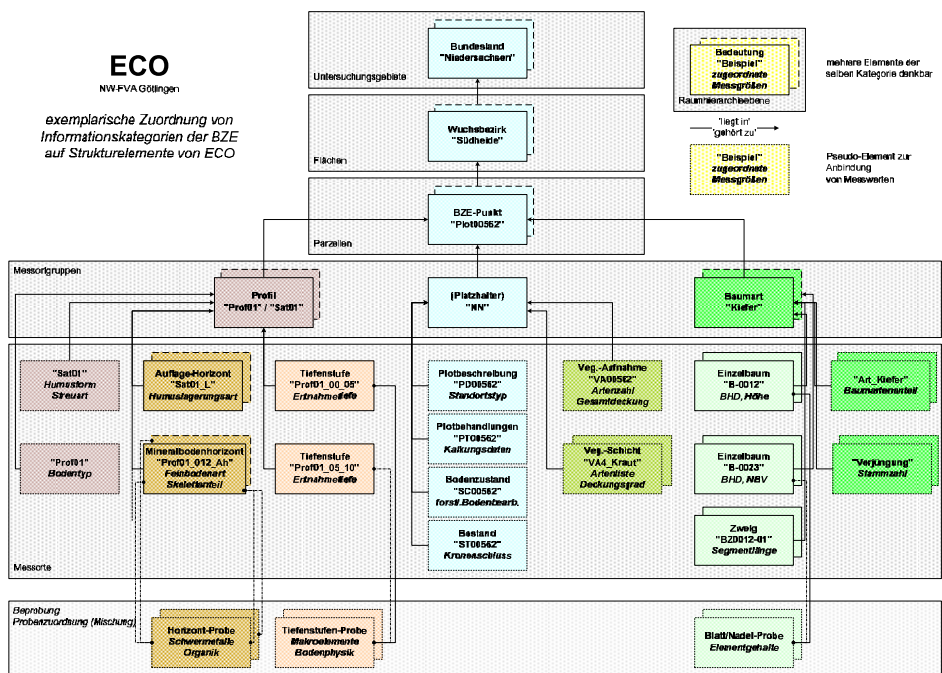


Abbildung 149: Zuordnung von Informationskategorien der BZE zu Strukturelementen von ECO

11.2.1 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. 149):

- *Plot*bezogene, zeitlich unveränderliche (z. B. Koordinaten, Relief)
- *Plot*bezogene, zeitlich veränderliche (z. B. Kalkungsmaßnahmen)
- *Inventur*bezogene, zeitlich variable (z. B. die Standortstypisierung)
- *Profil*bezogene (z. B. die Humusform, die an einzelnen Satelliten abweichend sein kann)
- *Horizont*bezogene (z. B. die Feinbodenart, die in Horizonten des Profils wechseln kann)
- *Tiefenstufen*bezogene (z. B. Bereiche der Probenentnahme)
- *Bestandes*bezogene (z. B. Kronenschlussgrad)
- *Baumarten*bezogene (z. B. Verjüngungsanteile)
- *Einzelbaum*bezogene (z. B. Baumhöhe und Kronenverlichtung)
- *Vegetationsschicht*bezogene (z. B. Artenzahl)
- *Vegetationsart*bezogene (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.

11.2.2 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 potentiell nicht alle mit einer Selektion erfasst. Die Hinterlegung dieser Werte-Listen ist damit ein grundlegendes, in der Datenbankanzeption berücksichtigtes Merkmal der Qualitätssicherung.

11.2.3 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. 51).

Tab. 51: 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 = Standortskartierung 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.

11.2.4 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.

11.2.5 Methodendokumentation der Laboranalytik

Ein 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 überlappender 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 52 dargestellte Bild:

Tabelle 52: 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.

11.2.6 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 Teilinformationen durch sog. „Sichten“ in eine allgemein verständliche Form rücktransferiert werden. Diese Sichten müssen darüber hinaus in Programmoberflächen eingebunden werden, um z. B. alle wesentlichen Datenbereiche (Sichten) 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. 150, 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. 150, 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.

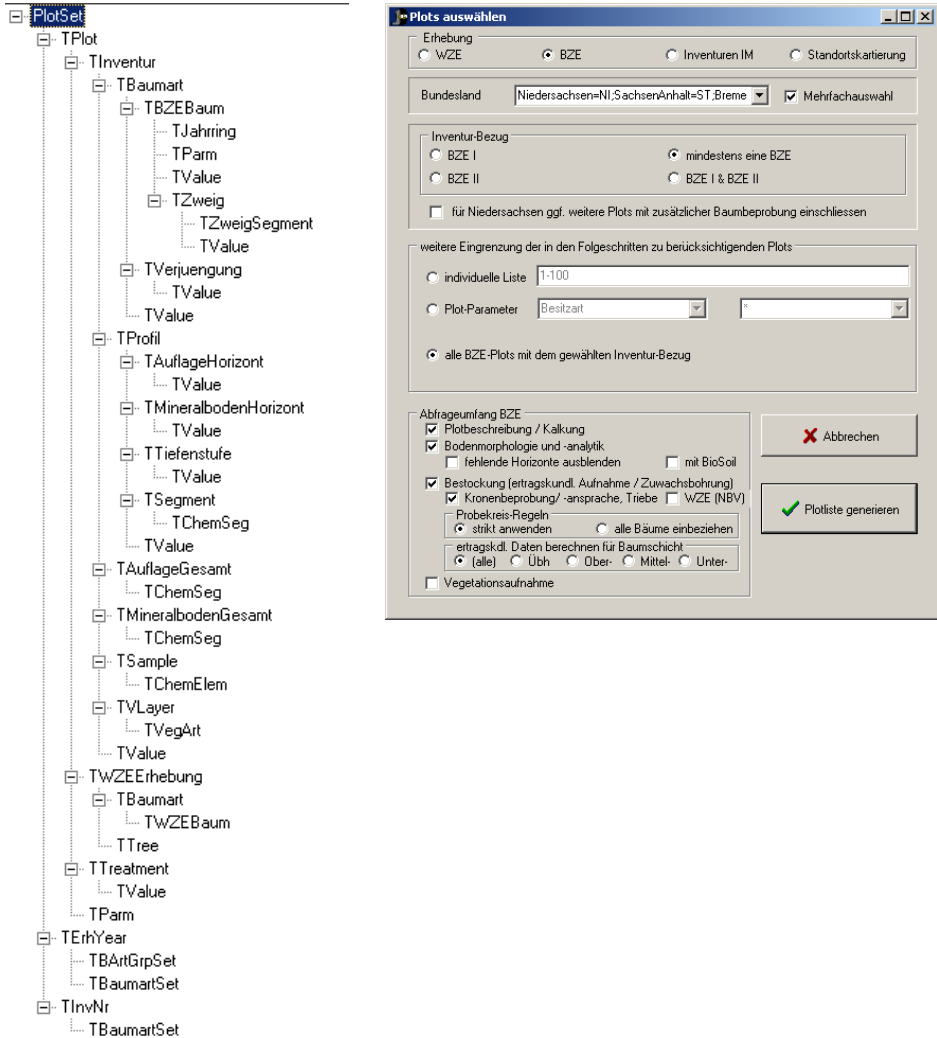


Abbildung 150: Klassendefinitionen und -hierarchie sowie Plot-Auswahlmaske der BZE-Applikation

11.3 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. 151): 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.

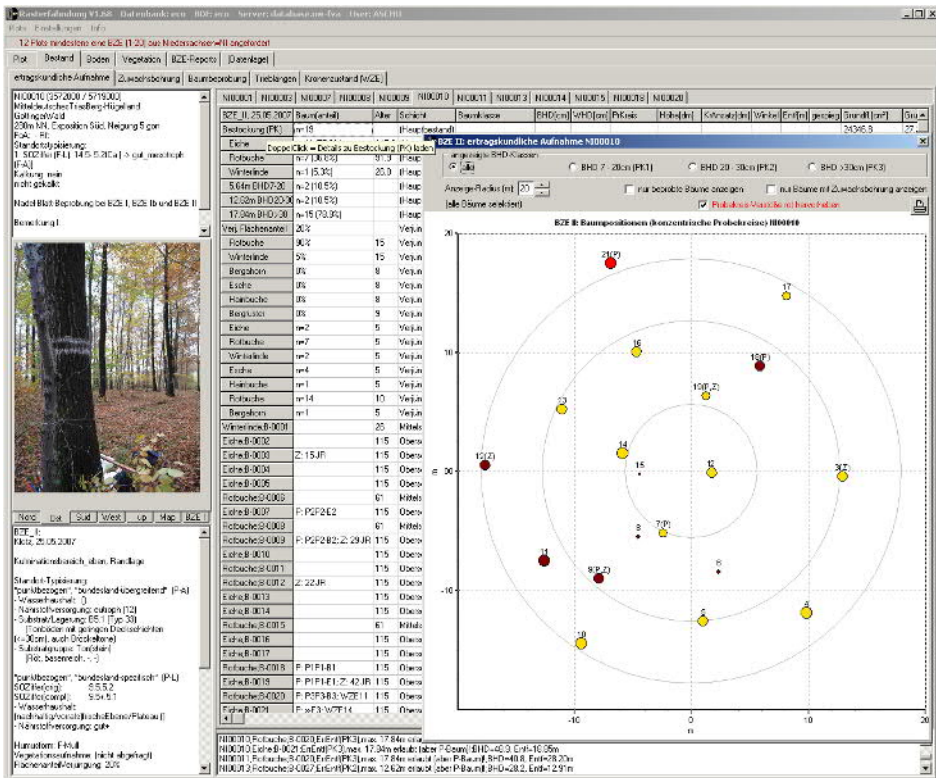


Abbildung 151: Einbindung von Fotos und Graphiken zur Veranschaulichung der Plot-Situation

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. 152).

Gleiches gilt für zentrale Parameter wie z. B. den Kohlenstoff-Gehalt in Bodenproben: Hier wird aus potentiell unterschiedlichen Ausgangsgrößen (C_{ges}, C_{org}, CaCO₃-C) einheitlich C_{org} 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. 51).

ST06080													
BZE_I, 17.11.1992	Zuordnungsfaktoren	TRD	GBA	FBV	nFK(dw)	pHH2O	pHKCl	CorgI	NI	BS	AKI	AKE_AI	AKE_AI
		g/cm ³	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 (95~30)+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	2854.96	

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 ³	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 152: 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.

11.4 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 und Probenehmer, 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
- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl., Hannover, 438 S.
- AG BODENKUNDE (1982): Bodenkundliche Kartieranleitung. 3. Aufl., Hannover, 331 S.
- AK STANDORTSKARTIERUNG (2003): Forstliche Standortsaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Arbeitskreis Standortskartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung. 6. Auflage. IHW-Verlag, Eching, 352 S.
- ALEWELL, C. (1995): Sulfat-Dynamik in sauren Waldböden – Sorptionsverhalten und Prognose bei nachlassenden Depositionen. *Bayreuther Forum Ökologie*, 19
- 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.; FELDHAUS, D.; KLEEFISCH, B.; SCILLING, B.; ÜTERMANN, 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. Bd. 3, 9152, 1-127; Erich Schmidt Verlag, Berlin
- BBodSchG (1998): Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 101 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) 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
- BEISECKER, R.; EVERS, J. (2012): Diffuse Stoffausträge aus Wald und naturnahen Nutzungen. LAWA-Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Literaturstudie, 132 S. <https://www.nw-fva.de/index.php?id=335>
- BERNHARDT, M. (2005): Reaktionen der Waldbodenvegetation auf erhöhte Stickstoffeinträge: Analyse und Vorhersage von Vegetationsveränderungen anhand von funktionellen Merkmalen. *Dissertationes Botanicae*, 397, 1-121
- BIMSchV (2013): Verordnung über Großfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 1021,1023, 3754), die durch Artikel 80 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist. 28 S.
- 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.; GAUER, J. (2012): Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz: Ergebnisse der zweiten landesweiten Bodenzustandserhebung BZE II. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Nr. 70/2012, 228 S.
- BLOCK, J.; GREVE, M.; SCHÜLER, G. (2013): Ohne Kalkung keine nachhaltige Forstwirtschaft. *Holz-Zentralblatt*, 15, 361-362
- BLOCK, J.; 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.; 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, Nr. 63/07, 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.
- 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
- BRAUN, S.; BELYAZID, S.; FLÜCKIGER, W. (2009): Biomassenutzung und Nährstoffentzug – Aspekte einer nachhaltigen Waldnutzung. In: Zürcher Wald, 1, 15-18
- 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: 10.1016/j.envpol.2009.11.030)
- BROSINGER (2010): Bayerns Waldböden in gutem Zustand. Ein erstes Fazit aus den Ergebnissen der zweiten bundesweiten Zustandserfassung im Wald (BZE2). LWF aktuell, 78, 35-36
- CEULEMANS, R.; JANSSENS, I.A.; JACH, M.E. (1999): Effects of CO₂ enrichment on trees and forests: Lessons to be learned in view of future ecosystem studies. Annals of Botany, 84, 577-590
- COLE, D.W. (1992): Nitrogen Chemistry, Deposition, and Cycling in Forests. In: JOHNSON, D.W.; LINDBERG, S.E. (eds.): Atmospheric Deposition and Forest Nutrient Cycling. Ecological Studies Vol. 91. Berlin, Springer-Verlag, 150-152
- 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
- DISE, N.; MATZNER, E.; GUNDERSEN, P. (1998): Synthesis of nitrogen pools and fluxes from European forest ecosystems. Water, Air and Soil Pollution, 105, 143-154
- 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
- EVERS, F.H. (1964): Die Bedeutung der Stickstoffform für Wachstum und Ernährung der Pflanzen, insbesondere der Waldbäume. Stuttgart: Mitteilung Verein 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.; DAMMANN, I.; NOLTENSMEIER, A.; NAGEL, R.V. (2008): Auswirkungen von Bodenschuttkalkungen auf Buchenwälder (*Fagus sylvatica* L.). In: NW-FVA (Hrsg): Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Beiträge aus der NW-FVA, Bd. 3, 21-50

- EVERS, J.; KÖNIG, N.; WOLFF, B.; MEIWES, K.J. (2001): Vorbereitung der Zweiten Bodenzustandserhebung im Wald – Untersuchungen zur Laboranalytik, Stickstoffbestimmung und zeitlichen Variabilität bodenchemischer Parameter. BMVEL, Bonn, 243 S.
- EVERS, J.; PAAR, U.; SCHMIDT, W. (2010): Ziele und erste Ergebnisse der BZE II. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2010 für Hessen. 28-31
- EVERS, J.; PAAR, U. (2011): Kohlenstoffspeicherung in hessischen Waldböden – Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung BZE II In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2011 für Hessen. 23-25
- EVERS, J.; PAAR, U. (2012): Bodenzustandserhebungen (BZE I und BZE II) – Wie hat sich der Bodenzustand in Hessens Waldböden verändert? In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2012 für Hessen. 31-35
- 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 bei der BZE als Brücke zur forstlichen Standortskartierung. Ergebnisse der BZE II für Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt. AFZ-DerWald, 14, 16-20
- EVERS, J.; PAAR, U. (2013C): Bodenzustandserhebung (BZE II) und Standortskartierung. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2013 für Hessen. 26-35
- EVERS, J.; SCHÖNFELDER, E.; STEINMANN, V.; JENSEN, T.; STÜBER, V.; JANSEN, M. (2015): Bodenchemie und Durchwurzelung in tieferen Bodenschichten. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2015 für Hessen. 36-38
- 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
- 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
- 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
- FORTMANN, H.; RADEMACHER, P.; GROH, H.; HÖPER, H. (2012): Stoffgehalte und -vorräte im Boden und deren Veränderungen. In: Tagungsband 20 Jahre Dauerbeobachtung in Niedersachsen. GeoBerichte, 23, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 48-69
- FVA (FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG) (2013): Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung. FVA-Merkblatt, 54, 41 S.
- 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 FORSTLICHE ANALYTIK, Hrsg.) (2005): Handbuch Forstliche Analytik – eine Loseblattsammlung der Analysemethoden im Forstbereich. Grundwerk. BMELV
- GAFÄ (GUTACHTERAUSSCHUSS FORSTLICHE ANALYTIK, Hrsg.) (2014): Handbuch Forstliche Analytik – eine Loseblattsammlung der Analysemethoden im Forstbereich. Grundwerk und 1. bis 5. Ergänzung. BMELV
- GAUER, J.; ALDINGER, E. (2005): Waldökologische Naturräume Deutschlands. Forstliche Wachgebiete und Wuchsbezirke. Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, 43, 324 S.

- 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 (DOI: 10.4432/0300-4112-85-35)
- GROSSMANN, H. (1927): Die Waldweide in der Schweiz. ETH Zürich, Dissertation, Höngg, Zürich, 123 S.
- GRUNDMANN, V. (2012): Facetten des Waldes. FENA-Skripte, Bd. 2, Gießen, 240 S.
- 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
- GUCKLAND, A.; AHRENDTS, B.; PAAR, U.; DAMMANN, I.; EVERS, J.; MEIWES, K.-J.; SCHÖNFELDER, E.; ULLRICH, T.; MINDRUP, M.; KÖNIG, N.; EICHHORN, J. (2012): Predicting depth translocation of base cations after forest liming: results from long-term experiments. *Eur. J. Forest Res.*, 131. Jg., 6, 1869-1887
- GUNDERSSEN, P.; EMMETT, B.A.; KJØNAAS, O.J.; KOOPMANS, C.J.; TIETEMA, A. (1998): 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.
- HAYNES, R.J. (1982): Effects of liming on phosphate availability in acid soils – A critical review. *Plant and Soil*, 68, 289-308
- 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.
- HESSEN-FORST (2014): C 15 Kompensationskalkung. Geschäftsanweisung Nr. 01/2014 von Hessen-Forst, 9 S.
- HIPPEL, P.; BRANSE, C. (1992): Veränderungen der Nährelementkonzentrationen in den Nadeln mittelalter Kiefernbestände auf pleistozänen Sandstandorten Brandenburgs in den Jahren 1964-1988. *Forstw. Cbl.*, 111, 44-60
- HLUG (HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, Hrsg.) (2008): Untersuchung des Einflusses des Klimawandels auf die CO₂-Freisetzung aus Böden ausgewählter hessischer Dauerbeobachtungsflächen. Abschlussbericht
- HLUG (HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE) (2014): Geologische Übersichtskarte von Hessen im Maßstab 1:2 Mio. Wiesbaden
- HMLFN (HESSISCHES MINISTERIUM DES INNEREN UND FÜR LANDWIRTSCHAFT, FORSTEN UND NATURSCHUTZ, Hrsg.) (1996): Bodenschutzkalkung. Merkblatt 31, Hessische Landesforstverwaltung, 32 S.
- HMLWLFN (HESSISCHES MINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG, WOHNEN, LANDWIRTSCHAFT, FORSTEN UND NATURSCHUTZ, Hrsg.) (1994): Naturgemäßer Waldbau. Wald in Hessen. 40 S.
- HMUKLV (HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMASCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ) (2014): Hessen – Bäume, Wälder, Lebensräume – ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur (BWI³) für Hessen. ISBN 978-3-89274-369.9

- HOCKE, R. (1992): Wirkung von Luftschadstoffen. In: 10 Jahre Waldökosystemstudie Hessen. Forschungsberichte – Hessische Forstliche Versuchsanstalt, Bd. 15, 56-60
- HOCKE, R. (1995): Waldbodenzustand in Hessen. Wald in Hessen: Forschungsbericht, Band 19, 146 S.
- HODSON, M.E.; LANGAN, S.J.; WILSON, M.J. (1996): A sensitivity analysis of the PROFILE model in relation to the calculation of soil weathering rates. *Appl. Geochem.*, 11, 6, 835-844
- HÖPER, H.; MEESENBURG, H. (Hrsg.) (2012): Tagungsband 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen. *GeoBerichte*, 23, 256 S.
- HOFMEISTER, H. (2004): Lebensraum Wald. Nachdruck der 4. Aufl., Verlag Dr. Kessel, 285 S.
- 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.
- 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
- 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. 4. 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.
- 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. R. PICHs-MADRUGA, Y. SOKONA, E. FARAHANI, S. KADNER, K. SEYBOTH, A. ADLER, I. BAUM, S. BRUNNER, P. EICKEMEIER, B. KRIEMANN, J. SAVOLAINEN, S. SCHLÖMER, C. VON STECHOW, T. ZWICKEL AND J.C. MINX (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- 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.
- IRNIGER, M. (1993): Wald und Waldnutzung im Umbruch des 18. Jahrhunderts. *Geographica Helvetica*, 48, 67-71 (DOI:10.5194/gh-48-67-1993)
- JACOBSEN, C.; RADEMACHER, P.; MEESENBURG, H.; MEIWES, K.J. (2003): Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme B/69, Göttingen
- JONARD, M.; ANDRÉ, F.; GIOT, P.; WEISSEN, F.; VAN DER PERRE, R.; PONETTE, 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: 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: 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

- 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. (eds.): Functioning and Management of European Beech Ecosystems. Ecological. Studies, 208, 183-205 (DOI: 10.1007/978-3-642-00340-0_11)
- 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
- KIMMINS, J. P. (1987): Forest ecology. New York: Macmillan, 531 S.
- KLINCK, U. (2015): Mündliche Mitteilung, NW-FVA
- KLINCK, U.; RADEMACHER, P.; SCHELER, B.; WAGNER, M.; FLECK, S.; AHREND, B.; MEESENBURG, H. (2012): Ökosystembilanzen auf forstwirtschaftlich genutzten Flächen. In: HÖPER, H.; MEESENBURG, H. (Hrsg): Tagungsband 20 Jahre Dauerbeobachtung in Niedersachsen. GeoBerichte, 23, 163-174
- 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.; KÖNIG, N.; EVERS, J. (2010): Trockenrohddichte 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. (2010): Daten für den Bodenschutz. LWF aktuell, 78, 4-6
- KÖLLING, C., FALK, W. (2010): Heute reichlich, morgen knapp: Wasser im Wald. LWF aktuell, 78, 15-17
- KÖNIG, N.; FORTMANN, H. (1996): Probenvorbereitungs-, Untersuchungs- und Elementbestimmungsmethoden des Umweltanalytik-Labor der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt und des Zentrallabor II des Forschungszentrums Waldökosysteme. Teile 1 bis 3. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen, Reihe B, Bd. 46 bis 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.; 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 bis 78
- 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., SCHÖNFELDER, E.; BLUM, U. (2014): Auswertung der Standardmessungen und der Ringversuche im Rahmen der BZE II. BMELV (Hrsg.)
- 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
- 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
- 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
- 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. LfU Bayern (2005): Bodenbelastungen – eine Übersicht. UmweltWissen am Bayerischen Landesamt für Umwelt
- LORENZ, M.; GRANKE, O. (2009): Deposition measurements and critical loads calculations: monitoring data, results, perspective. iforest – Biogeosciences and Forestry, 11-14
- LÜKEWILLE, A. (1995): Rekonstruktion der Boden- und Gewässerversauerung in der Langen Bramke (Harz). Modellierung der Sulfat-Dynamik mit MAGIC (Absorption) und dem LB-Modell (Ausfällung). In Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK): Bayreuther Forum Ökologie, Selbstverlag, 21, 1-189
- 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: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. 2nd 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.
- MEIWES, K.J.; KHANNA, P.K.; ULRICH, B. (1980): Retention of sulphate by an acid brown earth and its relationship with the atmospheric impact of Sulphur to forest vegetation. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 143, 402-411
- 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.; 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: 10.1007/s10342-004-0044-4)
- 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: 10.1007/s10342-012-0615-8)
- MELLERT, K.H.; KÖLLING, C. (2006): Stickstoffsättigung – ein wachsendes Problem ohne Lösung? Forst und Holz, 61, 95-98
- 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
- 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

- MOLDENHAUER, K.-M. (2005): Der Kohlenstoffgehalt Hessischer Böden. Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt am Main. Fachbereich Geowissenschaften/Geographie. Studie im Auftrag des HLUG, Frankfurt am Main, 1-17
- MÜLLER, F.; BERGMANN, M.; DANNOWSKI, R.; DIPPNER, J.W.; GNAUCK, A.; HAASE, P.; JOCHIMSEN, M.C.; KASPRZAK, P.; KRÖNCKE, I.; KÜMMERLIN, R.; KÜSTER, M.; LISCHIED, G.; MEESENBERG, H.; MERZ, C.; MILLAT, G.; MÜLLER, J.; PADISÁK, J.; SCHIMMING, C.G.; SCHUBERT, H.; SCHULT, M.; SELMECZY, G.; SHATWELL, T.; STOLL, S.; SCHWABE, M.; SOLTWEDEL, T.; STRAILE, D. (2016): Assessing resilience in long-term ecological data sets. *Ecological Indicators*, 65, 10-43 (DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.10.066)
- NÄTSCHER, L. u SCHWERTMANN, U. (1991): Proton buffering in organic horizons of acid forest soils. *Geoderma*, 48, Iss. 1-2, 93-106
- NAGEL, R.-V.; RUMPF, H.; MEIWES, K. J.; KLINCK, U.; SPELLMANN, H. (2014): Hiebsformen zum Umbau älterer Fichtenreinbestände. *AFZ/Der Wald*, 69. Jg., 10, 22-26
- NFP (NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT) (2007): Forstliche Standortaufnahme. Geländeökologischer Schätzrahmen. Anwendungsbereich: Mittelgebirge, Bergland und Hügelland. 11 S. (<http://www.landesforsten.de/Publikationen.1291.0.html>)
- NFP; LLUR (NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT u. LANDESAMT F. LANDWIRTSCHAFT, UMWELT U. LÄNDLICHE RÄUME SCHLESWIG-HOLSTEIN) (2009a): Forstliche Standortaufnahme. Geländeökologischer Schätzrahmen. Anwendungsbereich: pleistozänes (diluviales) Tiefland. 14 S. (<http://www.landesforsten.de/Publikationen.1291.0.html>)
- NFP; LLUR (NIEDERSÄCHSISCHES FORSTPLANUNGSAMT u. LANDESAMT F. LANDWIRTSCHAFT, UMWELT U. LÄNDLICHE RÄUME SCHLESWIG-HOLSTEIN) (2009b): Forstliche Standortaufnahme. Geländeökologischer Schätzrahmen – Varianten. Anwendungsbereich: pleistozänes (diluviales) Tiefland, Mittelgebirge, Berg- und Hügelland. 5 S. (<http://www.landesforsten.de/Publikationen.1291.0.html>)
- NIHLGARD, 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 Phytol*, 158, 409-416
- OTTO, H.-J. (1972): Die Ergebnisse der Standortkartierung im pleistozänen Flachland Niedersachsens – Grundlage waldbaulicher Leitvorstellungen. *Aus dem Walde*, 19, 191 S.
- 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.; DAMMANN, I.; GAWEHN, P.; WENDLAND, J., EICHHORN, J. (2007): Waldzustandsbericht 2007 für Hessen. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.), 32 S.
- PAAR, U.; EICHHORN, J. (2007): Exkursionsführer Zierenberg – Level II. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, unveröffentlicht, 63 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
- 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: 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: 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.

- PRENZEL, J. (1982): Ein bodenchemisches Gleichgewichtsmodell mit Kationenaustausch und Aluminiumhydroxosulfat. Gött. Bodenk. Ber. 72, 1-113
- PRETZSCH, H.; MOSHAMMER, R.; DIELER, J.; BÖTTCHER, M.; GÖTTLEIN, A.; WEIS, W.; BLOCK, J.; SCHUCK, J.; GAUER, J.; WUNN, U. (2013): Entscheidungsstützungssystem zum Nährstoffentzug im Rahmen der Holzernte. Endbericht DBU-Projekt 25966-33/0
- 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 10-1007/s10342-007-0181-7)
- QUIMET, R.; MOORE, J.-D.; DUCHESNE, L.; CAMIRÉ, C. (2013): Etiology of a recent white spruce decline: role of potassium deficiency, past disturbances and climate change. Canadian Journal of Forest Research, 43, 66-77
- 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, URL <http://R-project.org>
- RASPE, S.; GÖTTLEIN, A. (2008): Nährstoffbilanzen von Fichtenökosystemen. Forst u. Holz, 7/8, 60-65
- 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
- RIEBELING, R. (1992): Waldernährung und Waldwachstum. In: 10 Jahre Waldökosystemstudie Hessen – Ergebnisse und Perspektiven. Hessische Forstliche Versuchsanstalt, Band 15, 66-68
- 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.; DIETRICH, H.-P. (2000): Ernährungszustand der Hauptbaumarten an den deutschen Level II-Standorten. Forstarchiv, 71, 65-69
- RÖDIG, K.-P. (2000): Naturgemäßer Waldbau – Der Weg zum Naturwald. Mitteilungen der Hess. Landesforstverwaltung, Bd. 37, 148-153
- ROTHE, A.; HUBER, C.; KREUTZER, K.; WEIS, W. (2002): 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.
- SABEL, K.-J. (2005): Die Bodenlandschaften Hessens. Mittlgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 105, 21-27
- 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. (2015): Mündliche Mitteilung, NW-FVA
- 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.

- SCHUBERT, A.; FALK, W.; STETTER, U. (2015): Waldböden in Bayern. Ergebnisse der BZE II. Forstliche Forschungsberichte München Nr. 213, 144 S.
- 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, 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*, Nr. 14, 21-24
- SCHULZE, E.-D.; BECK, E.; MÜLLER-HOHENSTEIN, K. (2002): Pflanzenökologie. Spektrum Akademischer Verlag, 846 S.
- 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: 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. Bern, in: H-Soz-u-Kult.
- SÜSSER, P. u. SCHWERTMANN, U. (1991): Proton buffering in mineral horizons of some acid forest soils. *Geoderma*, 49, Iss. 1-2, 63-76
- SVERDRUP, H.; THELIN, G.; ROBLES, M.; STJERNQUIST, I.; SÖRENSEN, J. (2006): Assessing nutrient sustainability of forest production for different tree species considering Ca, Mg, K, N and P at Björnstorp Estate, Sweden. *Biogeochemistry*, 81/2, 219-238
- TALKNER, U.; MEIWES, K.J.; ANDRAE, H.; DAMMANN, I.; DIETRICH, H.P.; GENSSLER, L.; KALLWEIT, R.; SCHIMMING, C.; SCHRÖCK, H.W.; SEIDLING, W.; WILPERT, K. v. (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: 10.1007/s13595-015-0459-8)
- TAMM, C. O. (1991): Nitrogen in terrestrial ecosystems. Questions of productivity, vegetational changes and ecosystems stability. In: *Ecological Studies*, 81, Berlin, Springer Verlag, 116 S.
- THELIN G.; ROSENGREN-BRINCK, U.; NIHLGÅRD, B.; BARKMAN, A. (1998): Trends in needle and soil chemistry of Norway spruce and Scots pine stands in South Sweden 1985-1994. *Environmental Pollution*, 99, 149-158
- TRIPLER, C.E.; KAUSHAL, S.S.; LIKENS, G. E.; TODD WALTER, M. (2006): Patterns in potassium dynamics in forest ecosystems. *Ecology Letters*, 9 (4), 451-466
- 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, (http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submission/items/8108.php)
- ULLRICH, T.; WILM, S.; GRAUMANN, V. (2014): Neues Planungsinstrument bei Hessen-Forst: Das digitale Kalkungskataster. *Forstarchiv*, 85, Heft 2, 68-69
- 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.
- ÜLRICH, 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.; 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, S. 278-286
- 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
- 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. (eds.) Atmospheric deposition and forest nutrient cycling – A synthesis of the integrated Forest Study. Springer Verlag, Heidelberg, 178-195
- WALDROP M.P.; ZAK, D.R.; SINSABAUGH, R.L. (2004): Microbial community response to nitrogen deposition in northern forest ecosystems. Soil Biology & 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 Högwald. European Journal of Forest Research, 128, 437-445 (DOI: 10.1007/s10342-009-0291-5)
- 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.
- WENZEL, B.; ULRICH, B. (1988): Kompensationskalkung – Risiken und ihre Minimierung. Der Forst und Holzwirt, 41, 12–16
- WILLIG, J. (2012): Mündliche Mitteilung (FENA Gießen)
- WILPERT, K. v. (2003): Drift des Stoffhaushalts im Fichten-Düngeversuch Pfalzgrafenweiler. AFJZ, 174, 21-30
- 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	potentielle totale Austauschkapazität
Al	Aluminium
anthropogen	durch menschliche Aktivitäten verursacht
atmogen	atmosphärisch erzeugt
äolisch	durch Wind verursacht, luftbütig
Austauschkapazität (AK)	Summe der austauschbaren Ionen in mmol _c /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 ₂	Calciumchlorid
Cd	Cadmium
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₃ ²⁻	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 raumbasierten Daten
Gt	Gigatonne (Milliarde Tonnen)
H, H ⁺	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 _c	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 ²³ Teilchen
N	Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffoxid, Lachgas
Na	Natrium
nFK	nutzbare Feldkapazität
Ni	Nickel
NO, NO ₃ ²⁻	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 ₂)	pH-Wert, in CaCl ₂ -Lösung gemessen
pH(H ₂ O)	pH-Wert, in H ₂ 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 ₄ , SO ₄ ²⁻	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 ³
TRD(Fb)	Trockenrohdichte des Feinbodens in g/cm ³
Trophie	Einstufung der Nährstoffversorgung eines Standortes
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

Unser besonderer Dank gilt der Abteilung G - Geologie und Boden, Geologischer Landesdienst im Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, insbesondere den Herren: Ulrich Drolshagen, Dr. Fred Rosenberger, Dr. Karl-Heinz Emmerich, Stefan Fahrig, Herbert Kasel und Prof. Dr. Karl-Josef Sabel für die Durchführung der bodenkundlichen Außenaufnahmen im Rahmen der BZE II.

Für die Durchführung der umfangreichen chemischen Analysen der Bodenproben gilt unser besonderer Dank dem Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, Hessisches Landeslabor Kassel und insbesondere Herrn Dr. Rolf Ellinghaus.

Autoren

Inge Dammann

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
inge.dammann@nw-fva.de

Dr. Jan Evers

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
jan.evers@nw-fva.de

Dr. Uwe Paar

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
uwe.paar@nw-fva.de

Dr. Marcus Schmidt

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Waldwachstum
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
marcus.schmidt@nw-fva.de

Prof. Dr. Johannes Eichhorn

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
johannes.eichhorn@nw-fva.de

Nils König

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
nils.koenig@nw-fva.de

Birte Scheler

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
birte.scheler@nw-fva.de

Dr. Egbert Schönfelder

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Waldwachstum
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
egbert.schoenfelder@nw-fva.de

Andreas Schulze

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt
Abt. Umweltkontrolle
Grätzelstraße 2
D-37079 Göttingen
andreas.schulze@nw-fva.de

Thomas Ullrich

HessenForst
Landesbetriebsleitung, Abt. II,
Waldentwicklung und Umwelt
Europastraße 10-12
D-35394 Gießen
thomas.ullrich@forst.hessen.de

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.
- 2 (2008) **Die Waldkiefer – Fachtagung zum Baum des Jahres 2007.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 98 S.
- 3 (2008) **Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 343 S.
- 4 (2008) **Ergebnisse des westdeutschen IUFRO-Küstentannen-Provenienzversuches im Alter 27.** Hans-Martin Rau, Armin König, Wolfhard Ruetz, Hendrik Rumpf, Egbert Schönfelder. 62 S.
- 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.
- 6 (2011) **Kohlenstoffstudie Forst und Holz Niedersachsen.** René Wördehoff, Hermann Spellmann, Jan Evers, Jürgen Nagel. 92 S.
- 7 (2012) **Das digitale Luftbild. Ein Praxisleitfaden für Anwender im Forst- und Umweltbereich.** Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (Hrsg.). 84 S.
- 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.
- 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.
- 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.

Band

- 11 (2014) **Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGrOSS – Anwendung und theoretische Grundlagen.** Jan Hansen, Jürgen Nagel. 224 S.
- 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.
- 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.
- 14 (2016) **Gefährdungen der Ökosystemdienstleistungen von Wäldern. Fachtagung vom 9. und 10. Oktober 2014 in Göttingen.** Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 185 S.
- 15 (2016) **Waldbodenzustandserhebung 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.

Alle Bände der „Beiträge der NW-FVA“ sind auch als freie Onlineversion über die Homepage der NW-FVA (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 und flächendeckendes Bild über den aktuellen Zustand der Waldböden und deren Veränderungen im Laufe der Zeit. Die BZE in Hessen basiert auf einem systematisch und repräsentativ angelegten 8 x 8 km-Rasternetz mit 139 Aufnahmepunkten. Die erste Bodenzustandserhebung (BZE I, 1992–1993) in Hessen ergab teilweise kritische Zustände der Waldböden, vor allem infolge atmosphärischer Säureeinträge. Die Wiederholungsinventur (BZE II, 2006–2008) gibt nun Aufschluss über Veränderungen in Waldböden vor dem Hintergrund zurückgehender Säurebelastungen, weiterhin hoher Stickstoffeinträge und der Wirkung von Kompensationskalkungen. Neben der eingehenden Analyse der verschiedenen Waldböden steht in diesem Band die Kohlenstoffspeicherung im Fokus, außerdem werden die Befunde zum Bodenzustand in Verbindung mit den Ergebnissen zur Baumernährung und zur Waldvegetation vorgestellt. Der Waldbodenzustandsbericht für Hessen liefert wichtige Entscheidungsgrundlagen für die Wissenschaft, die Praxis und die Politik.



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN

ISBN: 978-3-86395-293-8

ISSN: 1865-6994

Universitätsdrucke Göttingen