Entwicklung einer Methodik zur stichprobengestützten Erfassung und Regionalisierung von Zustandseigenschaften der Waldstandorte

Nicole Wellbrock, Erik Grüneberg, Daniel Ziche, Nadine Eickenscheidt, Marieanna Holzhausen, Juliane Höhle, Rainer Gemballa, Henning Andreae

Thünen Report 36

Bibliografische Information:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information:
The Deutsche Nationalbibliothek (German National Library) lists this publication in the German National Bibliography; detailed bibliographic data is available on the Internet at www.dnb.de

Bereits in dieser Reihe erschienene Bände finden Sie im Internet unter www.ti.bund.de

Volumes already published in this series are available on the Internet at www.ti.bund.de

Zitationsvorschlag – *Suggested source citation:*
Wellbrock N, Grüneberg E, Ziche D, Eickenscheidt N, Holzhausen M, Höhle J, Gemballa R, Andreae H (2015) Entwicklung einer Methodik zur stichprobengestützten Erfassung und Regionalisierung von Zustandseigenschaften der Waldstandorte. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 240 p, Thünen Rep 36, DOI:10.3220/REP1449838842000

Die Verantwortung für die Inhalte liegt bei den jeweiligen Verfassern bzw. Verfasserinnen.

The respective authors are responsible for the content of their publications.

THÜNEN

Thünen Report 36

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

thuenen-report@ti.bund.de
www.ti.bund.de

ISSN 2196-2324
ISBN 978-3-86576-152-1
DOI:10.3220/REP1449838842000
urn:nbn:de:gbv:253-201512-dn056086-4

Entwicklung einer Methodik zur stichprobengestützten Erfassung und Regionalisierung von Zustandseigenschaften der Waldstandorte

Nicole Wellbrock, Erik Grüneberg, Daniel Ziche, Nadine Eickenscheidt, Marieanna Holzhausen, Juliane Höhle, Rainer Gemballa, Henning Andreae

Thünen Report 36

Nicole Wellbrock, Erik Grüneberg, Daniel Ziche, Nadine Eickenscheidt,
Marieanna Holzhausen und Juliane Höhle
Thünen-Institut für Waldökosysteme (TI-WO)
Alfred-Möller-Straße 1, Haus 41/42
16225 Eberswalde
Germany

Rainer Gemballa und Henning Andreae
Staatsbetrieb Sachsenforst
Bonnewitzer Str. 34
01796 Pirna OT Graupa

Im Auftrag von Staatsbetrieb Sachsenforst
Aktenzeichen: 43-8636.30

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit den Mitteln des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft unter der Vorhabensnummer 090296 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Braunschweig/Germany, Eberswalde, Dezember 2015

Thünen Report 36

Zusammenfassung

Der Humus- und Nährstoffstatus von Waldböden wird durch Klimawandel, anthropogene Stoffeinträge und Bewirtschaftungsmaßnahmen fortwährend beeinflusst. In Abhängigkeit ihrer bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften können Waldböden sich verändernde Umweltbedingungen abpuffern oder diese sogar verstärken. Daher müssen die Standortsverhältnisse und deren Entwicklungstendenzen für langfristig angelegte forstliche Entscheidungen berücksichtigt werden. Ziel des Projekts war es, praxistaugliche Indikatoren für waldbaulich/ökologisch relevante Standortszustände zu identifizieren und diese in das Verfahren der Standortserkundung zu integrieren. Hierfür wurden zunächst Humus- und Oberbodendaten aus verschiedenen Erhebungen bezüglich ihrer standörtlichen, räumlichen und zeitlichen Varianz ausgewertet. Nachfolgend sollte ein Methodenvorschlag zur Erfassung der relevanten Standortseigenschaften abgeleitet werden.

Für die Auswertung wurden Standortsinformationen und Analyseergebnisse von 83 Standorten der beiden Bodenzustandserhebungen aus den Jahren 1992 und 2006 genutzt. Zusätzlich erfolgte eine vom BZE-Beprobungsdesign abweichende Beprobung in drei für Sachsen repräsentativen Naturräumen (Mittelgebirge, Hügelland und Tiefland) innerhalb von Testgebiete. Anhand der erzielten Ergebnisse wurden Aussagen zur Repräsentanz in Abhängigkeit von der Intensität der Erhebungen getroffen. Die Beprobung und Laboranalyse aller Standorte erfolgte harmonisiert entsprechend der BZE-Arbeitsanleitung. Für die Regionalisierung der bodenchemischen Größen wurde ein Allgemeines Lineares Modell an den Datensatz angepasst und parametrisiert. Die Auswahl signifikanter Einflussfaktoren erfolgte durch ein multiples Regressionsverfahren. Als geostatistische Methode kam Ordinary Kriging zur Anwendung. Die Residuen aus modellierten Werten und Messwerten dienten dabei als Eingangsdaten. Die Überprüfung der Güte der Regionalisierung erfolgte mittels Kreuzvalidierung.

Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebung in Sachsen weisen auf sich wandelnde Standortsverhältnisse hin. Verdeutlicht wurde dies durch einen Trend hin zu ökologisch besseren Humusformen und somit zu einer Abnahme des Humusvorrats der Humusauflage. In der Folge haben die C- und N-Vorräte in der Auflage abgenommen, während im Mineralboden häufig eine Zunahme der C-Vorräte, jedoch eine Abnahme der N-Vorräte zu verzeichnen war. Die Menge von Nährkationen in der Humusauflage und im oberen Mineralboden war in den meisten Böden Sachsens nur gering. Die Böden zeichneten sich im Allgemeinen durch eine niedrige Basensättigung und eine starke Versauerung aus. Häufig waren die Böden v.a. des Dübener-Niederlausitzer-Altmoränenlands sowie Teile des Elbsandsteingebirges und des Vogtlandes durch einen zunehmenden Verlust von basischen Kationen gekennzeichnet. Hier fanden sich auch sinkende pH-Werte. Andererseits wiesen v.a. mittlere und hohe Berglagen eine durch Kalkung hervorgerufenen Erhöhung des Basenvorrats und ansteigende pH-Werte auf.

Um die Abweichungen der Zustandseigenschaften von den Stammeigenschaften bewerten zu können, wurden in den Testgebieten die Zustandseigenschaften eines Standortes mit den Stammeigenschaften in Beziehung gesetzt. Die Stammeigenschaften spiegeln sich in der unabhängig

von ihrer geographischen Verbreitung definierten Standortsform wider. Die Zustandseigenschaften eines Standortes sind jedoch durch natürliche und anthropogene Umwelteinflüsse nachhaltig verändert worden, so dass Standortszustand und Potential zumeist nicht mehr übereinstimmen. Als wesentliches Merkmal prägt die Humusform die Zustandseigenschaften des Oberbodens. Anthropogen bedingte Stoffeinträge veränderten jedoch die stoffliche Zusammensetzung der Streu, so dass harmonische Humusformen der Standortserkundung kaum vorkamen. Möglicherweise trugen Stickstoffeinträge im Tief- und Hügelland zu einer Verengung der C/N-Verhältnisse bei. Andererseits ist die substratunabhängige Nivellierung im Bergland durch die Kalkung hervorgerufen worden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Rahmenwerte der Humusformen der Standortserkundung unter dem Aspekt der Dynamik der Umweltveränderungen überprüft werden sollten. Auch scheinen die gemessenen Unterschiede zwischen den morphologischen Humusformen z.T. unbedeutend zu sein. Weiterhin konnte kein relevanter Einfluss des Wasserhaushalts nachgewiesen werden. Es ist eher davon auszugehen, dass die untersuchten Parameter einen regionalen Bezug aufweisen. Für eine Beurteilung der Zustandseigenschaften insgesamt scheint die Humusauflage den besten Kompromiss zwischen Aufwand bei der Beprobung und Erkenntnisgewinn zu bieten. Eine Literaturrecherche und die Analyseergebnisse zeigen, dass ein dominierender Einfluss auf die Vitalität und das Wachstum von Waldbeständen von den Parametern Basenvorrat, Basensättigung, Kohlenstoffvorrat, C/N-Verhältnis und pH-Wert ausgeht. Weiterhin empfiehlt sich die Auftrennung in ein gekalktes und ein nicht gekalktes Kollektiv, um Merkmalsausprägungen statistisch abgesichert nachweisen zu können.

Die geostatistische Auswertung zeigte, dass die Übereinstimmung der C/N-Verhältnisse mit den vorhergesagten Werten im Tiefland geringer als im Hügel- oder Bergland war. Weiterhin ließen sich die Werte des Oh-Horizonts besser vorhersagen als die des Mineralbodens. Die Gesamtvorräte an Kohlenstoff wurden relativ gut vorhergesagt, wobei die Prognose für das Tiefland zur Unterschätzung der Messwerte tendierte. Insbesondere im Gebirge konnte der Basenvorrat gut vorhergesagt werden, während dieser im Tiefland eher überschätzt wurde. Für die Basensättigung zeigte sich eine nur geringe Abhängigkeit von den untersuchten Prädiktoren. Die Messwerte waren im Hügel- und Bergland teilweise sehr niedrig und lagen häufig unterhalb der vorhergesagten Werte. Der pH-Wert im Oh-Horizont wurden ausschließlich durch die Kalkung beeinflusst. Demzufolge wurden für das Testgebiet Bergland höhere Werte prognostiziert als für die anderen beiden Testgebiete. Im Bergland wurden z.T. sehr hohe pH-Werte im Oh-Horizont vorhergesagt, während für den Mineralboden die niedrigsten pH-Werte ermittelt wurden. Insgesamt wiesen die vorhergesagten Werte Abweichungen von den Messwerten auf. Dennoch ließen sich bei Koppelung des Allgemeinen Linearen Models mit dem Ordinary Kriging die Abweichungen beträchtlich reduzieren, so dass mit dem vorgestellten Verfahren ein verlässliches Instrument zur Regionalisierung von Zustandseigenschaften auf Waldstandorten zur Verfügung steht.

Schlagwörter: Boden, Standortserkundung, Sachsen, Regionalisierung, Wald, Geostatistik, Bodenzustandserkundung, Kalkung

Summary

Climate change and anthropogenic substance load and forest management have a lasting impact on the status of humus and nutrients in forest soils. However, forest soils can buffer or even enhance changes of environmental conditions. Therefore, site conditions and their development have to be considered for long-term forest management decisions. The project aimed at identifying practicable indicators of relevant ecological and silvicultural site conditions that can be integrated into Site Survey of forest soils. A further objective was to develop a methods proposal for the inventory of relevant site conditions. Data of organic layer and topsoil from different inventories was evaluated regarding the site-specific, spatial and temporal variance.

Site-specific information and analysis results were used from National Forest Soil Inventories (BZE) conducted on 83 sites in 1992 and in 2006. Additionally, sampling was performed in three representative natural areas of Saxony (highlands, hills and lowlands) inside specific test areas on a different sampling design. It was intended to give evidence on the relation between the issue of representing and the intensity of the inventories. The sampling and the laboratory analysis were conducted according to the harmonized guidelines of the National Forest Soil Inventory. A general linear model was adapted to the data set and was parameterized for the regionalization of the soil chemical parameters. Significant factors were identified by multiple regressions. Ordinary Kriging was used as the geo-statistical method. Input data was taken from the models as residuals of the predicted values from the measurements. Cross-validation served to review the quality of regionalization.

The results of the Forest Soil Inventory in Saxony indicated transforming site conditions. This was illustrated by the trend towards ecological favorable humus forms and therefore a reduction of humus stocks in the organic layer. As a consequence the carbon and nitrogen stocks decreased in the organic layer whereas in the mineral topsoil carbon stocks often increased and nitrogen stocks decreased. The amount of nutrient cations is low in most soils in Saxony. The soils are generally characterized by a low base saturation and a high acidification. Often soils showed an increasing loss of base cations in combination with decreasing pH-values especially in “Dübener-Niederlausitzer-Altmoränenland” and in parts of the “Elbsandsteingebirge” and “Vogtland”. Soils in the highlands showed on the other hand an increase in base saturation and pH-value due to liming.

The changeable site conditions were put into relation to the permanent site conditions of the test areas in order to assess the deviation between both properties. The permanent site conditions are reflected in the site form. The changeable site conditions however have been significantly influenced by natural and anthropogenic environmental impact which leads in most cases to a gap between present conditions and potential. The humus form is one major element that shapes the topsoil properties. Anthropogenic substance loads however changed the composition of litter so that humus forms that currently harmonize with regular forms of Site Survey of forest soils were hardly encountered. Nitrogen input likely contributed to narrowing of the C/N-ratios in the hills and the lowlands. On the other hand, the decreasing C/N-ratios in the highlands were caused by liming. The

results showed that with respect to the dynamics of environmental changes the framework data of the humus forms needs to be reviewed in Site Survey of forest soil. Moreover, the measured differences between the morphologic humus forms seemed to be partly insignificant. A relevant influence of the water budged could not be proven. It is more likely that the studied parameters showed a regional context. For an overall assessment of the changeable site conditions the humus form seems to offer the best compromise between the efforts in taking and analyze samples and the gain in knowledge. The results and a literature research have shown that vitality and growth of forests are dominantly influenced by the stock of base cations, base saturation, carbon stock, C/N-ratio, and pH-value. Furthermore it is recommended to separate the data set into limed and non-limed sites to obtain statistically valid results.

The geo-statistical analysis showed that the C/N-values corresponded better to the predicted values in the lowlands than in the hills and highlands. Moreover, values in the Oh horizon were more predictable than in the mineral soil. The prediction of the total carbon stocks revealed reasonable results but tended towards an underestimation in the lowlands. The stocks of base cations were well predicted in the highlands but were overestimated in the lowlands. The influence of the predictors on the base saturation was low. The results have shown very low base saturations that were on some parts considerably lower than the predicted values. The pH-values in the Oh horizon were affected exclusively by liming. Thus for the highlands the predicted values were higher than for the other test areas. In the highlands the prediction of the pH-values in the Oh horizon was partly very high while the lowest pH-values were detected in the mineral soil. Altogether there was a variation between the predicted and the measured values. However, the variation was reduced considerably by combining the General Linear Model with Ordinary Kriging. Thus the presented method provides a reliable instrument for the regionalization of forest site conditions.

Keywords: Soils, site survey, Saxony, regionalisation, forest, geo-statistics, national soil inventory, liming

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung 1

2 Material und Methoden 2

2.1 Untersuchungsstandorte des forstlichen Monitorings 2
2.1.1 Morphologische Humusformen des BZE II-Kollektivs 3
2.1.2 Bodentypen der BZE II 3
2.1.3 Substrattypen 4
2.1.4 Bestockungstyp 5
2.1.5 Kalkung 6

2.2 Probenahme der BZE in Sachsen 6

2.3 Analytik 6

2.4 Kartenerstellung 8

2.5 Datengrundlage und -bearbeitung 8

2.6 Auswahl der Testgebiete 9
2.6.1 Beschreibung der Testgebiete 9
2.6.2 Mittelgebirge 10
2.6.3 Hügelland 12
2.6.4 Tiefland 14

2.7 Statistische Methoden 17
2.7.1 Berechnung der Perzentile zur Bewertung 17
2.7.2 Mittelwertvergleiche 17
2.7.3 Boxplots 18
2.7.4 Clusteranalyse 19
2.7.5 Diskriminanzanalyse 20
2.7.6 Berechnung der kleinsten messbaren Unterschiede 21
2.7.7 Variogrammanalyse und Kriging-Interpolation 21
2.7.8 Durchführung der Regionalisierung 24

2.8 Punktauswahl 26
2.8.1 Mittelgebirge 26
2.8.2 Hügelland 27
2.8.3 Tiefland 27

2.9 Geländearbeiten 28
2.9.1 Plot-Design 28
2.9.2 Erfassung der Aufnahmesituation 28
2.9.3 Profilbeschreibung 29
2.9.4 Probeentnahme 29
2.9.5 Transektkartierung von Humusformen 30

3 Zustand und Veränderungen 31

3.1 Ausprägung und Veränderung der organischen Auflage 31
3.1.1 Morphologische Humusformen und ihre Eigenschaften 31
3.1.2 Horizontmächtigkeit der organischen Auflage 33
3.1.3 Fazit zur Ausprägung und Veränderung der organsichen Auflage 34

3.2 Kohlenstoff 34
3.2.1 Kohlenstoffstatus und dessen Veränderung 34
3.2.2 Bewertung der Kohlenstoffvorräte 37
3.2.3 Fazit zum Kohlenstoffstatus 38

3.3 Stickstoff 39
3.3.1 Bewertung der Stickstoffvorräte 42
3.3.2 Fazit zum Stickstoffstatus 42

3.4 C/N-Verhältnisse 43
3.4.1 Status der C/N-Verhältnisse und dessen Veränderung 43
3.4.2 Bewertung der C/N-Verhältnisse 45
3.4.3 Fazit zu den C/N-Verhältnissen 46

3.5 Nährstoffstatus 47
3.5.1 Calciumstatus und dessen Veränderung 47
3.5.2 Bewertung der Calciumvorräte 49
3.5.3 Kaliumstatus und dessen Veränderung 51
3.5.4 Bewertung der Kaliumvorräte 53
3.5.5 Magnesiumstatus und dessen Veränderung 54
3.5.6 Bewertung der Magnesiumvorräte 56
3.5.7 Phosphorstatus der organischen Auflage 57
3.5.8 Bewertung der Phosphorvorräte 58
3.5.9 Fazit zum Nährstoffstatus 59

3.6 Säure-Basen-Status 60
3.6.1 Bodenreaktion und dessen Veränderung 60
3.6.2 Bewertung der Bodenreaktion 63
3.6.3 Bewertung der Pufferreaktionen 64
3.6.4 Fazit zur Bodenreaktion und Pufferbereichen 67
3.6.5 Kationenaustauschkapazität und Basensättigung 68
3.6.6 Bewertung der Standorte hinsichtlich der effektiver Austauschkapazität und Basensättigung 70
3.6.7 Fazit zur Kationenaustauschkapazität und Basensättigung 70

4 Beziehung zwischen forstlichen Standorteigenschaften, Bestandesstruktur und Kalkung 71

4.1 Einfluss der Bodenform auf die Eigenschaften der Auflagemächtigkeit 71
4.1.1 Humusauflage und Feinbodenvorrat 72
4.1.2 Kohlenstoffkonzentration 74
4.1.3 Kohlenstoffvorrat 74
4.1.4 Stickstoffkonzentration 76
4.1.5 Stickstoffvorrat 78

4.1.6 C/N-Verhältnis 80
4.1.7 pH-Wert 82
4.1.8 Effektive Austauschkapazität und Basensättigung 85
4.1.9 Calciumkonzentration 87
4.1.10 Calciumvorrat 89
4.1.11 Magnesiumkonzentration 91
4.1.12 Magnesiumvorrat 93
4.1.13 Kaliumkonzentration 93
4.1.14 Kaliumvorrat 94
4.1.15 Phosphorkonzentration 97
4.1.16 Phosphorvorrat 97
4.1.17 Fazit zum Einfluss der Bodenform auf die Auflagemächtigkeit 99

4.2 Einfluss der Kalkung auf das Gesamtkollektiv 100
4.2.1 Auflagemächtigkeit und Humusvorräte 100
4.2.2 Kohlenstoffkonzentration 101
4.2.3 Kohlenstoffvorrat 102
4.2.4 Stickstoffkonzentration 103
4.2.5 Stickstoffvorrat 104
4.2.6 C/N-Verhältnis 105
4.2.7 pH-Wert 106
4.2.8 Basensättigung 107
4.2.9 Calciumkonzentration 108
4.2.10 Calciumvorrat 109
4.2.11 Magnesiumkonzentration 110
4.2.12 Magnesiumvorrat 110
4.2.13 Kaliumkonzentration 111
4.2.14 Kaliumvorrat 112
4.2.15 Phosphorkonzentration 112
4.2.16 Phosphorvorrat 113
4.2.17 Fazit zum Einfluss der Kalkung auf das Gesamtkollektiv 114

4.3 Einfluss der Kalkung stratifiziert nach Bodenformen 115

4.4 Einfluss der Bestockungsform auf die Bodenchemie 115
4.4.1 Auflagemächtigkeit und Humusvorrat der organischen Auflage 115
4.4.2 Kohlenstoffkonzentration 116
4.4.3 Kohlenstoffvorrat 118
4.4.4 Stickstoffkonzentration 120
4.4.5 Stickstoffvorrat 122
4.4.6 C/N-Verhältnis 124
4.4.7 pH-Wert 126
4.4.8 Austauschkapazität und Basensättigung 128
4.4.9 Calciumkonzentration 130
4.4.10 Calciumvorrat 130
4.4.11 Magnesiumkonzentration 133
4.4.12 Magnesiumvorrat 133
4.4.13 Kaliumkonzentration 136
4.4.14 Kaliumvorrat 136
4.4.15 Phosphorkonzentration 139

4.4.16 Phosphorvorrat 139
4.4.17 Fazit zum Einfluss der Bestockungsform auf die Bodenchemie 141

5 Bewertung der Zustandseigenschaften der Standorte in den Testgebieten 143

5.1 Vergleich der Zustandseigenschaften mit den Stammeigenschaften 143
5.1.1 Basensättigung 144
5.1.2 pH(KCl)-Wert 147
5.1.3 C/N-Verhältnis 150
5.1.4 Schlussfolgerung 153

5.2 Klassifikation der Testgebiete in Bezug auf die Zustandseigenschaften 154

6 Methodenentwicklung zur Erfassung von Zustandseigenschaften auf Waldstandorten 159

6.1 Identifizierung relevanter Zustandsparameter 159

6.2 Validierung der Zustandsparameter für die Testgebiete 166

6.3 Vitalitäts- und wachstumsstimulierende Parameter 171
6.3.1 Nährstoffversorgung und Bodenversauerung 171
6.3.2 Organische Bodensubstanz 174
6.3.3 Fazit zu Vitalitäts- und wachstumsstimmulierenden Parametern 175

6.4 Klassifikation des Gesamtkollektivs in Bezug auf die Zustandseigenschaften 176

6.5 Validierung ausgewählter Zustandsparameter für das Gesamtkollektiv 179

6.6 Erforderliche Anzahl von Probenahmen zur Erfassung von Zustandseigenschaften 183

6.7 Schlussfolgerung 185

7 Regionalisierung von Zustandseigenschaften auf Waldstandorten 187

7.1 Überprüfung der Homogenität des BZE II-Datensatzes mit dem Testgebietsdatensatz 187

7.2 Anpassung von Regressionsmodellen 190

7.3 Geostatistische Modellierung 194

7.4 Vergleich der Regionalisierungsansätze 197

7.5 Regionalisierung ausgewählter Messgrößen 204

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Lage der Untersuchungsstandorte in Sachsen. 2

Abb. 2: Verteilung der aktuellen Humusformen am Gesamtkollektiv der BZE II. 3

Abb. 3: Verteilung der Bodentypen am Gesamtkollektiv. 3

Abb. 4: Verteilung der Substrattypen am Gesamtkollektiv der BZE II. 4

Abb. 5: Verteilung der Bestockungstypen am Gesamtkollektiv (BZE II). 5

Abb. 6: Übersichtskarte mit den Inventurpunkten in den jeweiligen Testgebieten (GE, Mittelgebirge; HL, Hügelland; TL, Tiefland). 9

Abb. 7: Übersicht über die Verteilung der Inventurpunkte im Testgebiet Mittelgebirge. 10

Abb. 8: Übersicht über die Verteilung der Inventurpunkte im Testgebiet Hügelland. 13

Abb. 9: Übersicht über die Verteilung der Inventurpunkte im Testgebiet Tiefland. 15

Abb. 10: Kumulierte Häufigkeit (y-Achse) des Kohlenstoffgehalts (x-Achse) im Oh-Horizont der Auflage. Die horizontalen Linien geben die in dieser Arbeit berücksichtigten Perzentile (10, 33, 66, 90) sowie den Median wieder (50). Anhand der Schnittpunkte der Perzentillinien lässt sich der dazu gehörige Werte für den Kohlenstoffgehalt ablesen. 17

Abb. 11: Darstellung des Aufbaus eines Box-Whisker-Plots. 19

Abb. 12: Geometrische Darstellung einer Trennfunktion Y = f(X1,X2). 20

Abb. 13: Variogrammfunktion und ihre Parameter. 23

Abb. 14: Variogramm-Modelle. 23

Abb. 15: Darstellung eines Nmin-Bohrers. 30

Abb. 16: Veränderung C/N-Verhältnisse stratifiziert nach Humusformen im Vergleich BZE I und BZE II. 32

Abb. 17: Gesamtvorräte von Kohlenstoff in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl). 36

Abb. 18: Tiefenprofil der Kohlenstoffvorräte im Mineralboden dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Tiefe (n = Stichprobenanzahl). 37

Abb. 19: Gesamtvorräte von Stickstoff in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl). 40

Abb. 20: Tiefenprofil der Stickstoffvorräte im Mineralboden dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Tiefe (n = Stichprobenanzahl). 41

Abb. 21: C/N-Verhältnisse in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl). 44

Abb. 22: Tiefenprofil der C/N-Verhältnisse im Mineralboden dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Tiefe (n = Stichprobenanzahl). 45

Abb. 23: Gesamtvorräte von Calcium in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und Vorräte an austauschbarem Calcium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 800 kg ha^{-1}. 48

Abb. 24: Tiefenprofil der austauschbaren Calciumvorräte im Mineralboden dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Tiefe (n = Stichprobenanzahl) vom a) Gersamtdatensatz und b) gekappt bei 450 kg ha^{-1}. 49

Abb. 25: Gesamtvorräte von Kalium in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und Vorräte an austauschbarem Kalium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 300 kg ha^{-1}. 51

Abb. 26: Tiefenprofil der austauschbaren Kaliumvorräte im Mineralboden dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Tiefe (n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 150 kg ha^{-1}. 53

Abb. 27: Gesamtvorräte von Magnesium in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und Vorräte an austauschbarem Magnesium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 300 kg ha^{-1}. 55

Abb. 28: Tiefenprofil der austauschbaren Magnesiumvorräte im Mineralboden dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Tiefe (n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 100 kg ha^{-1}. 56

Abb. 29: Gesamtvorräte von Phosphor in der organischen Auflage (L+Of und Oh; n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 60 kg ha^{-1}. 58

Abb. 30: Vergleich der pH(H_2O)-Werte zwischen BZE I und BZE II für die organische Auflage (L+Of-Horizont, Oh-Horizont) sowie für die verschiedenen Tiefenstufen (0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm) des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl). 61

Abb. 31: Vergleich der pH(KCl)-Werte zwischen BZE I und BZE II für die organische Auflage (L+Of-Horizont, Oh-Horizont) sowie für die verschiedenen Tiefenstufen (0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm) des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl). 62

Abb. 32: Räumliche Verteilung der Pufferbereiche zur BZE I gemessen in wässriger Lösung. 65

Abb. 33: Räumliche Verteilung der Pufferbereiche zur BZE II gemessen in wässriger Lösung. 65

Abb. 34: Räumliche Verteilung der Pufferbereiche zur BZE I gemessen in einer Salzlösung. 66

Abb. 35: Räumliche Verteilung der Pufferbereiche zur BZE II gemessen in einer Salzlösung. 67

Abb. 36: Tiefenprofil der effektiven Kationenaustauschkapazität ohne Natrium dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Mineralbodentiefe (n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 250 µmol g^{-1}. 69

Abb. 37: Tiefenprofil der Basensättigung ohne Natrium dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Mineralbodentiefe (n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 60 %. 69

Abb. 38: Humusvorrat der Auflage (links) und Feinbodenvorrat des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm) (rechts) gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. 73

Abb. 39: Kohlenstoffkonzentration gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. 75

Abb. 40: Stickstoffkonzentration gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. 77

Abb. 41: Stickstoffvorrat gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. 79

Abb. 42: C/N-Verhältnis gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. 81

Abb. 43: pH(KCl)-Wert gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. 84

Abb. 44: Austauschkapazität (links) und Basensättigung ohne Natrium (rechts) im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm) gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, mit 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. 86

Abb. 45: Calciumkonzentration gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite extrahierbares Calcium der Auflage, rechte Seite austauschbares Calcium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. 88

Abb. 46: Calciumvorrat gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite extrahierbares Calcium der Auflage, rechte Seite austauschbares Calcium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. 90

Abb. 47: Magnesiumkonzentration gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite extrahierbares Magnesium der Auflage, rechte Seite austauschbares Magnesium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. 92

Abb. 48: Kaliumkonzentration gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite extrahierbares Kalium der Auflage, rechte Seite austauschbares Kalium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. 95

Abb. 49: Kaliumvorrat gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite extrahierbares Kalium der Auflage, rechte Seite austauschbares Kalium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. 96

Abb. 50: Phosphorkonzentration (links) und -vorrat (rechts) der Auflage gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. 98

Abb. 51: Entwicklung des Humusvorrates zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte, mit Auflage = gesamte Auflage. 101

Abb. 52: Entwicklung des Kohlenstoffkonzentration zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte in der Auflage und im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage. 102

Abb. 53: Entwicklung der Stickstoffkonzentration zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte in der Auflage und im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage. 104

Abb. 54: Entwicklung des C/N-Verhältnisses zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte in der Auflage und im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage. 105

Abb. 55: Entwicklung des pH(KCl)-Wertes zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte in der Auflage und im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage. 107

Abb. 56: Entwicklung der Basensättigung ohne Natrium zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm). 108

Abb. 57. Entwicklung des Calciumkonzentration zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte in der Auflage und im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage. 109

Abb. 58: Entwicklung des Magnesiumkonzentration zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte in der Auflage und im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage. 111

Abb. 59: Entwicklung des Kaliumkonzentration zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte in der Auflage und im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage. 112

Abb. 60: Entwicklung der Phosphorkonzentration (links) und des Phosphorvorrats (rechts) zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte, mit Auflage = gesamte Auflage. 113

Abb. 61: Kohlenstoffkonzentration gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände. 117

Abb. 62: Kohlenstoffvorräte gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände. 119

Abb. 63: Stickstoffkonzentration gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände. 121

Abb. 64: Stickstoffvorräte gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände. 123

Abb. 65: C/N-Verhältnis gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände. 125

Abb. 66: pH(KCl)-Wert gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände. 127

Abb. 67: Austauschkapazität (links) und Basensättigung ohne Natrium (rechts) des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm) gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder. 129

Abb. 68: Calciumkonzentration gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite extrahierbares Calcium der Auflage, rechte Seite austauschbares Calcium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelmischbestände, 7 = nadelholzreiche Laubmischbestände, 8 = sonstige Laubbaumbestände. 131

Abb. 69: Calciumvorräte gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite extrahierbares Calcium der Auflage, rechte Seite austauschbares Calcium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände. 132

Abb. 70: Magnesiumkonzentration gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite extrahierbares Magnesium der Auflage, rechte Seite austauschbares Magnesium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelmischbestände, 7 = nadelholzreiche Laubmischbestände, 8 = sonstige Laubbaumbestände. 134

Abb. 71: Magnesiumvorräte gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite extrahierbares Magnesium der Auflage, rechte Seite austauschbares Magnesium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände. 135

Abb. 72: Kaliumkonzentration gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite extrahierbares Kalium der Auflage, rechte Seite austauschbares Kalium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelmischbestände, 7 = nadelholzreiche Laubmischbestände, 8 = sonstige Laubbaumbestände. 137

Abb. 73: Kaliumvorräte gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite extrahierbares Kalium der Auflage, rechte Seite austauschbares Kalium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände. 138

Abb. 74: Extrahierbarer Phosphor gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, Phosphorkonzentration der Auflage (links) und Phosphorvorräte der Auflage (rechts), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände. 140

Abb. 75: Basensättigung in der organischen Auflage und im Mineralboden der Testgebiete in Abhängigkeit von den kartierten morphologischen Humusformen. 145

Abb. 76: Basensättigung der organischen Auflage und des Mineralbodens für verschiedene Standortsformen in den Testgebieten. 146

Abb. 77: Humusformen nach Kennwerten zum pH(KCl) nach SEA 95 im Vergleich mit den morphologisch ausgeprägten Humusformen, dargestellt für die organische Auflage und den Mineralboden. Abk.: ROT, typischer Rohhumus; MOR, rohhumusartiger Moder; MOT, typischer Moder; MOM, mullartiger Moder; MUT, typischer Mull. 148

Abb. 78: pH(KCl)-Wert der organischen Auflage und des Mineralbodens für verschiedene Standortsformen der Testgebiete mit Bezug zu den nach der SEA95 abgeleiteten Kennwerten. Abk.: ROT, typischer Rohhumus; MOR, rohhumusartiger Moder; MOT, typischer Moder; MOM, mullartiger Moder; MUT, typischer Mull. 149

Abb. 79: Humusformen nach SEA95-Kennwerten zum C/N-Verhältniss im Vergleich mit den morphologisch ausgeprägten Humusformen, dargestellt für die organische Auflage und den Mineralboden. Abk.: ROT, typischer Rohhumus; MOR, rohhumusartiger Moder; MOT, typischer Moder; MOM, mullartiger Moder; MUT, typischer Mull. 151

Abb. 80: C/N-Verhältnis der organischen Auflage und des Mineralbodens für verschiedene Standortsformen der Testgebiete mit Bezug zu den nach der SEA95 abgeleiteten Kennwerten. Abk.: ROT, typischer Rohhumus; MOR, rohhumusartiger Moder; MOT, typischer Moder; MOM, mullartiger Moder; MUT, typischer Mull. 152

Abb. 81: Beziehung zwischen pH(KCl) und C/N-Verhältnis im Oh-Horizont und im Mineralboden in den Testgebieten (Kurve der Rahmenwerte für den Oh-Horizont nach Schulze und Kopp (1995) für harmonische Humusformen). 154

Abb. 82: Dendrogramm basierend auf der Methode „average linkage“ mit Standortsformen aller drei Testgebiete für den Oh-Horizont. Parameter: Kohlenstoff-, Stickstoff-, Calcium-, Magnesium-, Kalium-, Aluminium-, Mangan-, Eisengehalte, Durchwurzelungsintensität, Horizontmächtigkeit, Neigung, Humusmenge, C/N-Verhältnis, effektive Austauschkapazität, Basensättigung, pH(KCl). 156

Abb. 83: Dendrogramm basierend auf der Methode „average linkage“ mit Standortsformen aller drei Testgebiete für die oberen 5 cm des Mineralbodens. Parameter: Kohlenstoff-, Stickstoff-, Calcium-, Magnesium-, Kalium-, Aluminium-, Mangan-, Eisengehalte, Neigung, Trockenrohdichte, Feinbodenmenge, C/N-Verhältnis, effektive Austauschkapazität, Basensättigung, pH(KCl). 157

Abb. 84: Dendrogramm basierend auf der Methode „average linkage“ mit Standortsformen aller drei Testgebiete für die oberen 30 cm des Mineralbodens. Parameter: Kohlenstoff-, Stickstoff-, Calcium-, Magnesium-, Kalium-, Aluminium-, Mangan-, Eisengehalte, Neigung, Trockenrohdichte, Feinbodenmenge, C/N-Verhältnis, effektive Austauschkapazität, Basensättigung, pH(KCl). 158

Abb. 85: Verteilung der kanonischen Variablen im Oh-Horizont und Mineralboden des Berglands für die entsprechenden Auswertungseinheiten. 166

Abb. 86: Verteilung der kanonischen Variablen im Oh-Horizont des Berglands für Standortsformengruppe, Lokalbodenform und Bestandestyp. 167

Abb. 87: Verteilung der kanonischen Variablen im Mineralboden des Berglands für Standortsformengruppe, Lokalbodenform und Bestandestyp. 167

Abb. 88: Verteilung der kanonischen Variablen im Oh-Horizont und Mineralboden des Hügellands für die entsprechenden Auswertungseinheiten. 168

Abb. 89: Verteilung der kanonischen Variablen im Oh-Horizont des Hügellands für Standortsformengruppe, Lokalbodenform und Bestandestyp. 168

Abb. 90: Verteilung der kanonischen Variablen im Mineralboden des Hügellands für Standortsformengruppe, Lokalbodenform und Bestandestyp. 169

Abb. 91: Verteilung der kanonischen Variablen im Oh-Horizont und Mineralboden des Tieflands für die entsprechenden Auswertungseinheiten. 170

Abb. 92: Verteilung der kanonischen Variablen im Oh-Horizont und Mineralboden des Tieflands für die Standortsformengruppe. 170

Abb. 93: Dendrogramm basierend auf average linkage sowohl mit den Punten aus den Testgebieten als auch der BZE auschließlich für den Oh-Horizont (schwarz, BZE-Standorte; grün, Bergland; rot, Hügelland; blau, Tiefland). Parameter: C/N-Verhältnis, effektive Austauschkapazität, verfügbarer Basenvorräte, Kohlenstoffvorrat, pH(KCl). 177

Abb. 94: Dendrogramm basierend auf average linkage sowohl mit den Punten aus den Testgebieten als auch der BZE für die oberen 30 cm des Mineralbodesns einschließlich des Oh-Horizonts (schwarz, BZE-Standorte; grün, Bergland; rot, Hügelland; blau, Tiefland). Parameter: C/N-Verhältnis, effektive Austauschkapazität, verfügbarer Basenvorräte, Kohlenstoffvorrat, pH(KCl). 178

Abb. 95: Verteilung der kanonischen Variablen für das Gesamtkollektiv getrennt nach ungekalkten und gekalkten Standorten. 180

Abb. 96: Verteilung der kanonischen Variablen für das Gesamtkollektiv getrennt nach ungekalkt (links) und gekalkt (rechts) für die Bodenformengruppen. Abk.: 1 = Braunstaugleye auf Lösslehm; 2 = Staugleye auf Lösslehm und über Lehm; 3 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis; 4 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit; 5 = Braunpodsole auf Grundgestein; 6 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer; 7 = Gesteins- u. Lösslehmhumusstaugleye; 8 = pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft; 9 = pleist. Sandformen armer Nährkraft; 10 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. 181

Abb. 97: Verteilung der kanonischen Variablen für das Gesamtkollektiv getrennt nach ungekalkte und gekalkte Standorte für den Bestand. Abk. (Legende Bofo): 1 = Braunstaugleye auf Lösslehm; 2 = Staugleye auf Lösslehm und über Lehm; 3 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis; 4 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit; 5 = Braunpodsole auf Grundgestein; 6 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer; 7 = Gesteins- u. Lösslehmhumusstaugleye; 8 = pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft; 9 = pleist. Sandformen armer Nährkraft; 10 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. Abk. (Legende Bestand): 1 = Fichtenbestand (> 70 % Fichte); 2 = Kiefernbestand (> 70 % Kiefer); 3 = sonstige Nadelbaumarten (> 70 % sonstiges Nadelholz); 4 = Buchenbestand (> 70 % Buche); 5 = Eichenbestand (> 70 % Eiche); 6 = laubholzreiche Nadelmischbestände (> 30 % Laubholz); 7 = nadelholzreiche Laubholzmischbestände (> 30 % Nadelholz); 8 = sonstige Laubbaumarten (≥ 70 % sonstiges Laubholz). 182

Abb. 98: Relative minimale detektierbare Unterschiede (MDD_{rel}) für das C/N-Verhältnis und die effektive Austauschkapazität (AK_e) in den verschiedenen Auswertungseinheiten im Bergland. 183

Abb. 99: Relative minimale detektierbare Unterschiede (MDD_{rel}) für die effektive Austauschkapazität (AK_e) und die Aluminiumkonzentration in den verschiedenen Auswertungseinheiten im Hügelland. 184

Abb. 100: Relative minimale detektierbare Unterschiede (MDD_{rel}) für das C/N-Verhältnis und die Stickstoffkonzentration in den verschiedenen Auswertungseinheiten im Tiefland. 185

Abb. 101: Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse des vereinigten und transponierten Testgebiets- und BZE II-Datensatzes. Links der „Scree-plot“ mit den der Größe nach sortierten Eigenwerten der extrahierten Hauptkomponenten und rechts der Anteil der Hauptkomponenten an der erklärten Varianz. 187

Abb. 102: Dendrogramm aus der Clusteranalyse der Hauptkomponenten (Eigenwert > 1) des transponierten Gesamtdatensatzes. Die Probepunkte der Testgebiete haben als vierte Ziffer eine 4, sonst eine = 0, mit Bofo = Bodenformengruppe, Best = Bestandestyp, Kalk = Kalkung. Weisse Buchstabencodes zeigen die Lokalbodenformen an. 189

Abb. 103: Häufigkeitsverteilung der Punktepaare in den Abstandsklassen („Lag Class“) für die drei Testgebiete, mit a) Gebirge, b) Hügelland und c) Tiefland. Die Abstandsklassen (Lag Classes) repräsentieren unterschiedliche Distanzen zwischen den Punkten in den Testgebieten. 195

Abb. 104: Variogramme für die Residuen der Kohlenstoffkonzentration des Oh-Horizonts (linke Seite) und des pH-Wertes des Oh-Horizonts (rechte Seite) in den verschiedenen Testgebieten, obere Reihe Gebirge, mittlere Reihe Hügelland, untere Reihe Tiefland. Zu beachten sind Unterschiede in der Skalierung der y-Achsen. 196

Abb. 105: Vorhersage des C/N-Verhältnisses (0-10 cm) mit pls-Regression im Testgebiet Gebirge (Ausschnitt, ○ = Beprobungspunkte). 201

Abb. 106: Vorhersage des C/N-Verhältnisses (0-10 cm) mit dem linearen Modell (LM) im Testgebiet Gebirge (Ausschnitt, ○ = Beprobungspunkte). 201

Abb. 107: Vorhersage des C/N-Verhältnisses (0-10 cm) mit pls-Regression und Kriging der Residuen im Testgebiet Gebirge (Ausschnitt, ○ = Beprobungspunkte). 202

Abb. 108: Vorhersage des C/N-Verhältnisses (0-10 cm) mit dem linearen Modell (LM) und Kriging der Residuen im Testgebiet Gebirge (Ausschnitt, ○ = Beprobungspunkte). 202

Abb. 109: Vorhersage des C/N-Verhältnisses (0-10 cm) per Kriging-Verfahren im Testgebiet Gebirge (Ausschnitt, ○ = Beprobungspunkte). 203

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Erläuterung zu den Substrattypen der BZE I. 4

Tab. 2: Erläuterung der Bestockungstypen. 6

Tab. 3: Übersicht über die Parameter in den verschiedenen Erhebungsprogrammen BZE und Level II (DBF). 7

Tab. 4: Flächenanteile (ha) der Lokalbodenformen (LBF) für die entsprechenden Wasserhaushaltsformen im Mittelgebirgs-Testgebiet. 11

Tab. 5: Flächenanteile (ha) der Lokalbodenformen (LBF) für die entsprechenden Wasserhaushaltsformen im Hügellands-Testgebiet. 14

Tab. 6: Flächenanteile (ha) der Lokalbodenformen (LBF) für die entsprechenden Wasserhaushaltsformen im Tieflands-Testgebiet. 16

Tab. 7: Verteilung der Baumarten und deren Alter und Mischung im Oberstand in den einzelnen Lokalbodenformen inkl. Wasserhaushaltsform und Standortsformengruppe für die ausgewählten Standorte im Mittelgebirge. 26

Tab. 8: Verteilung der Baumarten und deren Alter und Mischung im Oberstand in den einzelnen Lokalbodenformen inkl. Wasserhaushaltsform und Standortsformengruppe für die ausgewählten Standorte im Hügelland. 27

Tab. 9: Verteilung der Baumarten und deren Alter und Mischung im Oberstand in den einzelnen Lokalbodenformen inkl. Wasserhaushaltsform und Standortsformengruppe für die ausgewählten Standorte im Tiefland. 28

Tab. 10: Veränderung der Humusformen (nur: Mull, Moder, Rohhumus) zwischen BZE I und BZE II. 31

Tab. 11: Veränderung der Humusform von der BZE I zur BZE II. 32

Tab. 12: Statistische Kennwerte der Auflagemächtigkeit (cm) der BZE I für die verschiedenen Auflagehorizonte. 33

Tab. 13: Statistische Kennwerte der Auflagemächtigkeit (cm) der BZE II für die verschiedenen Auflagehorizonte. 33

Tab. 14: Statistische Kennwerte der Kohlenstoffgehalte (g kg^{-1}) der BZE I für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens. 35

Tab. 15: Statistische Kennwerte der Kohlenstoffgehalte (g kg^{-1}) der BZE II für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens. 35

Tab. 16: Statistische Kennwerte der BZE I-Kohlenstoffvorräte (t ha^{-1}) für die organische Auflage und den Mineralboden bis in eine Tiefe von 30 cm. 36

Tab. 17: Statistische Kennwerte der BZE II-Kohlenstoffvorräte (t ha^{-1}) für die organische Auflage und den Mineralboden bis in eine Tiefe von 30 cm. 36

Tab. 18: Statistische Kennwerte der Stickstoffgehalte (g kg^{-1}) der BZE I für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens. 40

Tab. 19: Statistische Kennwerte der Stickstoffgehalte (g kg^{-1}) der BZE II für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens. 40

Tab. 20: Statistische Kennwerte der Stickstoffvorräte (t ha^{-1}) der BZE I für die organische Auflage und für den Mineralboden bis in eine Tiefe von 30 cm. 41

Tab. 21: Statistische Kennwerte der Stickstoffvorräte (t ha^{-1}) der BZE II für die organische Auflage und für den Mineralboden bis in eine Tiefe von 30 cm. 41

Tab. 22: Statistische Kennwerte der C/N-Verhältnisse der BZE I für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens. 44

Tab. 23: Statistische Kennwerte der C/N-Verhältnisse der BZE II für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens. 44

Tab. 24: Statistische Kennwerte der Gesamtvorräte von Calcium (kg ha^{-1}) in der organischen Auflage und der Vorräte an austauschbarem Calcium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE I. 47

Tab. 25: Statistische Kennwerte der Gesamtvorräte von Calcium (kg ha^{-1}) in der organischen Auflage und der Vorräte an austauschbarem Calcium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE II. 47

Tab. 26: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Calcium (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und der Gehalten an austauschbarem Calcium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE I. 48

Tab. 27: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Calcium (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und der Gehalten an austauschbarem Calcium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE II. 49

Tab. 28: Statistische Kennwerte der Gesamtvorräte von Kalium (kg ha^{-1}) in der organischen Auflage und der Vorräte an austauschbarem Kalium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE I. 51

Tab. 29: Statistische Kennwerte der Gesamtvorräte von Kalium (kg ha^{-1}) in der organischen Auflage und der Vorräte an austauschbarem Kalium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE II. 51

Tab. 30: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Kalium (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und der Gehalten an austauschbarem Kalium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE I. 52

Tab. 31: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Kalium (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und der Gehalten an austauschbarem Kalium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE II. 52

Tab. 32: Statistische Kennwerte der Gesamtvorräte von Magnesium (kg ha^{-1}) in der organischen Auflage und der Vorräte an austauschbarem Magnesium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE I. 54

Tab. 33: Statistische Kennwerte der Gesamtvorräte von Magnesium (kg ha^{-1}) in der organischen Auflage und der Vorräte an austauschbarem Magnesium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE II. 54

Tab. 34: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Magnesium (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und der Gehalten an austauschbarem Magnesium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE I. 55

Tab. 35: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Magnesium (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und der Gehalten an austauschbarem Magnesium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE II. 56

Tab. 36: Statistische Kennwerte der Gesamtvorräte von Phosphor (kg ha^{-1}) in der organischen Auflage für die BZE I und BZE II. 57

Tab. 37: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Phosphor (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) für die BZE I. 58

Tab. 38: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Phosphor (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) für die BZE II. 58

Tab. 39: Statistische Kennwerte der pH(H_2O) Werte der BZE I für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens. 60

Tab. 40: Statistische Kennwerte der pH(H_2O)-Werte der BZE II für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens. 61

Tab. 41: Statistische Kennwerte der pH(KCL) Werte der BZE I für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens. 62

Tab. 42: Statistische Kennwerte der pH(KCL) Werte der BZE II für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens. 62

Tab. 43: Statistische Kennwerte der effektiven Kationenaustauschkapazität (µmol g^{-1}) und der Basensättigung (%) der oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE I. 68

Tab. 44: Statistische Kennwerte der effektiven Kationenaustauschkapazität (µmol g^{-1}) und der Basensättigung (%) der oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE II. 68

Tab. 45: Zuordnung der Lokalbodenformen zu den Bodenformengruppen. 71

Tab. 46: Einteilung der Bestockung in Bestandestypen. 115

Tab. 47: Übersicht über Zustandsparameter des Berglandes mit relevantem ökologischem Aussagewert bezüglich der untersuchten Gruppen. 161

Tab. 48: Übersicht über Zustandsparameter des Hügellandes mit relevantem ökologischem Aussagewert bezüglich der untersuchten Gruppen. 163

Tab. 49: Übersicht über Zustandsparameter des Tieflandes mit relevantem ökologischem Aussagewert bezüglich der untersuchten Gruppen. 165

Tab. 50: Aggregierte Zuordnung der Lokalbodenformen zu den Bodenformengruppen. 179

Tab. 51: Ergebnisse der Anpassung linearer Modelle mit den Prädikorenvariablen BOFO = Bodenformengruppen (Tab. 45), BEST = Bestandestyp, INCL = Hangneigung, HÖHE = Höhe ü. NN, KALK = Kalkung. 191

Tab. 52: Anzahl der extrahierten Faktoren (n F.) aus der pls-Regression, erklärte Gesamtvarianz der Prädiktoren (X Var), der Zielvariable (Y Var) und Auflistung von Prädiktoren (in Klammern Prädiktorenklassen), deren Varianz sich zu ≥ 25 % vom Modell erklären lässt. 193

Tab. 53: PMAE (Mittlere prozentuale absolute Abweichung) der per Kreuzvalidierung der einzelnen Methoden vorhergesagten Werte von den dazu gehörenden Messwerten, mit pls = pls-Regression, lm = lineares Modell, krig = „gewöhnliches “ kriging, plskrig = pls-Regression + Kriging, lmkrig = lineares Modell + Kriging, CV = Variationskoeffizient, n = Anzahl der in die Kreuzvalisierung eingegangenen Werte. 199

Tab. 54: Mittlere absolute Abweichung der per Kreuzvalidierung der einzelnen Methoden vorhergesagten Werte von den dazu gehörenden Messwerten, mit Wert = Mittel der Messwerte, gesamt = Gesamtmodel, Bofo = einfaktorielles Model mit dem Prediktor Bodenformengruppe, Best = einfaktorielles Model mit dem Prediktor Bestandestyp, Kalk = einfaktorielles Model mit dem Prediktor Kalkung, Höhe = einfaktorielles Model mit dem Prediktor Höhe ü. NN. 205

1 Zielsetzung

Waldböden, insbesondere deren Humus- und Nährstoffstatus, werden durch den Klimawandel, anthropogene Stoffeinträge und Bewirtschaftungsmaßnahmen in unterschiedlicher Weise beeinflusst. In Abhängigkeit von den gegebenen physikalischen und chemischen Eigenschaften der Waldböden sind diese in unterschiedlichem Ausmaß in der Lage, die Auswirkungen des Klimawandels und weiterer anthropogener Eingriffe entweder zu puffern oder zu verstärken. Auch bisher als relativ unveränderlich angenommene Standortseigenschaften, wie z.B. die Hydromorphie, unterliegen in diesem Kontext einer Drift. Sowohl der aktuelle Status der Standortsverhältnisse als auch ihre Entwicklungstendenz müssen für langfristig angelegte forstliche Entscheidungen wie die Baumartenwahl zwingend berücksichtigt werden. Somit besteht eine hohe Dringlichkeit, aktuelle und zu erwartende Veränderungen der Eigenschaften von Waldböden in die Standortskarten zu integrieren.

Punktbezogene Informationen zum aktuellen Standortsstatus liegen für die Standorte der Bundesbodenzustandserhebung (BZE) und die Forstlichen Dauerbeobachtungsflächen (Level II-Standorte) vor. In der Dimension der Fläche der sächsischen Waldstandorte sind hierzu jedoch keine aktuellen Daten vorhanden.

Das Ziel des FuE-Vorhabens besteht deshalb darin, praxistaugliche Indikatoren für waldbaulich/ökologisch relevante Standortszustände aufzuzeigen. Hierfür sind die methodischen Grundlagen zum Informationsgewinn aus Rastererhebungen einschließlich der Erhebungsmethodik, Regionalisierung und Integration in das Verfahren der Standortserkundung zu erarbeiten. Dafür werden Humus- und Oberbodendaten aus den Monitoringerhebungen bezüglich ihrer standörtlichen, räumlichen und zeitlichen Varianz ausgewertet und auf ihre Verwendbarkeit zur Ableitung flächenrelevanter Standortsinformationen geprüft. Außerdem werden in drei Testgebieten mittels stratifizieter Stichprobeverfahren weitere Humus- und Oberbodenproben sowie humusmorphologische Daten für repräsentative Standorte und Waldstrukturen gewonnen. Anhand der Analysen und Auswertungsergebnisse war ein Methodenvorschlag zur Erfassung der relevanten Standortseigenschaften zu erarbeiten. Dabei werden Aussagen zur Repräsentanz der erzielbaren Ergebnisse in Abhängigkeit von der Intensität der Erhebungen abgeleitet. Diese werden durch eine Regionalisierung für die Testgebiete untersetzt.

2 Material und Methoden

Die Beschreibung der Standorte basiert auf ihrem aktuellen Zustand. Veränderungen gegenüber der BZE I werden im Kapitel 3 behandelt.

2.1 Untersuchungsstandorte des forstlichen Monitorings

Für die Untersuchungen wurden die Analyseergebnisse von 77 BZE- und 6 Level II-Standorten in Sachsen genutzt (Abb. 1). Die BZE-Punkte sind systematisch im 8 x 8 km Raster über die sächsische Waldfläche von ca. 510.000 ha (www.bundeswaldinventur.de) verteilt. Zur Darstellung der zeitlichen Veränderungen dienen die Aufnahmen von zwei Untersuchungszeiträumen. Die Ersterhebung der BZE auf dem 8 x 8 km Raster erfolgte 1992 (BZE I). Nach 14 Jahren wurde 2006 die Wiederholungsinventur an den gleichen Rasterpunkten durchgeführt (BZE II).

Die Standorte der permanent betriebenen Intensivmessflächen des Level II-Programms wurden in den Jahren 1995 und 2007 beprobt. Sie repräsentieren typische Waldökosysteme in Sachsen. Für die Aussagen zu zeitlichen Veränderungen wurden Ihre Analysedaten bei den nachfolgenden Auswertungen den Datenkollektiven der BZE I und BZE II zugeordnet.

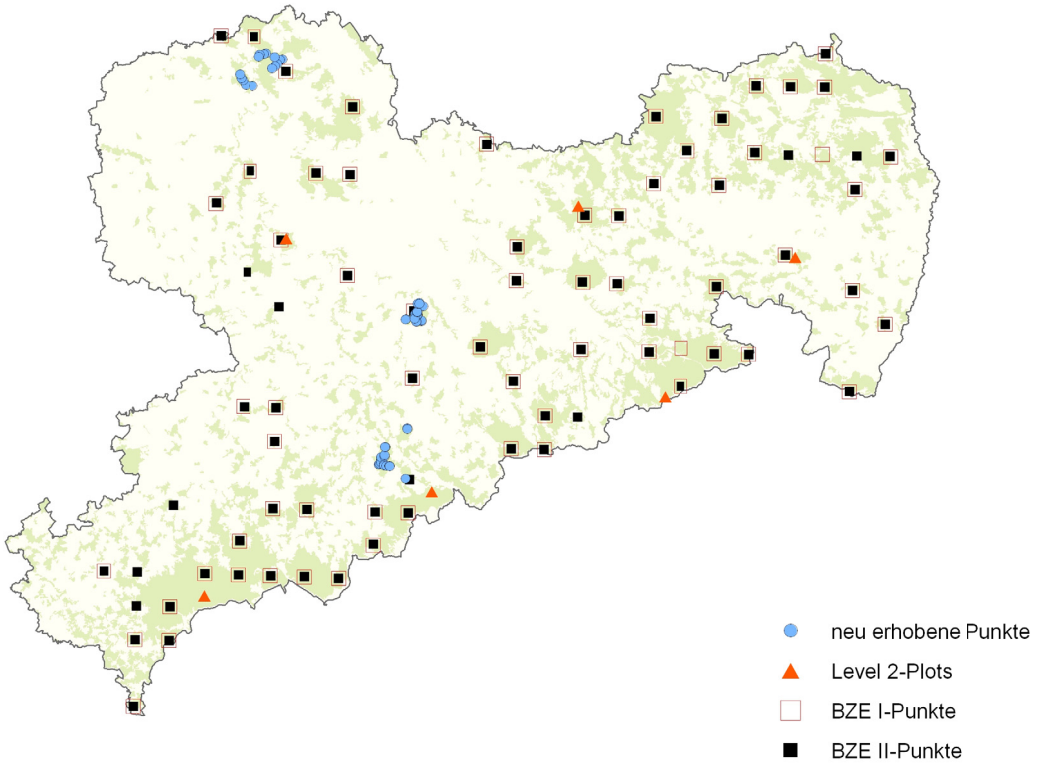

Abb. 1: Lage der Untersuchungsstandorte in Sachsen.

2.1.1 Morphologische Humusformen des BZE II-Kollektivs

Die Humusform Moder (MO) dominiert an den untersuchten BZE II-Punkten (77,6 %), gefolgt von der Humusform Rohhumus (RO) mit ca. 13 %. Die Humusform Mull (MU) hat einen Anteil von ca. 8 %. Feuchtmoder (FMO) wurde an einem Standort kartiert (Abb. 2).

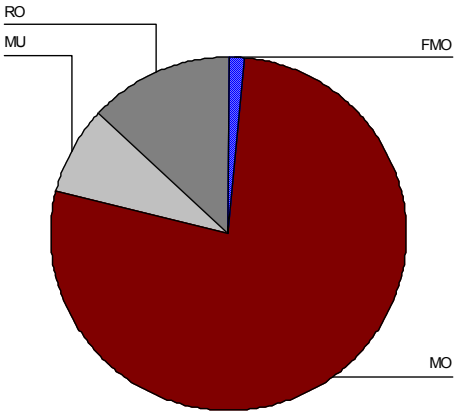

Abb. 2: Verteilung der aktuellen Humusformen am Gesamtkollektiv der BZE II.

2.1.2 Bodentypen der BZE II

In der untersuchten Stichprobe in Sachsen überwiegt die Braunerde als Bodentyp unter Wald mit 59 %, gefolgt von dem Bodentyp Pseudogley mit 16 %. Etwa 10 % entfallen auf den Typ Podsol. Gleye besitzen einen Anteil ca. 4 %. Es gibt zudem einen Tiefumbruchboden und einen Skeletthumusboden. Aufgrund des hohen Anteils an Braunerden ist das Merkmal Bodentyp als Stratifizierungsmerkmal wenig geeignet (Abb. 3).

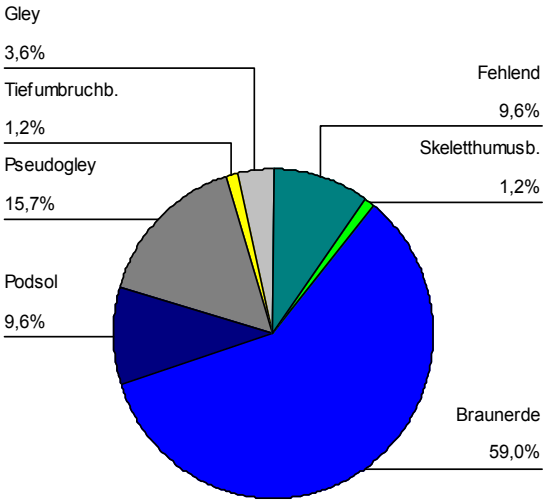

Abb. 3: Verteilung der Bodentypen am Gesamtkollektiv.

2.1.3 Substrattypen

Zur Stratifizierung der Standorte wurde auch die Substrattypengliederung der BZE I-Methodik verwendet (Wolff und Riek 1996). Innerhalb der insgesamt 10 möglichen Substratgruppen können die sächsischen BZE-Punkte 6 Gruppen zugeordnet werden (Tab. 1). Die Gruppe 8 (Saure Magmatite/Saure Metamorphite) besitzt einen Anteil von fast 50 % an den BZE II-Standorten. Basenarme (pleistozäne) Sande (Gruppe 6) weisen einen Anteil von rund 22 % auf. Ähnlich hoch ist der Anteil von kalkfreien Lockersedimenten (Gruppe 3) mit etwa 19 %. Deutlich geringer ist Gruppe 5 (Sandstein) mit nur 6 % repräsentiert. Noch seltener kommen basische Magmatite/basische Metamorphite (Gruppe 7) und Moore (Gruppe 9) mit jeweils 1,5 % vor. (Abb. 4).

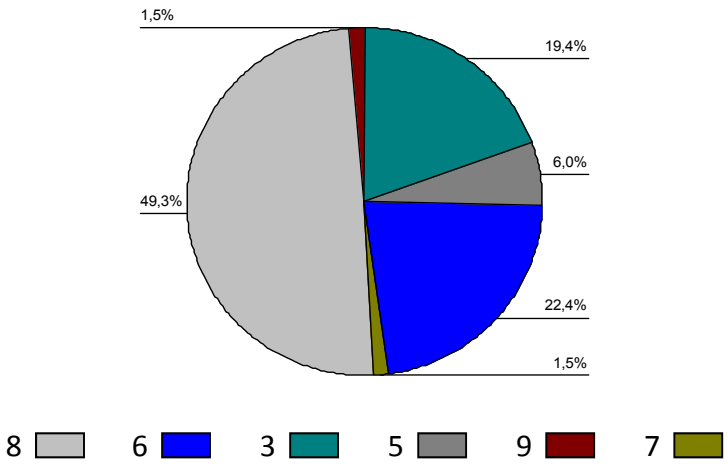

Abb. 4: Verteilung der Substrattypen am Gesamtkollektiv der BZE II.

Tab. 1: Erläuterung zu den Substrattypen der BZE I.

Code	Substratgruppen
1	**Kalkhaltiger Oberboden** Carbonathaltige Lockersedimente über carbonathaltigen Ausgangsgesteinen bzw. carbonhaltiges Ausgangsgestein
2	**Kalkhaltiger Unterboden** Carbonatfreie Lockersedimente über carbonathaltigem Ausgangsmaterial
3	**Lockersedimente** Umgelagerte kalkfreie Lockersedimente
4	**Tonstein** Verwitterungslehme bzw. Decklehme über Ton- u. Schluffstein, Ton, Tonsteine, Grauwacken
5	**Sandstein** Verwitterungslehme u. Decklehme über quarzreichen Ausgangsgesteinen sowie quarzreiche Ausgangsgesteine (z.B. Buntsandstein, paläozoische Sandsteine, Quarzite, sonstige Sandsteine)

Code	Substratgruppen
6	**Sand** Arme (pleistozäne) Sande
7	**Basische Magmatite/Basische Metamorphite** Basische Magmatite oder Metamorphite sowie Lehme oder Mischsubstrate über basischen Magmatiten oder Metamorphiten
8	**Saure Magmatite/Saure Metamorphite** Intermediäre u. saure Magmatite oder Metamorphite sowie Lehme oder Mischsubstrate über intermediären oder sauren Magmatiten oder Metamorphiten (z.B. Keratophyne, Andesite, Bims, Granite, Gneis)
9	**Moor**
10	**Sonstige** Anthropogene Substrate u. nicht Klassen 1 bis 9 zuzuordnende Substrate

2.1.4 Bestockungstyp

Im Folgenden ist die Verteilung der Bestockungstypen an den BZE II- bzw. Level II-Standorten dargestellt. Der Bestockungstyp wurde entsprechend der Definition der BZE II (Tab. 2) nach dem überwiegenden Anteil der Hauptbaumarten zugeordnet (Abb. 5). Es dominiert der Bestockungstyp Fichte mit etwa 43 % Prozent, gefolgt vom Typ Kiefer mit 22 %. Laubholzreiche Nadelmischwälder besitzen einen Anteil von rund 12 %, während knapp 10 % sonstigen Laubwäldern zugeordnet werden konnten. Sonstige Nadelwälder haben einen Anteil von etwa 5 %. Die Eichenreinstände weisen ebenso wie nadelholzreiche Laubholzmischbestände einen Anteil von ca. 4 % auf.

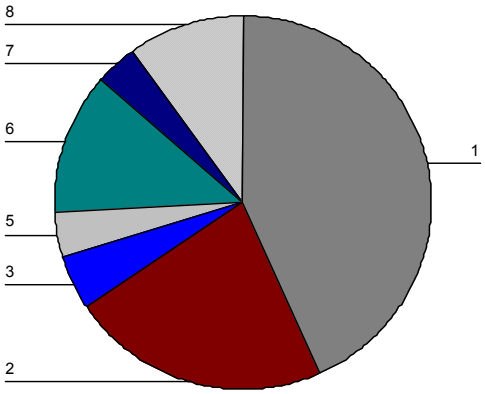

Abb. 5: Verteilung der Bestockungstypen am Gesamtkollektiv (BZE II).

Tab. 2: Erläuterung der Bestockungstypen.

Nummer	Definition
1	Fichten(rein)bestand (≥ 70 % Fichte)
2	Kiefern(rein)bestand (≥ 70 % Kiefer)
3	sonstige Nadelbaumarten (≥ 70 % sonstiges Nadelholz)
4	Buchen(rein)bestand (≥ 70 % Buche)
5	Eichen(rein)bestand (≥ 70 % Eiche)
6	Laubholzreiche Nadelmischbestände (> 30 % Laubholz)
7	Nadelholzreiche Laubholzmischbestände (> 30 % Nadelholz)
8	sonstige Laubbaumarten (≥ 70 % sonstiges Laubholz)

2.1.5 Kalkung

Die Bodenchemie wird durch Kalkungen deutlich beeinflusst. Um die Veränderung zwischen den Inventuren besser beurteilen zu können, werden lediglich die nach der Erstinventur gekalkten Standorte (zwischen den Jahren 1993 und 2006) näher betrachtet. Der überwiegende Teil wurde ein- bis zweimal gekalkt. Während von den 77 BZE-Standorten 9 einmal gekalkt wurden, erfolgte auf 12 Standorte eine zweimalige Kalkung. Eine drei- (Pkt. 140049) bzw. viermalige (Pkt. 140048) Kalkung erfolgter auf jeweils einem BZE-Punkt (Fichtenstandorte in höheren Lagen um 700 m).

2.2 Probenahme der BZE in Sachsen

Die Bodenprobenahme des Mineralbodens war für beide Duchgängen der BZE Identisch und erfolgte entsprechend der BZE-Arbeitsanleitung (Wellbrock et al. 2006). Bei den Beprobungen der Auflage gab es zwischen beiden BZE-Durchgängen eine methodische Änderung bei der Fraktionierung der Auflage. Während zur Erstinventur alle organischen Bestandteile < 2 mm zu beproben und zu analysieren waren, wurde bei der BZE II die Grenze auf < 20 mm entsprechend des ICP Forests manuals (UNECE 2006) verschoben.

2.3 Analytik

Die Analyseverfahren schwankten zwischen den verschiedenen Erhebungsprogrammen (Tab. 3). Alle Verfahren zur Analytik sind im Handbuch Forstliche Analytik (GAFA 2007) nachzulesen.

Tab. 3: Übersicht über die Parameter in den verschiedenen Erhebungsprogrammen BZE und Level II (DBF).

Parameter	Erhebung	Auflage	Mineralboden	Analyse-Methodik
Menge Auflagehumus t ha^{-1}	BZE I	x		nach BZE-Anleitung
	BZE II			nach HFA 2.6
	DBF			nach HFA 2.6
C-Gehalt	BZE I	x	x	nach BZE-Anleitung, Elementaranalyse CHN_Rapid Fa. Elementar
	BZE II	x	x	nach HFA D 31.1 Elementaranalyse VarioEL Fa. Elementar
	DBF	x	x	nach HFA D 31.1 Elementaranalyse VarioEL Fa. Elementar
N-Gehalt	BZE I	x	x	nach BZE-Anleitung, Elementaranalyse CHN_Rapid Fa. Elementar
	BZE II	x	x	nach HFA D 58.1 Elementaranalyse VarioEL Fa. Elementar
	DBF	x	x	nach HFA D 58.1 Elementaranalyse VarioEL Fa. Elementar
pH(H_2O)	BZE I	x	x	nach BZE-Anleitung HFA A3.1.1.1
	BZE II	x	x	nach HFA A3.1.1.2
	DBF	x	x	nach HFA A3.1.1.2
pH(KCl)	BZE I	x	x	nach BZE-Anleitung HFA A3.1.1.3
	BZE II	x	x	nach HFA A3.1.1.4
	DBF	x	x	nach HFA A3.1.1.4
Gehalte an P, K, Ca, Mg	BZE I	x		KW-Aufschl. HFA A3.3.3
	BZE II, DBF	x		KW-Aufschl. HFA A3.3.3
	DBF (zum Zeitpunkt BZE I)	x		HNO3-Aufschl.
effektive Kationen-Austauschkapazität: AK_{eges}, Ca, K, Mg, Na	BZE I, DBF		x	HFA A3.2.1.9
	BZE II, DBF		x	HFA A3.2.1.9

2.4 Kartenerstellung

Die dargestellten Karten wurden mittels eines GIS (ESRI ArcGis, Version 10.0) erstellt. Die Karten liegen, je nach Detaillierungsgrad der Darstellung, in unterschiedlichen Maßstäben (1:100.000, 1:150.000, 1:1.300.000, 1:1.000.000) in der Projektion Gauß-Krüger 4 Meridianstreifen, Koordinatensystem GSC Deutsches Hauptdreiecksnetz, Datum D-Deutsches Hauptdreiecksnetz vor. Als Grundlage dienten Punkteshapes der BZE I- und BZE II-Aufnahmepunkte, der Level II-Plots in Sachsen und der innerhalb des Projektes neu aufgenommenen Beprobungspunkte.

Die im Anhang dargestellten Karten wurden anhand der berechneten Perzentile für die einzelnen Parameter erstellt. Der Maßstab beträgt 1:1.000.000. Zusätzlich wurden die Grenzen der Wuchsgebiete (Stand 2011) und die gekalkten Standorte der BZE dargestellt. Zur Darstellung der Parameterwerte wurden 5 Klassen mit den Perzentilgrenzen < 10, 10-3, > 33-66, > 66-90 und > 90 gebildet.

2.5 Datengrundlage und -bearbeitung

Für die Auswertung lagen BZE- und Level II-Daten zur Bodenchemie von 80 Punkten für den Zeitpunkt der Ersterhebung (1992) und von 83 Punkten für den Zeitpunkt der Zweiterhebung (2006) vor. 80 Punkte wurden wiederholt beprobt. Davon waren 6 Punkte Dauerbeobachtungsflächen (Level II; Beprobungen 1995 u. 2007). Es ist also in den nachfolgenden Auswertungen zu beachten, dass hier in die Kollektive der BZE I bzw. BZE II auch Daten der forstlichen Dauerbeobachtungsflächen (Level II) integriert wurden. Deshalb können bei den statistischen Kennzahlen Unterschiede zu anderen Veröffentlichungen zur BZE auftreten.

Daten zur Bodenphysik wie Trockenrohdichte und Grobbodenanteil wurden nur zum Zeitpunkt der BZE I erhoben. Die Feinbodenvorräte wurden daher von der Erst- auf die Wiederholungsinventur übertragen.

Die Analysewerte lagen für die Auflagehorizonte L+Of und Oh bzw. für die Tiefenstufen des Mineralbodens 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm vor. Für die weitere Auswertung wurden die Tiefenstufen 0-5 cm und 5-10 cm zu 0-10 cm zusammengefasst. Zusätzlich wurden die Werte für die gesamte Auflage und den gesamten Mineralboden 0-30 cm berechnet. Bei dem Aggregieren der Werte wurden, mit Ausnahme von Vorräten, nach Feinboden- bzw. Humusmengen gewichtete Mittelwerte berechnet. Die pH-Werte wurden dazu vorher nach Vorzeichenänderung delogarithmiert, nach dem Aggregieren wurde wieder der negative dekadische Logarithmus berechnet. Vorratswerte hingegen können summiert werden.

Angaben zu austauschbaren Kationen wurden aus der Einheit $\mu mol_c\ g^{-1}$ in die Einheit $g\ kg^{-1}$ umgerechnet. Da die Streuung der Natriumkonzentrationen beim Vergleich der beiden Inventuren stark voneinander abwich, wurde die Basensättigung ohne den Natriumanteil neu berechnet.

2.6 Auswahl der Testgebiete

2.6.1 Beschreibung der Testgebiete

Um praxistaugliche Indikatoren für waldbaulich/ökologisch relevante Standortszustände aufzeigen zu können, wurden neben den BZE I- und BZE II-Daten weitere Daten in 3 Testgebieten erhoben (Abb. 6).

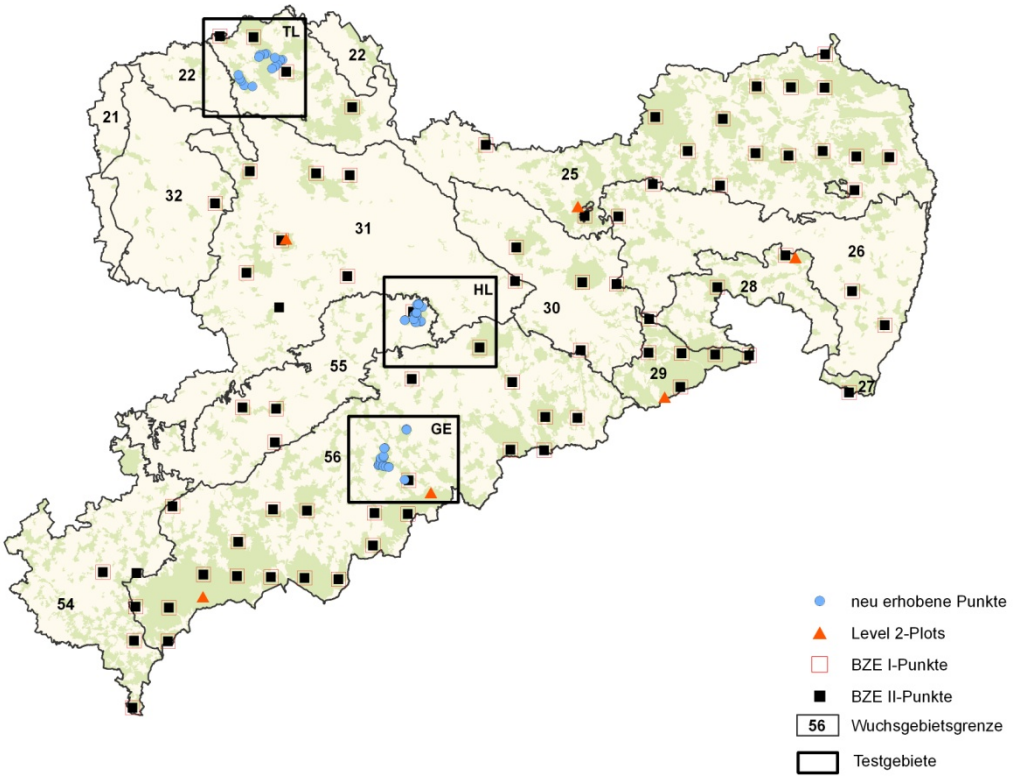

Abb. 6: Übersichtskarte mit den Inventurpunkten in den jeweiligen Testgebieten (GE, Mittelgebirge; HL, Hügelland; TL, Tiefland).

2.6.2 Mittelgebirge

Das Testgebiet für den Mittelgebirgsstandort befindet sich im Wuchsbezirk Obere Nordabdachung des Mittleren Erzgebirges in einer Höhe von 500 bis zu 700 m ü. NN und erstreckt sich etwa 12 km in Ost-West-Richtung sowie 15 km in Nord-Süd-Richtung (Abb. 7). Begrenzt wird das Untersuchungsgebiet von den Orten Zschopau im Nordwesten, Zöblitz im Südosten und Großwaltersdorf im Nordosten. Während der Vegetationsperiode liegen die Durchschnittstemperaturen des Wuchsbezirkes bei ca. 13,4 °C und der Niederschlag beläuft sich auf im Durchschnitt auf ca. 430 mm. Im Jahresverlauf ergeben sich durchschnittliche Temperaturen von ca. 6,7 °C und Niederschläge von ca. 890 mm.

Als wichtigste potenzielle natürliche Vegetation des Untersuchungsgebietes gelten Hainsimsen-(Fichten-Tannen-) Buchenwälder. Gegenwärtig dominieren jedoch Rotfichtenbestände mit ca. 86 %, die gelegentlich von anderen Nadelbaumarten (3 %) und Rotbuchenbeständen (6 %) unterbrochen werden.

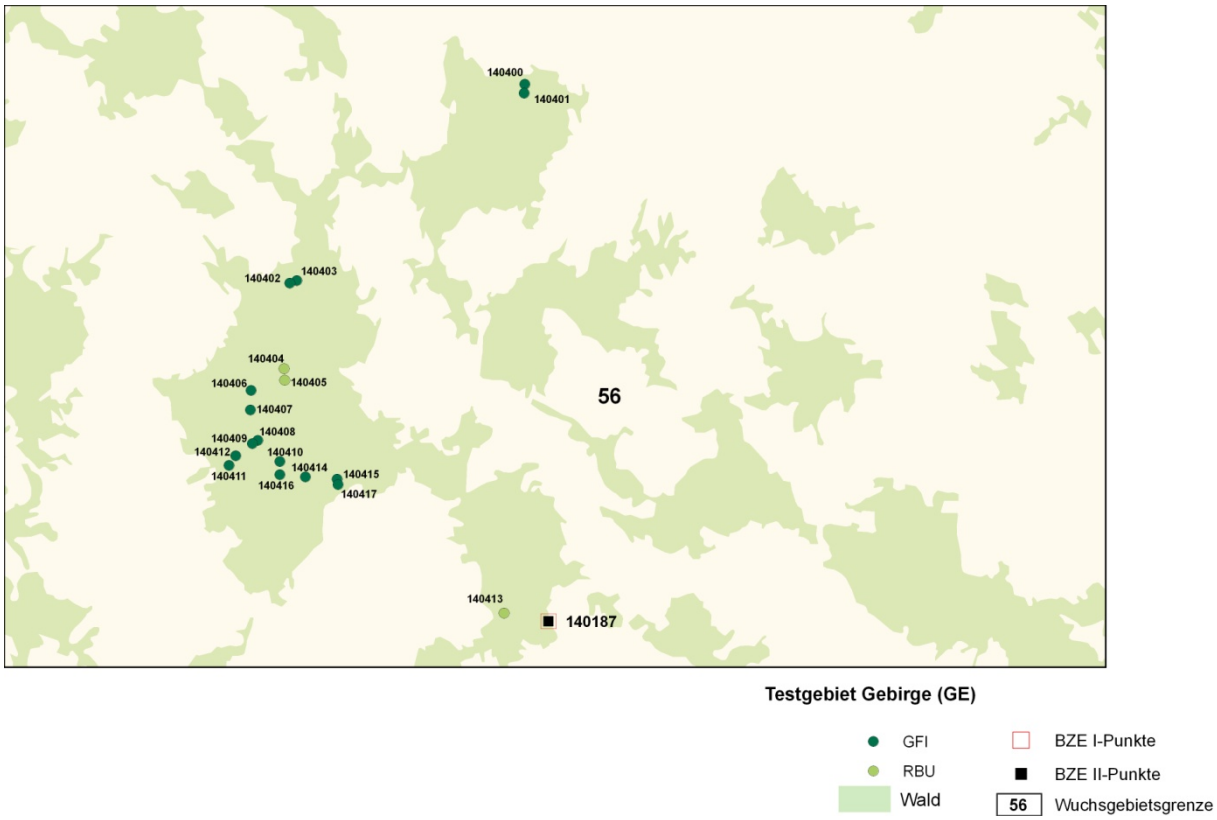

Abb. 7: Übersicht über die Verteilung der Inventurpunkte im Testgebiet Mittelgebirge.

Gesteine und tektonische Strukturen, die sich im Untersuchungsgebiet im Paläozoikum gebildet hatten, wurden während des Mesozoikums und im Tertiär abgetragen und eingeebnet. Das heutige Landschaftsbild entstand jedoch im Quartär, indem sich nach der letzten Hebungsphase die nun der Nordabdachung des Erzgebirges folgenden Flüsse ihre Täler einschnitten. Weithin

erscheint das Untersuchungsgebiet als tief zertalte Hochfläche. Anstehendes Gestein und damit Ausgangsmaterial für die Bodenbildung sind Gneise, die durch Verwitterung flache bis tiefgründig, sandig-kiesige, sandig-lehmige bis lehmige Lockerdecken bilden. Häufig vorkommende Bodentypen sind unterschiedlich stark podsolierte Böden (Braunerden) sowie Böden mit Stauwasser-(Pseudogleye), in Tälern auch Grundwassereinfluss (Gleye). Darüber hinaus ist das Untersuchungsgebiet durch zahlreich, jedoch zumeist kleinräumig auftretende Hochmoore gekennzeichnet. Die forstliche Standortsformenkarte weist ca. 20 verschiedene Lokalbodenformen mit unterschiedlichen Wasserhaushaltsformen aus (Tab. 4). Am stärksten wird das Testgebiet von unvernässten Böden geprägt, die einen Flächenanteil von insgesamt 83 % aufweisen. Davon dominieren mäßig frische Standorte (-5) neben relevanten Anteilen von frischen Standorten (-4) sowie mäßig trockenen Standorten (-6). Unter den Stauwasserformen sind nasse mineralische Nass-Standorte (3) häufig. Die Lokalbodenform mit der höchsten Flächenrepräsentanz ist die Oelsengrunder Gneis-Braunerde (OgGn) gefolgt von der Wolkensteiner Gneis-Braunerde (WoGn), dem Forchheimer Gneis-Anmoorstaugley (FoGG), dem Oelsengrunder Gneis-Humusstaugley (OgGG), der Pfaffrodaer Gneis-Braunerde (PfGn) und der Hirschberg Gneis-Braunerde (HgGn). Alle diese Standortsformen belegen eine Fläche > 100 ha, wobei die Lokalbodenform OgGn den mit Abstand größten Anteil innehat.

Tab. 4: Flächenanteile (ha) der Lokalbodenformen (LBF) für die entsprechenden Wasserhaushaltsformen im Mittelgebirgs-Testgebiet.

LBF	Reliefbedingte terrestrische Wasserformen				Stauwasserformen						
	-4	-5	-6	-7	1	2	3	4	5	6	7
FoGG	-	-	-	-	-	-	222,4	-	-	-	-
HeGM	-	-	-	-	-	-	0,8	-	-	-	-
HgGn	-	0,6	113,5	2,9	-	-	-	-	-	-	-
HrB	-	-	-	-	-	0,8	-	-	-	-	-
JöGn	-	-	5,4	-	-	-	-	-	-	-	-
OgGB	7,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OgGG	-	-	-	-	-	-	27,8	182,6	-	-	-
OgGn	386,2	1551,0	208,7	-	-	-	-	-	-	-	-
OgQu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2
PfGB	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PfGG	-	-	-	-	-	-	16,2	35,8	-	-	-
PfGn	81,0	70,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PoBl	-	4,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RaH	0,4	26,8	18,4	-	-	-	-	-	-	-	-
RoGn	-	47,8	20,0	-	-	-	-	-	-	-	-

LBF	Reliefbedingte terrestrische Wasserformen				Stauwasserformen						
	-4	-5	-6	-7	1	2	3	4	5	6	7
SaGG	-	-	-	-	-	-	2,6	-	-	-	-
SwB	-	-	-	-	1,6	72,8	-	-	-	-	-
WeTa	-	-	-	-	5,5	-	-	-	-	-	-
WoGn	54,8	182,2	53,7	-	-	-	-	-	-	-	-
FoGG	-	-	-	-	-	-	16,2	35,8	-	-	-

2.6.3 Hügelland

Das Testgebiet Zellwald liegt im Wuchsbezirk Südliches Mulde-Löss-Hügelland, welches Teil des Wuchsgebietes Erzgebirgsvorland ist. Die Untersuchungsflächen befinden sich auf einer Höhe zwischen 280 und 360 m ü. NN (Abb. 8). Im Norden wird das Untersuchungsgebiet von der Stadt Nossen und im Süden von der Ortschaft Reichenbach begrenzt. Das relativ kleine Untersuchungsgebiet erstreckt sich ca. 5 km sowohl in Nord-Süd-Richtung als auch in Ost-West-Richtung. Die durchschnittlichen Niederschläge des Wuchsbezirkes belaufen sich im Jahr auf ca. 740 mm, während in der Vegetationsperiode ca. 360 mm zur Verfügung stehen. Mit Durchschnittstemperaturen von ca. 8,2 °C im Jahresverlauf und ca. 15,0 °C in der Vegetationszeit ist der Wuchsbezirk trockener und wärmer als das Untersuchungsgebiet im Erzgebirge.

Die großflächig, natürliche Vegetation des Zellwaldes ist der Zittergras-Seggen-Eichen-Buchenwald. Rezent anzutreffende Hauptbaumarten sind jedoch Gemeine Fichte mit 51 %, gefolgt von Waldkiefer mit 15 % und Eichenbeständen mit 14 %. Andere Laubbaumarten erreichen einen Anteil von lediglich 9 %.

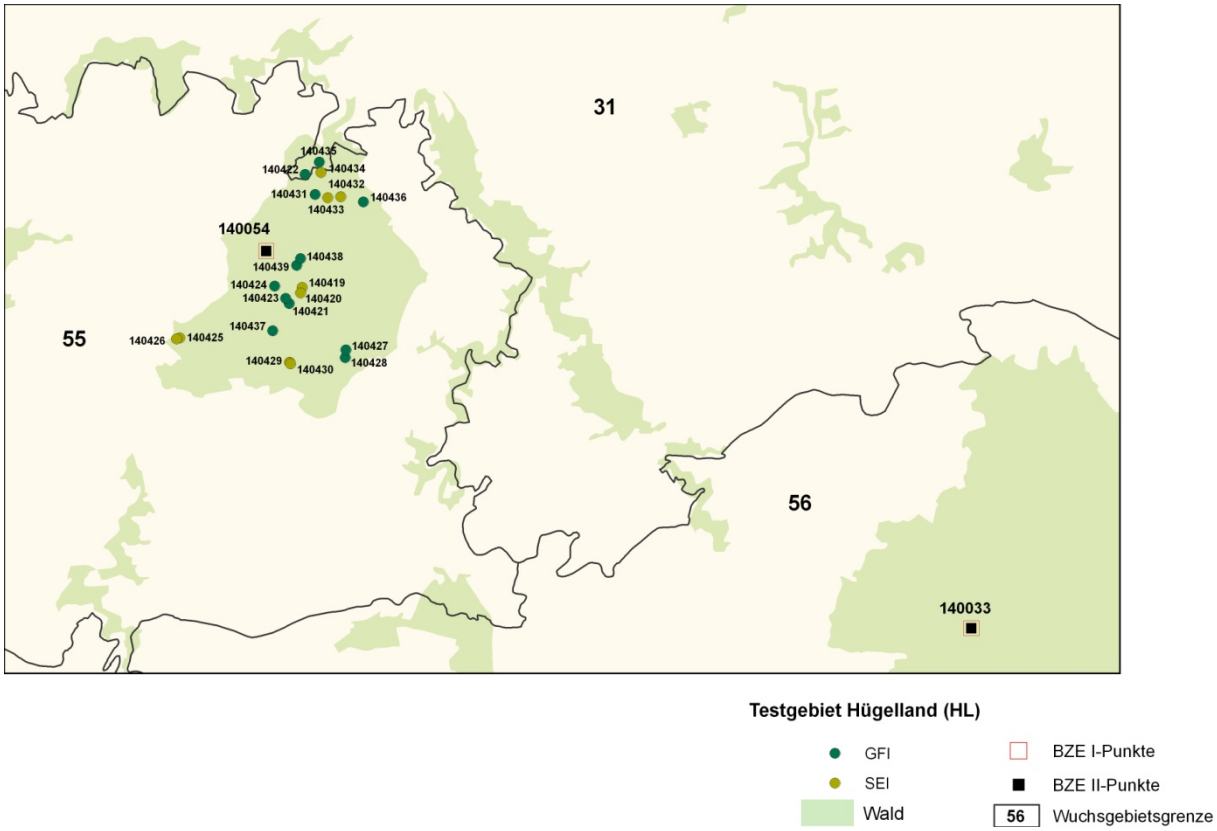

Abb. 8: Übersicht über die Verteilung der Inventurpunkte im Testgebiet Hügelland.

Der Zellwald kann als Teil des Osterzgebirges mit Übergangscharakter zum Mulde-Lösshügelland und Vorerzgebirge aufgefasst werden und sich in ein kristallines, erzgebirgstypisches Grundgebirge mit sedimentären Deckschichten einteilen. Als Deckschicht liegt der bereits entkalkte Löss in unterschiedlicher Mächtigkeit verschiedenen Gesteinen auf. Das Untersuchungsgebiet wird von mittel bis tiefgründigen, braunen Schluff-Böden (Braunerden) mit tonreicherem Unterboden (Parabraunerden), aus Löss oder umgelagerten Lösslehm, die beide nicht selten von Stauwassereinfluss (Pseudogleye) geprägt. Hinsichtlich der geringen Anzahl unterschiedlicher Lokalbodenformen (≈ 12) war das Hügelland das am wenigsten heterogene Testgebiet (Tab. 5). Anders als im Testgebiet Mittelgebirge waren 72 % der Standorte stauwassergeprägt, mit einem Focus auf wechselfrische Standorte (Stauwasserform 5). Daneben sind auch terrestrische von Sickerwasser bestimmte reliefbedingte Wasserhaushaltsformen (-5) gebietsprägend. Neben der Lokalbodenform Grillenburger Löss-Staugley (GbLU), die mit Abstand die größte Fläche einnahm, wiesen nur der Grillenburger Löss-Braunstaugley (GbLB) und die Blankensteiner Schiefer-Bachtälchen (BlB) einen nennenswerten Flächenanteil auf (> 45 ha).

Tab. 5: Flächenanteile (ha) der Lokalbodenformen (LBF) für die entsprechenden Wasserhaushaltsformen im Hügellands-Testgebiet.

LBF	Reliefbedingte terrestrische Wasserformen				Stauwasserformen						
	-4	-5	-6	-7	1	2	3	4	5	6	7
BlB	-	-	-	-	-	47,0	-	-	-	-	-
BlSf	0,1	26,2	13,0		-	-	-	-	-	-	-
GbLB	12,9	111,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GbLG	-	-	-	-	-	-	-	17,6	-	-	-
GbLL	-	2,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GbLU	-	-	-	-	-	-	-	-	550,9	-	-
GrSf	-	16,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HwLB	0,5	38,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HwLL	-	26,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HwLU	-	-	-	-	-	-	-	-	29,5	-	-
WaH	-	-	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-
WhLB	-	4,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-

2.6.4 Tiefland

Als Testgebiet für den Tieflandstandort wurde ein Bereich im sächsischen Teil der Dübener Heide ausgewählt. Das Testgebiet liegt in den benachbarten Wuchsbezirken Domnitzer Heiderandplatte, Dübener Heidehochfläche und Wildenhainer Niederung, die zum Wuchsgebiet Düben-Niederlausitzer Altmoränenlands gehören (Abb. 9). Das Untersuchungsgebiet wird im Osten von der Elbe, im Westen von der Mulde, im Norden von der Landesgrenze nach Sachsen-Anhalt und im Süden von den Ortschaften Doberschütz und Mockrehna begrenzt. Es erstreckt sich in einer Höhe zwischen 90 und 150 m ü. NN und ist sowohl das niederschlagsärmste, als auch das wärmste der ausgewählten Untersuchungsgebiete. Im Mittel fallen in der Vegetationsperiode ca. 290 mm Niederschlag, wobei der Gesamtjahresniederschlag um ca. 300 mm höher liegt. Die mittlere Temperatur in der Vegetationsperiode ist mit 16 °C um 7 °C höher als die mittlere Jahrestemperatur. Als potentiell natürliche Vegetation lassen sich die Untersuchungspunkte im westlichen Teil Buchen-Eichen-Wäldern zuordnen, während im östlichen Teil Planare Eichen-Buchen-Wälder zu erwarten wären. Heute dominieren die Dübener Heide Nadelwaldbestände in Form der Waldkiefer mit 88 % Flächenanteil, wobei der Laubwaldbestand einen Anteil von 9 % ausmacht.

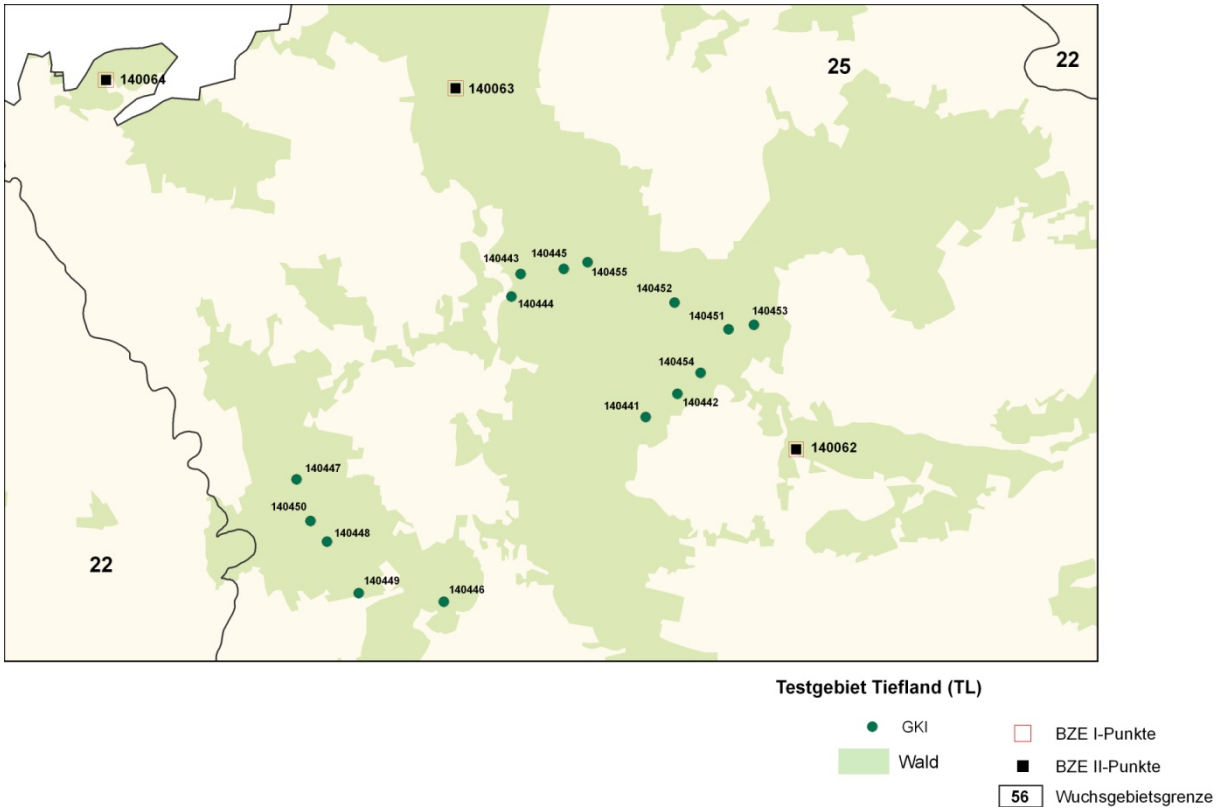

Abb. 9: Übersicht über die Verteilung der Inventurpunkte im Testgebiet Tiefland.

Der zentrale nördliche Teil der Dübener Heide ist durch saalekaltzeitliche Stauchendmoränen geprägt. Nach Westen und Süden schließen sich saumartig Sanderflächen und ausgedehnte wellige, teilweise übersandete Moränenflächen mit Resten vorgelagerter schwach ausgeprägter Endmoränen an. Das Vorkommen der Böden ist an der Verbreitung der geologischen Bildungen gekoppelt. Dominiert wird das Untersuchungsgebiet von mittel- bis tiefgründigen, oft sauren nährstoffarmen pleistozänen Sanden. Im Testgebiet Tiefland entwickelten sich auf den grundwassernahen Talsanden Gleye aus Sand, während auf den Sanderflächen und übersandeten Moränenflächen Podsole dominieren. Auf den Endmoränen sind hingegen Braunerden und Fahlerden im Wechsel mit lehmig-tonigen Pseudogleyen typisch. In den stau- und grundnassen Hohlformen im Endmoränenbereich und in den Talgründen der Bäche treten Pseudogleye und Gleye auf. Die Standortskartierung weist mehr als 30 verschiedene Lokalbodenformen aus (Tab. 6). Damit ist es auch das heterogenste der drei Testgebiete. Darüber hinaus dominieren im gesamten Testgebiet grundwasserbeeinflusste Bodenformen mit einer Dominanz von grundfrischen (Grundwasserform 5) und schwach grundfrischen (Grundwasserform 6) unvernässten Standorten. Auch Standorte ohne Grundwasseranschluss (Grundwasserform 7 ohne GW bis 3 m Tiefe) haben einen hohen Anteil. Die weitaus größte Fläche wird von der Nedlizer Sand-Braunerde (NeS) eingenommen, gefolgt vom Wiepersdorfer Sand-Graugley (WpSU), vom Stechauer Sand-Humusgley (ScSG), sowie von der Bräunigker Grand-Branerde (BkS) und vom Mullberger Sand-Braungley (MuSB).

Tab. 6: Flächenanteile (ha) der Lokalbodenformen (LBF) für die entsprechenden Wasserhaushaltsformen im Tieflands-Testgebiet.

LBF	Stauwasserformen		Grundwasserformen					
	4	5	2	3	4	5	6	7 (= GW-rei)
BaSG	-	-	-	-	18,4	-	-	-
BiS	-	-	-	-	-	-	-	35,2
BkS	-	-	-	-	-	-	201,1	43,5
BöS	-	-	-	-	-	-	-	28,3
DiSU	-	-	-	-	10,1	10,5	-	-
DoS	-	-	-	-	-	-	-	8,8
GöLG	4,3	-	-	-		-	-	-
GoSU	-	-	-	-	18,7	-	-	-
GtSB	-	-	-	-	-	31,4	-	-
HdSB	-	-	-	-	-	50,1	-	-
KöSU	-	-	-	-	-	2,7	-	-
LhSU	-	-	-	-	-	7,2	-	-
LkS	-	-	-	-	-	-	55,6	-
Mm	-	-	-	11,3	-	-	-	-
Mofk	-	-	-	-	-	13,0	-	-
MuSB	-	-	-	-		244,6	-	-
Mz	-	-	-	1,6	11,2	-	-	-
NeS	-	-	-	-	-	1,2	1092,7	1402,1
PoLB	-	-	-	-	-	39,8	-	-
RöLU	7,0	4,3	-	-			-	-
SbLU	-	5,5	-	-	-		-	-
ScSG	-	-	-	47,5	393,5	-	-	-
SlLB	-	-	-	-	-	32,4	-	-
SlSB	-	-	-	-	-	0,1	-	-
Sma	-	-	12,6	0,2	-	-	-	-
SMm	-	-	9,7	1,8	-	-	-	-
SmSU	-	-	-	-	6,9	140,9	-	-
SMz	-	-	11,8	8,7	-	-	-	-
SnLU	-	148,2	-	-	-		-	-
StS	-	-	-	-	-	10,5	-	190,4
SuSU	-	-	-	-	13,9	98,1	-	-
TaSG	-	-	-	4,6	2,3	-	-	-
WpSU	-	-	-	-	200,0	495,1	3,5	-
ZaS	-	-	-	-	-	-	-	149,3

2.7 Statistische Methoden

2.7.1 Berechnung der Perzentile zur Bewertung

Die Perzentile wurden aus dem Kollektiv der BZE I und BZE II für den jeweiligen Parameter berechnet. Es wurden die < 10, 10-33, > 33-66, > 66-90 und > 90-Perzentilspannen berechnet und den Bewertungsstufen sehr gering, gering, mittel, hoch sowie sehr hoch zugeordnet. Der Torfstandort Nr. 140010 wurde nicht mit einbezogen, da er nicht mit dem restlichen Kollektiv vergleichbar ist. Anhand Abb. 10 ist ersichtlich, wie aus der Summenhäufigkeit Perzentile berechnet werden.

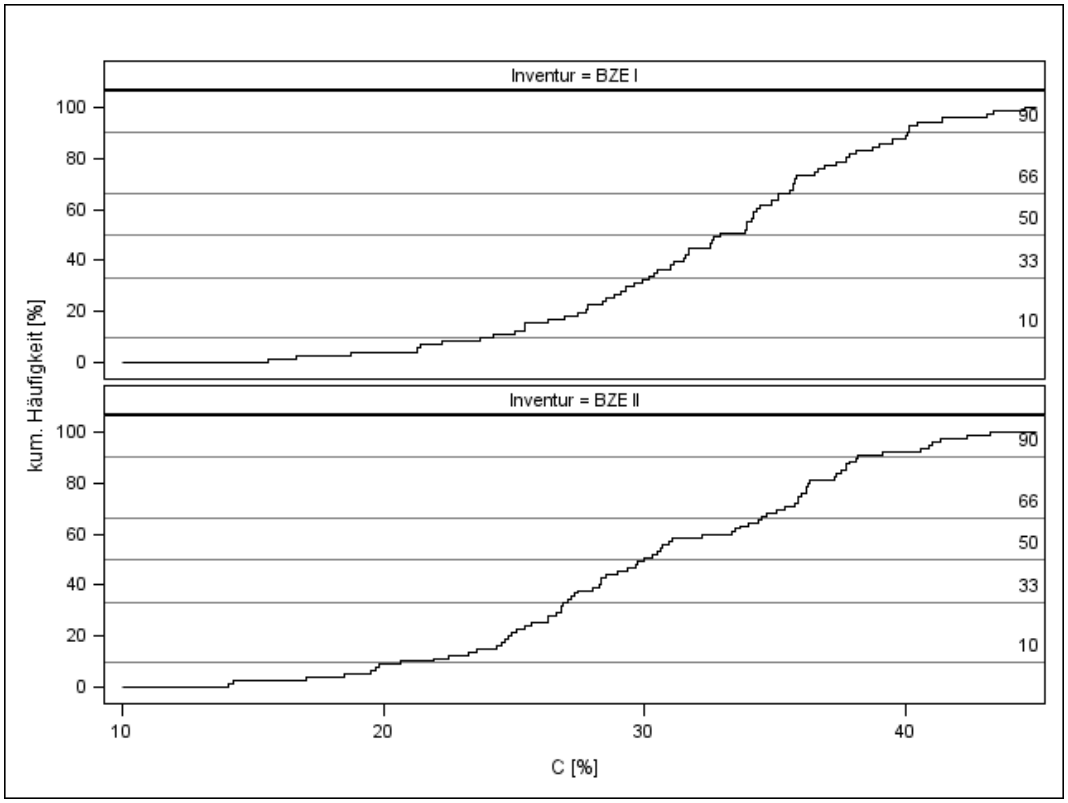

Abb. 10: Kumulierte Häufigkeit (y-Achse) des Kohlenstoffgehalts (x-Achse) im Oh-Horizont der Auflage. Die horizontalen Linien geben die in dieser Arbeit berücksichtigten Perzentile (10, 33, 66, 90) sowie den Median wieder (50). Anhand der Schnittpunkte der Perzentillinien lässt sich der dazu gehörige Werte für den Kohlenstoffgehalt ablesen.

2.7.2 Mittelwertvergleiche

Für den Vergleich der Vorräte zwischen der 1. und 2. Aufnahme wurde zunächst die Normalverteilung der beiden Stichproben (BZE I und BZE II) mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test mit Lilliefors-Korrektur bzw. dem Shapiro-Wilk-Test überprüft. Bei Vorliegen einer

Normalverteilung wurde der Student-t-Test für unverbundene Stichproben gewählt, in allen anderen Fällen der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test. Statistische Signifikanz wurde für $P \leq 0{,}05$ festgelegt. Im Text werden Ergebnisse als arithmetisches Mittel ± Standardfehler dargestellt. Die statistischen Berechnungen wurden mit den Programmen R 2.13.0 bzw. SAS 9.2 durchgeführt.

Bei der Untersuchung des Einflusses verschiedener Größen (z.B. Bodenform, Bestand) wurden die Werte in den Gruppen auf Normalverteilung getestet. Lag keine Normalverteilung vor, wurden die Werte logarithmiert und der Test auf Normalverteilung wiederholt. Bei Vorliegen einer Normalverteilung wurden die Varianzen der Gruppen mit dem Levene-Test auf Homogenität geprüft. Bei Varianzhomogenität wurde eine ANOVA (Typ I), ansonsten eine Welch-ANOVA durchgeführt. Die Gruppenmittelwerte wurden untereinander mit nach Bonferroni korrigierten T-Tests verglichen. Lag keine Normalverteilungen vor, wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt, um zu beurteilen, ob es zwischen den Gruppen signifikante Unterschiede gab. Die Untersuchungen wurden jeweils getrennt für die Werte der beiden Inventuren sowie für deren Veränderungen durchgeführt.

Um den Einfluss der Kalkung auf die Bodenchemie zu untersuchen, wurden nur Bodenformen ausgewählt, die potenziell auch gekalkt werden. Es wurden die Differenzen der zu untersuchenden Größen gebildet und den beiden Gruppen (gekalkt, ungekalkt) zugeordnet. Die Werte der beiden Gruppen wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung geprüft und die Unterschiede zwischen beiden Gruppen mit dem T-Test für unabhängige Stichproben bzw. dem Wilcoxon-Rangsummentest auf Signifikanz überprüft.

2.7.3 Boxplots

Zur graphischen Darstellung der Lage- und Streuungsmaße der Daten wurden Box-Whisker-Plots gewählt (Abb. 11). Die Box wird durch das untere und obere Quartil (25 % und 75 % Perzentil) begrenzt und beinhaltet somit 50 % der Daten. Die Länge der Box entspricht dem Interquartilabstand. Der Median wurde als durchgehender Strich eingezeichnet. Teilweise wurde das arithmetische Mittel zusätzlich als Kreuz oder Raute angedeutet. Die Whiskers repräsentieren den 1,5-fachen Interquartilabstand der Daten. Datenpunkte, die außerhalb des 1,5-fachen Interquartilabstandes liegen, wurden als individuelle Ausreißer dargestellt.

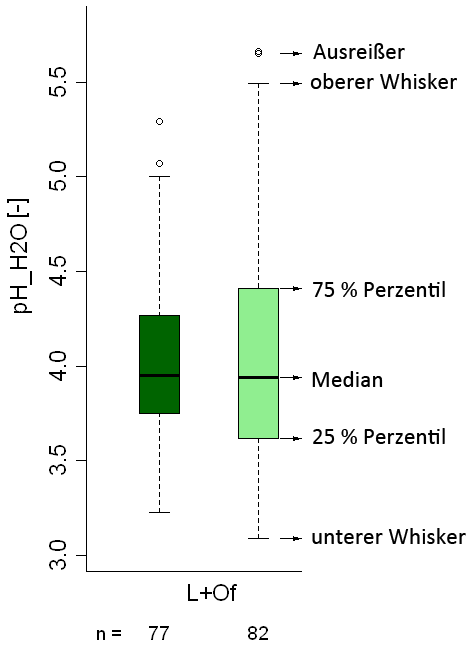

Abb. 11: Darstellung des Aufbaus eines Box-Whisker-Plots.

2.7.4 Clusteranalyse

Die Clusteranalyse ist ein multivariates Verfahren, das eine Menge von Objekten, die durch spezifische Merkmale beschrieben sind, in Gruppen (Cluster) zerlegt. Das Ziel besteht darin, Cluster (z.B. Standortstypen) zu bilden, die in sich möglichst homogen und untereinander weitestgehend heterogen (separiert) sind. Die Clusteranalyse lässt sich in zwei Schritte unterteilen:

(1) Ermittlung der Distanzmatrix

In der vorliegenden Arbeit wurde die quadrierte euklidische Distanz benutzt. Sie lässt sich berechnen aus

$$D_{kl} = \sum_{j=1}^{J} (X_{kj} - X_{lj})^2$$

wobei D_{kl} die Distanz der Objekte (BZE-Punkte) k und l, X_{lj} die Ausprägung des Parameters j bei Objekt l (j = 1,...,j) und X_{kj} die Ausprägung des Parameters j bei Objekt k (j = 1,...,j) darstellt.

(2) Gruppenfusionierung

Die Distanzmatrix bildet die Grundlage für die Zusammenfassung der Objekte zu Gruppen. Hierbei kann das Fusionierungsverfahren nach Ward (1963) eingesetzt werden, bei welchem mit jedem Fusionierungsschritt diejenigen Objekte bzw. Gruppen zusammengefasst werden, welche

die Streuung der Parameter innerhalb der Gruppen am wenigsten erhöhen. Daneben kam auch das Average Linkage-Verfahren zur Anwendung, bei welchem ein Durchschnittswert auf Basis aller Distanzen zwischen dem neuen Cluster und dem betrachteten Cluster gebildet wird. Die Clusterzentren werden in einem iterativen Rechenprozess optimiert, wobei jedes Objekt demjenigen Cluster zugewiesen wird, zu dessen Zentrum die euklidische Distanz am geringsten ist.

2.7.5 Diskriminanzanalyse

Die Diskriminanzanalyse untersucht Gruppen auf Unterschiede ihrer Merkmalsvariablen (Zustandsparameter) bei gegebener Gruppenzugehörigkeit (z.B. Standortsmerkmale). Zunächst erfolgt die Ermittlung einer Linearkombination der Merkmalsvariablen, die eine optimale Trennung zwischen den Gruppen ergibt. Bei einer solchen Diskriminanzfunktion werden für den einfachsten Fall zwei Gruppen von Merkmalsvariablen getrennt (Abb. 12). Für den mehrdimensionalen Fall (Anzahl der Merkmalsvariablen > 2) lassen sich analog Trennebenen und "Hyperebenen" ermitteln, die entsprechend zwischen zwei oder mehreren Gruppen im multidimensionalen Diskriminanzraum zu trennen vermögen. Die Trennkraft einzelner Merkmalsvariablen ergibt sich analog zur multiplen Regressionsanalyse (s.u.) aus dem Betrag ihrer standardisierten Koeffizienten innerhalb der Diskriminanzfunktion.

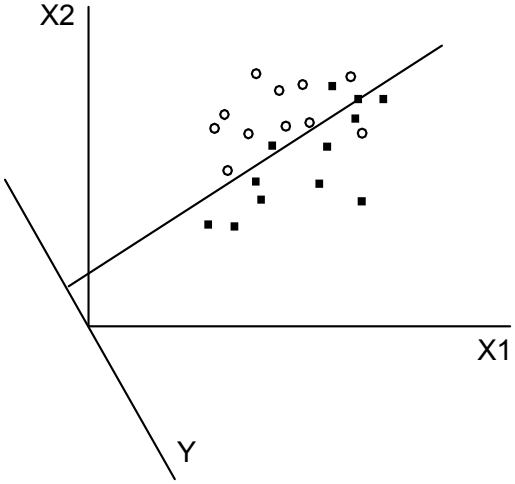

Abb. 12: Geometrische Darstellung einer Trennfunktion Y = f(X1,X2).

Eine gute Diskriminanzfunktion zeichnet sich dadurch aus, dass sich die Mittelwerte der Funktion in den Gruppen deutlich unterscheiden. Als Gütekriterium für die Unterschiedlichkeit der Gruppen und damit für die Trennkraft der ermittelten Diskriminanzfunktion kann der statistische Wert Wilks' Lambda dienen, der sich als Quotient der Streuung innerhalb der Gruppen und der Gesamtstreuung errechnet. Dieses Maß variiert zwischen 0 und 1, wobei kleinere Werte eine höhere Trennkraft anzeigen. Die Bedeutung von Wilks' Lambda besteht darin, dass es sich in eine

Variable transformieren lässt, die eine annähernde Chi^2-Verteilung besitzt, wodurch die Durchführung einer statistischen Signifikanzprüfung ermöglicht wird.

Unter Zugrundelegung der ermittelten Diskriminanzfunktion lassen sich dann auch Objekte mit unbekannter Gruppenzugehörigkeit aufgrund ihrer Merkmalsausprägungen in die bestehenden Gruppen einordnen. Die Zuordnung beruht auf dem Wahrscheinlichkeitstheorem von Bayes, das bei Backhaus et al. (1987) erläutert wird.

2.7.6 Berechnung der kleinsten messbaren Unterschiede

Um eine statistisch abgesicherte Mindestprobenanzahl zur Bestimmung ausgewählter Parameter zur Kennzeichnung von Zustandseigenschaften zu ermitteln (Kapitel 5), wurde die Methode der kleinsten messbaren Unterschiede (MDD) angewandt. Die MDD bildet die kleinsten Unterschiede zwischen den gemittelten Werten in Abhängigkeit von der Probenanzahl ab ((Zar 1984). Für die Auswertung der MDD wurde die Gleichung für ungepaarte Stichproben verwendet, da davon ausgegangen werden kann, dass die beprobten Standorte unabhängig voneinander sind.

$$\text{MDD (ungepaart)} \geq \sqrt{\frac{2s_p^2}{n}(t_{\alpha(2),v}+t_{\beta(1),v})^2}$$

Wobei s_p^2 die Varianz, n die Probenanzahl und t das in der t-Statistik angewandte Signifikanzniveau mit (α) Fehler 1. Art sowie (β) Fehler 2. Art und den entsprechenden Freiheitsgraden (v) darstellt.

Es wurde eine statistische Aussagekraft (1-β) von 0,90 und ein Signifikanzniveau (α) von 0,05 angewandt. Um die Vergleichbarkeit verschiedener Parameter zu wahren, erfolgte die Berechnung der relativen MDD, die sich aus folgender Gleichung ergibt.

$$MDD_{rel.} = \frac{MDD}{\bar{x}} \times 100\%$$

2.7.7 Variogrammanalyse und Kriging-Interpolation

Geostatistische Verfahren

Die Grundlagen der Geostatistik wurden in den 60er Jahren in der Lagerstättengeologie entwickelt. Im Folgenden werden einige theoretische Grundlagen der Geostatistik kurz dargelegt, welche für das Verständnis der Variogrammanalysen in Kapitel 7.3 notwendig sind. Umfassende Darstellungen der geostatistischen Methoden und deren Anwendungsbereiche finden sich in der Literatur(Akin und Siemes 1988, Dutter 1985).

Regionalisierte Variablen, Autokorrelation

Eine Variable $Z(x_i)$, welche die Werte einer Größe in Abhängigkeit vom Ort x_i angibt, wird als regionalisierte (ortsabhängige) Variable bezeichnet. Geostatistischen Verfahren liegt die Annahme zugrunde, dass sich eine regionalisierte Variable aus einer deterministischen, einer autokorrelativen und einer rein zufälligen Komponente zusammensetzen kann (Schröder et al. 1994).

Eine regionalisierte Variable wird als autokorreliert bezeichnet, wenn sich die Merkmalsausprägungen nahe beieinanderliegender Punkte durchschnittlich ähnlicher sind, als die weiter entfernt liegender. Die Ursache der Autokorrelation z.B. von Bodeneigenschaften besteht in den – prinzipiell auf jedem Skalenniveau existenten – räumlichen Strukturen pedogener Faktoren.

In der Geostatistik kommt der Autokorrelation regionalisierter Variablen zentrale Bedeutung zu. Ihre Beschreibung erfolgt mit Hilfe des sogenannten Variogramms, das die räumliche Variation in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen den Meßpunkten beschreibt.

Das Variogramm

Das Variogramm (exakt: Semi-Variogramm) beschreibt die statistische Abhängigkeit der regionalisierten Variablen $Z(x_i)$ und $Z(x_i+h)$ an den Messpunkten x_i und x_i+h. Dabei ist N(h) die Anzahl der Punktepaare mit dem Abstand h.

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}\left[z(x_i)-z(x_i+h)\right]^2$$

Abb. 13 zeigt den prinzipiellen Verlauf der Variogrammfunktion autokorrelierter Daten. Der Anstieg der Variogrammkurve gibt den Bereich wieder, innerhalb dessen die Merkmalswerte autokorreliert sind, das heißt einer räumlichen Struktur unterliegen. Die sogenannte Reichweite (auch: Range, Erhaltungsneigung, Persistenz) gibt die Entfernung an, in der die Kurve einen bestimmten Schwellenwert (engl. Sill) erreicht. Dieser ist gleichzusetzen mit der statistischen Gesamtvarianz der betrachteten Merkmalsausprägungen. Innerhalb der Reichweite unterliegen die Merkmalswerte der Autokorrelation. Messpunkte, deren Abstand größer ist als die Reichweite, sind voneinander unabhängig.

Definitionsgemäß müsste die Variogrammkurve durch den Ursprung des Koordinatensystems gehen. Häufig liegt der Schnittpunkt der extrapolierten Variogrammkurve mit der y-Achse jedoch oberhalb des Ursprungs. Diese Restvarianz zwischen äußerst eng benachbarten Punkten quantifiziert den sogenannten Nuggeteffekt (Abb. 13). Der resultiert zum einen aus der Summe der Varianzen der Mess-, Analysen- und Probennahmefehler. Zum anderen beruht er auf räumlichen Strukturen mit Reichweiten, welche kleiner sind als die minimalen Messpunktabstände. Bei der Nuggetvarianz der hier untersuchten Daten handelt es sich somit um den quantitativen Ausdruck der kleinräumigen Variabilität, welche durch das

Beprobungsraster nicht mehr erfasst werden kann sowie um die durch analytische Messfehler der beteiligten Labors verursachte Streuung.

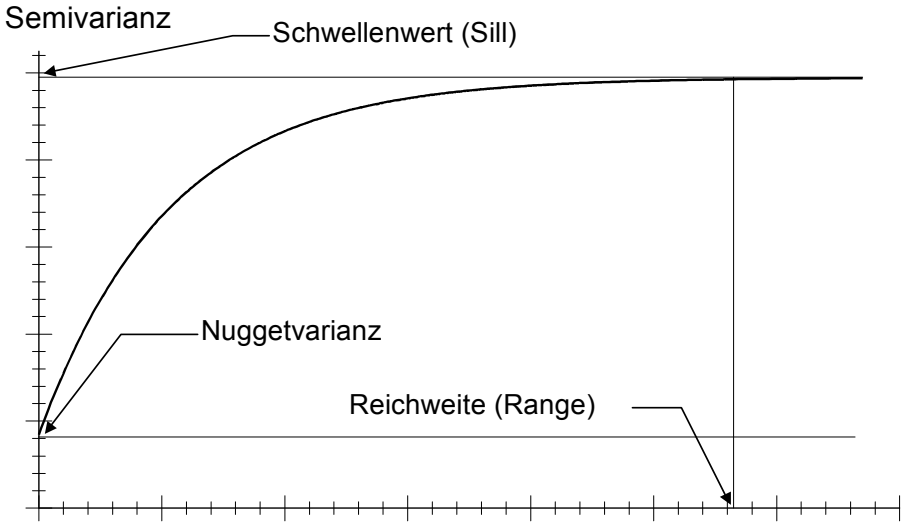

Abb. 13: Variogrammfunktion und ihre Parameter.

Variogramm-Modelle

Für die Beschreibung des Variogramms stehen verschiedene Modelle zur Verfügung, deren Anpassung an die empirischen Daten hier mit Hilfe des geostatistischen Programmpaketes Surfer interaktiv am Bildschirm erfolgte. Zum Einsatz kamen die folgenden Modelle, die in Abb. 14 graphisch dargestellt sind.

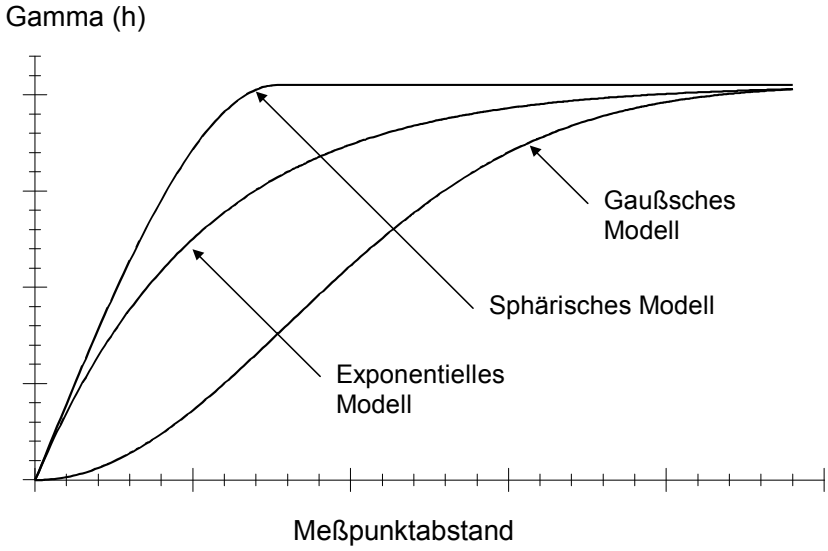

Abb. 14: Variogramm-Modelle.

2.7.8 Durchführung der Regionalisierung

Zunächst wurde der Datensatz aus der Testgebietsbeprobung mit dem BZE II-Datensatz vereinigt. Um zu überprüfen, ob die beiden Datensätze sich miteinander vereinigen lassen, wurde eine Clusteranalyse durchgeführt. Zur Vorbereitung darauf wurden die Werte der Variablen in den Tiefenstufen und Auflagehorizonten für jeden Standort transponiert. Das bedeutete, dass z.B. aus der Variable Kohlenstoffkonzentration vier neue Variablen entstanden, nämlich Kohlenstoffkonzentration des L+Of- und des Oh-Horizonts und Kohlenstoffkonzentration der Tiefenstufen 0-10 cm und 10-30 cm. Es war das Ziel, dass jeder Standort mit allen dort gemessenen Größen nur einmal in die Clusteranalyse einging. Die Variablen wurden per z-Transformation standardisiert und mittels einer Hauptkomponentenanalyse untersucht. Die Anzahl der dabei extrahierten Komponenten war gleich der Anzahl der Variablen. Daraus wurden alle Komponenten selektiert, deren Eigenwert > 1 war. Die selektierten Hauptkomponenten gingen dann in die Clusteranalyse ein. Für die Clusteranalyse wurde ein hierarchisches Clusterverfahren nach Ward (1963) mit nicht-überlappenden Clustern gewählt. Als Ähnlichkeitsmaß diente der Korrelationskoeffizient nach Pearson. Anhand des sich ergebenen Dendrogrammes wurde visuell beurteilt, inwieweit sich die Testgebiets- und BZE-Standorte zu neuen Untergruppen vereinigten.

Für die Regionalisierung der bodenchemischen Größen gingen dann die Originalwerte ein. Dazu wurde zunächst für jede Variable ein allgemeines lineares Modell (GLM) an den gesamten Datensatz (BZE II + Testgebietsbeprobungen) angepasst und parametrisiert. Dabei gingen intervallskalierte und kategorialskalierte Prädiktorvariablen ein. Dieses waren: die Höhe über dem Meeresspiegel, die Bodenformengruppe, der Bestandestyp, die Kalkung, die Hangneigung, die Hoch- und Rechtswerte der Gausskrügerkoordinaten, sowie ihre quadrierten Werte. Die Prädiktorvariable Kalkung wurde in vier Klassen unterteilt: Es wurden Standorte unterschieden, die potenziell als nicht zu kalken, bzw. als kalkungswürdig gelten und dieses mit der Information über die tatsächliche Kalkung der Standorte kombiniert.

Bei der Modellberechnung ist darauf zu achten, dass das Modell nicht überangepasst oder „overfitted“ wird. Letzteres würde zwar relativ gute Statistiken für die Anpassung des Modells an die gemessenen Punkte ergeben, hätte allerdings eine geringe Voraussagekraft für die Regionalisierung. Die Gefahr des „overfitting“ nimmt zu, wenn wie im vorliegenden Datensatz die Zahl der Regressoren groß und die der Beobachtungen klein ist. Um der Gefahr der Überanpassung vorzubeugen, wurden die Einflussfaktoren hinsichtlich ihres Einflusses auf das Gesamtmodell selektiert. Die Auswahl signifikanter Einflussfaktoren erfolgte per rückwärtsgewandter Selektionsmethode. Diese Auswahlmethode schließt zunächst alle vorab festgelegten Einflussfaktoren im Modell ein und löscht dann schrittweise nicht-signifikante Faktoren. Als Auswahlkriterium für die Beibehaltung, bzw. Löschung eines Einflussfaktors wurde das Bayessche Informationskriterium nach Schwarz (SBC) herangezogen.

Alternativ zum allgemeinen linearen Modell wurde auch eine Regression mittels partieller kleinster Quadrate (Partial Least Squares [pls-Regression]) durchgeführt. Diese Methode kombiniert das Verfahren der Hauptkomponentenanalyse mit der multiplen Regression und kann effektiv einer Überanpassung des Modells vorbeugen. Hier werden aus den Prädiktorvariablen neue latente Faktoren extrahiert, deren Varianz hinsichtlich der unabhängigen Variablen oder Faktoren maximiert wird. Die Anzahl der Faktoren wurde dabei mittels „leave-one-out“ Kreuzvalidierung und Modellvergleichstest nach Van der Voet ermittelt. Da sich in der Menge der Zielvariablen miteinander hoch-korrelierte Variablen befanden, z.B. Kohlenstoffkonzentration und C/N-Verhältnis, wurde die PLS-Regression für jede Zielvariable einzeln durchgeführt.

Als geostatistische Methode wurde das „ordinary“ Kriging getrennt für jedes Testgebiet angewandt. Als Eingangsdaten wurden alternativ die Residuen der vorhergesagten Werte von den Messwerten aus den allgemeinen linearen Modellen und der pls-Regressionen, sowie die original Messwerte genommen. Voraussetzung für das Kriging ist die Parametrisierung eines Variogrammmodells anhand der Semivarianz der Eingangsdaten. Es wurden nicht-lineare Variogramm Modelle angepasst. Die Auswahl des Modelles erfolgte automatisch aus einem vorgegebenen Satz an nicht-linearen Funktionen. Zunächst wurden alle Variogramme der Typen exponentiell, sphärisch sowie die Gausskurve an die Datensätze angepasst. Geschachtelte Modelle wurden nicht getestet. Diese weisen zwar eine höhere Flexibilität auf, aufgrund der geringen Zahl an Abstandsklassen in den Variogrammen erschien die Anpassung geschachtelter Modelle als zu unsicher. Anhand objektiver Kriterien wurde die am besten angepasste Kurve für jede Variable und jedes Testgebiet ausgewählt. Die Auswahlkriterien waren die Summe der Abweichungsquadrate, das (modifizierte) Informationskriterium nach Akaike sowie das Verhältnis der Variogrammparameter zur Semivarianz und räumlichen Ausdehnung der Daten. Nachdem pro Variable und Testgebiet ein Variogramm parametrisiert wurde, konnte das Kriging durchgeführt werden.

Insgesamt wurden alternativ fünf verschiedenen Verfahren zur Regionalisierung angewandt. Zum einen wurden die beiden Regressionansätze, das allgemeine lineare Modell und die Regression mittels partieller kleinster Quadrate, ohne geostatistische Komponente über den Gesamtdatenbestand Sachsens angewandt. Diese zwei Ansätze wurden jeweils mit Kriging ihrer Residuen kombiniert. Und letztlich wurde auch auf Testgebietsebene das Kriging mit den Originalwerten durchgeführt.

Die Güte der fünf verschiedenen Regionalisierungsansätze wurde mittels Kreuzvalidierung überprüft. Dabei wird jeweils eine Probe aus der Gesamtstichprobe weggenommen und ihr Wert mit der zu testenden Methode und der verbliebenen Stichprobe vorhergesagt. Anschließend wird die Probe wieder zur Stichprobe hinzugefügt und das ganze Verfahren wird für eine andere Probe wiederholt. Das ganze wurde für jede Probe (n = 54), jedes Verfahren (n = 5) und jede Variable (n = 56) durchgeführt, so dass als Ergebnis pro Probe, Verfahren und Variable ein Messwert und ein vorhergesagter Wert zur Verfügung standen. Aus den Abweichungen wurde die mittlere Abweichung (oder Bias) sowie die mittlere absolute Abweichung (MAE) berechnet und als

Prozent des Messwertes ausgedrückt (PBias und PMAE). Da in einigen Fällen in einzelnen Testgebieten die Anpassung eines Variogramms fehlschlug, standen letztlich doch nicht für alle Fälle Vorhersagewerte zur Verfügung. Um einen Vergleich der verschiedenen Verfahren zu ermöglichen, wurden dabei nur Fälle ausgewählt, bei denen für alle fünf Verfahren Werte vorlagen.

2.8 Punktauswahl

2.8.1 Mittelgebirge

Der Fokus bei der Auswahl der Standorte lag im Testgebiet Mittelgebirge eher auf Unterschieden im Wasserhaushalt und weniger in der Baumartenausstattung. Insgesamt wurden 15 Punkte unter Fichte und 3 Punkte unter Rotbuche mit unterschiedlichen Wasserhaushaltsformen und Standortsformengruppen auf den Lokalbodenformen Forchheimer Gneis-Anmoorstaugley (FoGG), Oelsengrunder Gneis-Humusstaugley (OgGG) sowie Oelsengrunder Gneis-Braunerde (OgGn) ausgewählt (Abb. 7, Tab. 7). Die Punkteverteilung orientierte sich an Fichtenreinbeständen mit einer Altersspanne zwischen 50 und 110 Jahren und an Buchenbeständen mit einer Altersspanne zwischen 140 und 160 Jahren. Die Lokalbodenform OgGG ist im Vergleich zu OgGn hydromorph ausgeprägt. Die Lokalbodenform FoGG weist aufgrund der Hydromorphie eine ausgeprägte Humusakkumulation (Anmoorigkeit) auf.

Tab. 7: Verteilung der Baumarten und deren Alter und Mischung im Oberstand in den einzelnen Lokalbodenformen inkl. Wasserhaushaltsform und Standortsformengruppe für die ausgewählten Standorte im Mittelgebirge.

Lfd. Nr.	n	Baumart	Baumalter	Mischung	Lokalbodenform	Wasserhaus-haltsform	Standortsfor-mengruppe
1	3	Fichte	53-111	85-100	FoGG	3z	NM1z
2	1	.	53	91	OgGG	4z	NM2z
3	2	.	98-102	100	OgGG	4z	NM2z
4	3	.	53-116	100	OgGn	-4	TM1
5	3	.	41-102	100	OgGn	-5	TM2
6	3	Buche	136-159	75-100	OgGn	-5	TM2
7	3	Fichte	53-121	78-100	OgGn	-6	TM3

2.8.2 Hügelland

Im Testgebiet Hügelland war das Hauptanliegen, Standorte unterschiedlicher Baumarten mit unterschiedlichem Wasserhaushalt zu untersuchen. Hierbei wurden 21 Untersuchungsflächen mit 9 Eichenbeständen und 12 Fichtenbestände ausgesucht. Das Alter der Bestände variierte von 36 bis 144 Jahren, wobei die Bestände mit Eichen deutlich jünger als die der Fichten waren. Der Mischungsanteil der Hauptbaumart lag zwischen 74 und 100 %. Alle ausgewählten Standorte verteilen sich gleichmäßig auf die vier Lokalbodenformen Grillenburger Löss-Braunstaugley (GbLB), Grillenburger Löss-Humusstaugley (GbLG), Grillenburger Löss-Staugley (GbLU) sowie Herzogswalder DeckLöss-Braunerde (HwLL) (Abb. 8, Tab. 8).

Tab. 8: Verteilung der Baumarten und deren Alter und Mischung im Oberstand in den einzelnen Lokalbodenformen inkl. Wasserhaushaltsform und Standortsformengruppe für die ausgewählten Standorte im Hügelland.

Lfd. Nr.	n	Baumart	Baumalter	Mischung	Lokalbodenform	Wasserhaus-haltsform	Standortsfor-mengruppe
1	3	Fichte	36-114	90-100	GbLB	-5	TM2w
2	3	Eiche	42-45	80-100	GbLB	-5	TM2w
3	1	Fichte	104	100	GbLG	4	NM2
4	2	Fichte	87-89	74-100	GbLG	4z	NM2z
5	3	Fichte	36-114	90-100	GbLU	5	WM2
6	3	Eiche	42-45	80-100	GbLU	5	WM2
7	3	Fichte	35-100	100	HwLL	-5	TM2
8	3	Eiche	45-144	81-100	HwLL	-5	TM2

2.8.3 Tiefland

Die als Hauptkriterium herangezogenen Unterscheidungsmerkmale der Standorte im Testgebiet Tiefland waren die Nährkraftstufe und der Wasserhaushalt. Dabei wurden 15 Probepunkte unter Beständen ausgewählt, deren Kiefernanteil zwischen 78 und 100 % variierte und deren Baumalter zwischen 47 und 110 Jahren lag. Die ausgewählten Kiefernbestände stocken auf den Lokalbodenformen Nedlitzer Sand-Braunerde (NeS), Biegener Sand-Rostpodsol (BiS), Bräunigker Grand-Braunerde (BkS), Stahnsdorfer Sand-Rostpodsol (StS), Stechauer Sand-Humusgley (ScSG) und Wiepersdorfer Sand-Graugley (WpSU) (Abb. 9, Tab. 9). Bei allen Lokalbodenformen handelt es sich um tiefgründige pleistozäne Sande. Die Palette reicht von den grundwasserfernen stark podsolierten (armen) BiS und StS über die grundwasserferne (mittlere) NeS, die wenig grundwasserbeeinflusste grobsandige BkS, die mäßig grundwasserbeeinflusste WpSU bis hin zum deutlich hydromorphen ScSG.

Tab. 9: Verteilung der Baumarten und deren Alter und Mischung im Oberstand in den einzelnen Lokalbodenformen inkl. Wasserhaushaltsform und Standortsformengruppe für die ausgewählten Standorte im Tiefland.

Lfd. Nr.	n	Baumart	Baumalter	Mischung	Lokalbodenform	Wasserhaus-haltsform	Standortsfor-mengruppe
1	1	Kiefer	47	100	BiS		TA2
2	3	.	55-59	100	BkS	6	TM2f
3	3	.	48-72	94-100	NeS		TM2
4	1	.	65	100	ScSG	4	NZ2
5	2	.	48-57	78-86	ScSG	4	NZ2
6	2	.	75	100	StS		TA2
7	3	.	59-110	100	WpSU	5	TZ1

2.9 Geländearbeiten

2.9.1 Plot-Design

Die Humus und Bodenprobenahme in den Testgebieten orientierte sich an der Arbeitsanleitung für die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (Wellbrock et al. 2006). Untersuchungen der Bodenphysik und der Bodenchemie verlangten ein unterschiedliches Vorgehen während der Probenahme. Als Standardverfahren zur Beprobung wurde die Satellitenbeprobung mit dem Stichprobenmittelpunkt als Referenzpunkt angewandt. Ausgehend vom Stichprobenmittelpunkt wurden in einem Abstand von 12 m, beginnend im Norden, in einem Winkel von 50 Gon 8 Satelliten festgelegt. Konnte ein Satellitenpunkt aufgrund der Standortsituation (Totholz, Felsvorsprung, wassergefüllte Depression etc.) nicht beprobt werden, musste der Satellitenpunkt verlegt werden, was durch Spiegelung des Punktes um 2 m nach innen oder nach außen geschah.

2.9.2 Erfassung der Aufnahmesituation

Für jeden Standort erfolgte die Aufnahme der Bestockung und des Schlussgrads der einzelnen Baumschichten. Falls vorhanden sind bodenverändernde Einflüsse aus forstlicher Bewirtschaftung und Bodenbearbeitung sowie sonstige biotische und abiotische Ursachen aufgenommen worden. Darüber hinaus wurde die Reliefsituation (Reliefform, Lage im Relief, Hangneigung, Hangrichtung) beschrieben. Des Weiteren wurde auf einer Fläche von 452 m^2, mit dem Stichprobenmittelpunkt im Zentrum und den 8 Satelliten als äußere Umgrenzung, der prozentuale, schichtbezogene Deckungsgrad sämtlicher jeweils vorhandener Pflanzenarten der vegetationskundlichen Pflanzendecke geschätzt. Die Aufnahmen erfolgten für die Straten der

Krautschicht (Gefäßpflanze ohne Höhenbegrenzung oder höherwüchsigen Gehölz- und Kletterpflanzen < 5 m), der Strauchschicht (Gehölze < 5 m) und der Baumschicht (Gehölze > 5 m getrennt nach Ober- und Unterstand).

2.9.3 Profilbeschreibung

Am Stichprobenmittelpunkt ist ein Bodenprofil mit einer max. Tiefe von 50 cm angelegt worden. Das Bodenprofil wurde entsprechend der BZE II-Aufnahmeanleitung angesprochen. Die Profilansprache umfasste die Zuordnung zum Bodentyp und die Kennzeichnung der Haupt- und Zusatzsymbole. Darüber hinaus wurde an den Profilen für alle Horizonte die Mächtigkeit, die Bodenfarbe, die Textur, der Humus- und Kalkgehalt, die Hydromorphie, das Bodengefüge, die Durchwurzelungsintensität von Fein- und Grobwurzeln und der Anteil der Grobbodenfraktionen erfasst. Die Feinbodenart wurde mittels Fingerprobe bestimmt. Der Skelettanteil wurde am Profil geschätzt.

2.9.4 Probeentnahme

An allen 8 Satellitenpunkten fand eine Beprobung des Auflagehumus und des Mineralbodens statt. Vom Auflagehumus wurden mittels spezieller Stechzylinder (Ø 80 cm) volumenbezogene Proben entnommen. Für jeden Satellitenpunkt erfolgte nach Erfassung der Streuart und Aufnahme der Mächtigkeit der Auflagehorizonte die Dokumentation der Humusformen entsprechend der BZE II-Arbeitsanleitung. Eine Trennung der Auflagehorizonte L und Of fand nicht statt. Der Oh-Horizont wurde separat verpackt. Grüne Vegetationsteile und lebende Wurzeln wurden entfernt. Äste, Zweige und Fruchtschalen usw. verblieben in der Probe. Die Beprobung des Mineralbodens erfolgte in den Tiefenstufen 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm an allen 8 Satelliten mittels zweimaligen Einschlagens eines Nmin-Bohrers (Abb. 15).

Abb. 15: Darstellung eines Nmin-Bohrers.

2.9.5 Transektkartierung von Humusformen

Vom Inneren einer untersuchten Standorteinheit hin zu einer angrenzenden kontrastierenden Standorteinheit wurden Transekte angelegt. Die Standorteinheiten beziehen sich auf die Lokalbodenformen unter Berücksichtigung der jeweiligen Standortsformengruppe und der Wasserhaushaltsform. Je Lokalbodenform bzw. Standortseinheit wurden 2 Transekte über eine Länge von 100 m angelegt, wobei 2 Aufnahmepunkte in der inneren (bei 0 m und 25 m) und zwei Aufnahmepunkte in der angrenzende Standortseinheit (bei 75 m und 100 m) angelegt wurden. An allen Aufnahmepunkten erfolgte die Kartierung der Humusform und Messung der Auflagemächtigkeit.

3 Zustand und Veränderungen

Im folgenden Kapitel wird anhand der entscheidenden Indikatoren (z.B. Humusform) bzw. Indikatorengruppen (Stickstoffstatus) der Zustand, aber auch dessen Veränderung an den BZE II- und den Level II-Standorten beschrieben. Zur Darstellung der zeitlichen Veränderungen dienen die Aufnahmen von zwei Untersuchungszeitpunkten. Die Ersterhebung der BZE auf dem 8 x 8 km Raster erfolgte 1992 (BZE I). Nach 14 Jahren wurde 2006 die Wiederholungsinventur an den gleichen Rasterpunkten durchgeführt (BZE II). Dazu wurden die Analysedaten der Level II-Standorte den Datenkollektiven der BZE I und BZE II zugeordnet.

3.1 Ausprägung und Veränderung der organischen Auflage

3.1.1 Morphologische Humusformen und ihre Eigenschaften

Die Humusform entsteht durch ein Zusammenspiel aus standörtlichen Eigenschaften, Bestockung, forstlicher Bewirtschaftung und atmosphärischer Deposition. Eine Veränderung der Humusform und deren chemischen Eigenschaften gibt daher Auskunft über die Einflussfaktoren.

In Sachsen hat eine Veränderung zu besseren Humusformen seit der BZE I stattgefunden (Tab. 10). Der Anteil der Humusform Rohhumus hat deutlich von 38,5 % auf 13,2 % abgenommen. Im Gegenzug haben Moder und Mull als Humusform zugenommen. Standorte mit der Humusform Rohhumus haben sich zumeist in die Form Moder entwickelt (25 %). Nur 11 % der Standorte wurden bei der BZE I und der BZE II als Rohhumus angesprochen (Tab. 11). Der Typ Moder wurde in 53 % aller Fälle bei der BZE I und BZE II als solcher angesprochen. Noch deutlicher wird dieser Trend, wenn man sich nur die Humusform Moder ansieht. Der Anteil des rohhumusartigen Moders ist deutlich zurückgegangen, während der Anteil des typischen Moders zugenommen hat.

Tab. 10: Veränderung der Humusformen (nur: Mull, Moder, Rohhumus) zwischen BZE I und BZE II.

Humusform	Anteil [%]	
	BZE I	BZE II
Mull	1,5	7,8
Moder	60,0	77,5
Rohhumus	38,5	13,2
Feuchtmoder	-	1,5

Die Unterschiede der C/N-Verhältnisse zwischen den morphologischen Humusformen haben deutlich abgenommen, bzw. sind nicht mehr vorhanden (Abb. 16). Auffällig sind die sehr weiten C/N-Verhältnisse der Humusform Mull bei der BZE II. Da bei der BZE II kleine Totholzanteile bis 2 cm mit der Auflage beprobt wurden, kann die geänderte Probenahmevorschrift zu einer Veränderung der C/N-Verhältnisse geführt haben.

Tab. 11: Veränderung der Humusform von der BZE I zur BZE II.

Veränderung der Humusform von BZE I zu BZE II	Anzahl	Anteil [%] zum Gesamtkollektiv
Mull		
Keine Veränderung	3	4,7
Moder		
Keine Veränderung	34	53,1
Veränderung von Moder zu Mull	2	3,1
Veränderung von Moder zu Rohhumus	2	3,1
Rohhumus		
Keine Veränderung	7	10,9
Veränderung von Rohhumus zu Moder	16	25
Veränderung von Rohhumus zu Mull	1	1,6
Veränderung von Rohhumus zu Feuchtmoder	1	1,6

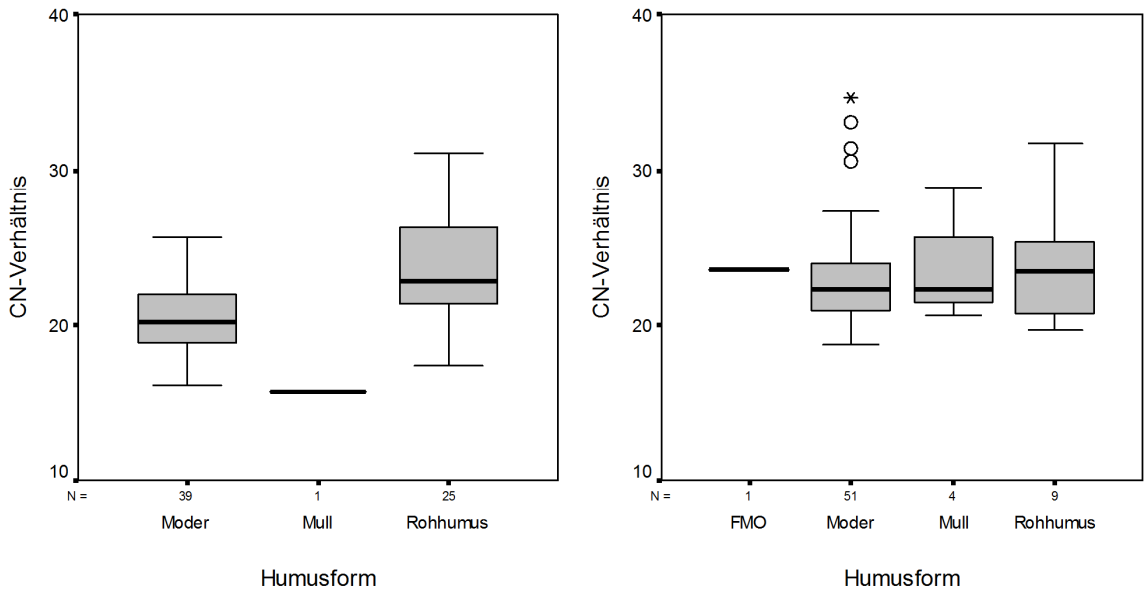

Abb. 16: Veränderung C/N-Verhältnisse stratifiziert nach Humusformen im Vergleich BZE I und BZE II.

3.1.2 Horizontmächtigkeit der organischen Auflage

Die Mächtigkeit der Auflagehorizonte wird zum einen von Art und Menge der Streu- und Huminstoffe, die den Humuskörper aufbauen, zum anderen von der Leistung der Bodenorganismen, die die organische Substanz zersetzen gesteuert. Art und Menge der Streu wird durch Streuproduktion und Baumartenzusammensetzung des Bestandes beeinflusst, wohingegen die Produktivität der Bodenorganismen von ihren Lebensbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, Luft, Nährstoffversorgung) abhängig ist.

Die mittlere Mächtigkeit des L+Of-Horizonts hat seit der Erstinventur um fast 40 % signifikant abgenommen ($P < 0{,}0001$; Tab. 12, Tab. 13) Auffällig ist weiterhin, dass sowohl der kleinste als auch der größte Wert der Wiederholungsinventur im Vergleich zur Erstinventur deutlich höher ausfiel. Eine Erklärung für die großen Unterschiede der gemittelten Auflagemächtigkeit könnte der Beprobungszeitpunkt sein, da v.a. die Mächtigkeit des L-Horizonts, z.T. auch die des Of-Horizonts, im großen Maße jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt. Der Mittelwertvergleich der Oh-Horizonte ergab keine signifikanten Unterschiede. Daher ist auch nicht von einer unsachgemäßen Trennung der Auflagehorizonte auszugehen.

Tab. 12: Statistische Kennwerte der Auflagemächtigkeit (cm) der BZE I für die verschiedenen Auflagehorizonte.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	2,0	9,0	5,0	4,8	1,5	77
Oh	0,5	6,0	3,0	2,8	1,4	71

Tab. 13: Statistische Kennwerte der Auflagemächtigkeit (cm) der BZE II für die verschiedenen Auflagehorizonte.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	0,3	6,1	2,9	2,9	1,0	82
Oh	0,4	6,4	2,5	2,6	1,1	79

3.1.3 Fazit zur Ausprägung und Veränderung der organsichen Auflage

Der Anteil der Humusform Rohhumus hat zugunsten der ökologisch besserern Humusformen Moder und Mull abgenommen. Noch deutlicher wird dieser Trend, wenn man sich nur die Humusform Moder ansieht. Allerdings sind die C/N-Verhältnisse zwischen den Inventuren weiter geworden. Ursache könnte eine veränderte Vorschrift der Beprobung liegen, da während der BZE II Fraktion > 2 cm bis 2 mm beprobt wurden, wodurch der Anteil holzreicher Bestandteile und somit das C/N-Verhältnis zunahm. Zu dem Trend der Verbesserung der Humusformen passt die Abnahme der mittleren Mächtigkeit des L+Of-Horizonts. Sie hat seit der Erstinventur um fast 40 % signifikant abgenommen.

3.2 Kohlenstoff

3.2.1 Kohlenstoffstatus und dessen Veränderung

Am aktiven Kohlenstoff (C)-Kreislauf nehmen etwa 80 % des im Boden gebundenen terrestrischen C teil. Über die Bodenatmung und Mineralisationsprozesse wird gebundener C in die Atmosphäre überführt. Dieser Prozess ist jedoch nicht vollständig, da ein Teil des nicht mineralisierten C im System langfristig verbleibt. Über einen längeren Zeitraum stellt sich jedoch bei konstanten Umweltbedingungen ein Gleichgewicht zwischen Anlieferung und Abbau ein, was zur Ausbildung eines charakteristischen Humusgehaltes führt. Die organische Substanz (oder auch Humus) enthält entsprechend ihrer Substanzklasse zwischen 40 und 70 % C. Der mittlere Humusgehalt in der organischen Auflage und im Mineralboden variiert dabei beträchtlich und unterliegt darüber hinaus jahreszeitlichen Schwankungen. Obwohl sich die organischen Bodensubstanz zu einem nur geringen Massenanteil in den mineralischen Oberböden wiederfindet, hat sie dennoch einen entscheidenden Einfluss auf viele Funktionen des Bodens. Aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche ist sie ein wichtiger Sorbent für Nährelemente in Waldökosystemen, indem sie zur Erhöhung der Kationenaustauschkapazität beiträgt. Darüber hinaus hat sie starken Einfluss auf die Entwicklung einer stabilen Bodenstruktur, indem sie zur Gefüge- und Aggregatbildung beiträgt. Die organische Bodensubstanz sorgt zudem durch Bereitstellung mineralisierter Pflanzenreste für Nachschub an wichtigen Nährstoffen für Mikroorganismen und Pflanzen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die C-Gehalte im L+Of-Horizont zwar deutlich höher waren als die des Oh-Horizonts, jedoch fanden sich im Mineralboden noch geringere C-Gehalte. Die Tiefenverteilung der C-Gehalte folgt dem typischen Verlauf von abnehmenden C-Gehalten mit zunehmender Tiefe (Tab. 14, Tab. 15). Hingegen nahm die Variabilität der Werte mit der Tiefe zu. Im Vergleich zur organischen Auflage streuten die C-Gehalte jedoch weniger stark. Sowohl im L+Of-Horizont, als auch im Oh-Horizont nahmen zwar die mittleren C-Gehalte zwischen Erst- und Wiederholungsinventur ab, jedoch waren diese Änderungen nicht signifikant. Im Vergleich zur

organischen Auflage ergab sich für den Mineralboden ein entgegengesetzter Verlauf. So stiegen die über alle Tiefenstufen gemittelten C-Gehalte zwischen BZE I und BZE II an. Signifikant waren die Veränderungen jedoch nur in der unteren Tiefenstufe (P = 0,0166).

Tab. 14: Statistische Kennwerte der Kohlenstoffgehalte (g kg^{-1}) der BZE I für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	227,36	495,90	422,60	410,92	49,08	77
Oh	155,62	445,83	329,10	323,55	62,78	71
0-5 cm	7,50	107,10	51,60	52,17	24,10	79
5-10 cm	4,30	75,70	23,40	27,11	15,05	79
10-30 cm	3,20	51,30	11,98	13,90	8,89	79

Tab. 15: Statistische Kennwerte der Kohlenstoffgehalte (g kg^{-1}) der BZE II für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	263,30	621,70	419,05	408,49	54,01	82
Oh	140,30	432,00	299,90	303,11	67,60	79
0-5 cm	11,72	172,20	55,15	58,27	29,16	82
5-10 cm	6,72	86,74	24,57	28,31	15,43	82
10-30 cm	3,88	55,91	14,27	18,14	11,81	82

Die oberen 30 cm des Mineralbodens speichern deutlich mehr C als die organische Auflage, wobei der Unterschied zwischen Auflage und Mineralboden bei der Wiederholungsinventur stärker ausgeprägt ist (Abb. 17). Zum Zeitpunkt der Erstinventur war der C-Speicher in den oberen 30 cm des Mineralbodens um 144 % größer als in der organischen Auflage (Tab. 16, Tab. 17). Während der Wiederholungsinventur erhöhten sich die C-Vorräte des Mineralbodens um weitere 55 %.

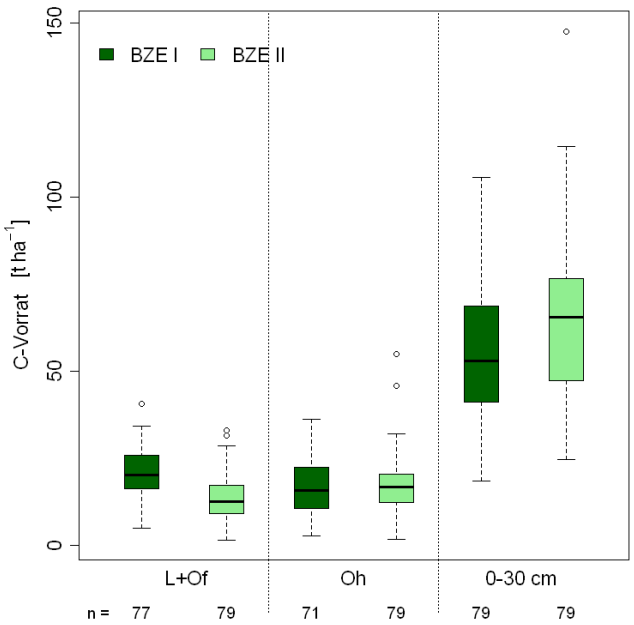

Abb. 17: Gesamtvorräte von Kohlenstoff in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl).

Tab. 16: Statistische Kennwerte der BZE I-Kohlenstoffvorräte (t ha^{-1}) für die organische Auflage und den Mineralboden bis in eine Tiefe von 30 cm.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
Auflage	8,82	63,98	35,56	35,10	12,03	77
0-30 cm	18,56	105,60	52,97	54,75	20,37	79

Tab. 17: Statistische Kennwerte der BZE II-Kohlenstoffvorräte (t ha^{-1}) für die organische Auflage und den Mineralboden bis in eine Tiefe von 30 cm.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
Auflage	4,70	82,82	28,90	30,13	14,65	77
0-30 cm	24,64	147,59	65,56	64,52	22,82	79

Während der Erstinventur waren die C-Vorräte im L+Of-Horizont höher als die der Wiederholungsinventur. Für den Oh-Horizont ergaben sich jedoch höherer C-Vorräte für die BZE II. Im L+Of-Horizont führte der zurückgehende C-Gehalt mit gleichzeitiger Abnahme der mittleren Horizontmächtigkeit zur Abnahme der C-Vorräte zum Zeitpunkt der Wiederholungsinventur. Im Oh-Horizont erhöhten sich die C-Vorräte trotz einer Abnahme der C-Gehalte und des Schwunds der Horizontmächtigkeit gegenüber der Erstinventur geringfügig. Dementsprechend muss sich die Dichte des Oh-Horizonts erhöht haben. Dennoch waren die Änderungen sowohl im L+Of- als auch im Oh-Horizont nicht signifikant. Allerdings ergab sich bei Betrachtung der gesamten organischen Auflage eine signifikante Abnahme der C-Vorräte

gegenüber der Erstinventur ($P = 0{,}0002$). Es gab nicht nur deutliche Unterschiede zwischen der organischer Auflage und dem Mineralboden, auch die C Vorräte im Mineralboden zwischen beiden Inventuren stiegen signifikant an ($P < 0{,}0001$; Abb. 18). Darüber hinaus zeigte der Vergleich der Min.- und Max.-Werte sowie der Standardabweichung zwischen organischer Auflage und Mineralboden, dass die Variabilität im Mineralboden höher ist.

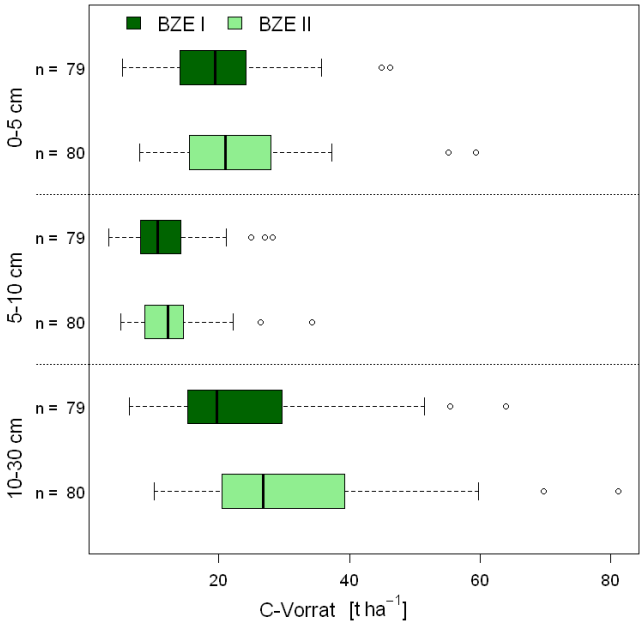

Abb. 18: Tiefenprofil der Kohlenstoffvorräte im Mineralboden dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Tiefe (n = Stichprobenanzahl).

3.2.2 Bewertung der Kohlenstoffvorräte

Die Bewertung der C-Vorräte in der organischen Auflage (L+Of- und Oh-Horizont) und in den oberen 30 cm des Mineralbodens für die Standorte wurde anhand von Perzentilgrenzen vorgenommen. Die Anzahl der Standorte mit sehr geringen und geringen C-Vorräten in der organischen Auflage hat zum Zeitpunkt der BZE II zugenommen (Anhang: Tab. I-1). Andererseits gab es zur Erstinventur mehr Standorte (> 50 %) mit hohen C-Vorräten. Die Standortanzahl mit mittleren und sehr hohen C-Vorräten hat sich nicht wesentlich verändert. Die räumliche Verteilung der Werte verdeutlicht darüber hinaus, dass für viele Standorte zum Zeitpunkt der Erstinventur in den mittleren Lagen z.T. auch in den Hochlagen des Vogtlandes und des Erzgebirges die C-Vorräte der organischen Auflage am höchsten waren (Anhang: Abb. I-1). Standorte mit sehr geringen C-Vorräten fanden sich hingegen häufig auf der Lausitzer Platte und in der Elbtalzone. Die verbleibenden Standorte der Mittelgebirgslagen und des Hügellands werden durch moderate C Vorräte bestimmt. Das Tiefland ist von einer hohen Variabilität der C-Vorräte in der organischen Auflage geprägt. Westsachsen wird von Standorten mit relativ hohen C-Vorräten geprägt, im Osten hingegen ist kein klares Muster zu erkennen. Für die

Wiederholungsinventur kann weder für West- noch für Ostsachsen ein räumliches Muster abgeleitet werden (Anhang: Abb. I-2). Standorte mit geringen C-Vorräten in der organischen Auflage verteilen sich relativ gleichmäßig über alle Regionen und Höhenstufen Sachsens. Hohe Werte fanden sich in südlichen Mittelgebirgslagen, jedoch weniger ausgeprägt als zum Zeitpunkt der BZE I. Mehrere Standorte mit hohen C-Vorräten befanden sich im Nordosten des Untersuchungsgebietes. Unter Berücksichtigung der Vorratsänderungen wird deutlich, dass v.a. die mittleren Mittelgebirgslagen im Vogtland und im westlichen Erzgebirge sowie im Niederlausitzer-Altmoränen-Land besonders stark vom Abbau der organischen Auflage betroffen waren (Anhang: Abb. I-3). Weniger ausgeprägt war der Humusschwund im östlichen Erzgebirge, im Lausitzer Löss-Hügelland und im Dübener-Altmoränen-Land. Moderate bis hohe Änderungen der C-Vorräte in der organischen Auflage wurden für die Lausitzer Platte und für die Elbtalzone festgestellt.

Die C-Vorräte des Mineralbodens haben sich an vielen Standorten z.T. drastisch geändert. Während die Standorte mit sehr geringen C-Vorräten um 300 % zwischen beiden Inventuren abnahmen, erhöhte sich Anzahl von Standorten mit hohen und sehr hohen C-Vorräten (Anhang: Tab. I-10). Die Verteilung der regionalen C-Vorräte im Mineralboden zur BZE I zeigt ein sehr heterogenes Bild (Anhang: Abb. I-46). Mehrere Standorte mit geringen C-Vorräten befinden sich auf den eher sandigen Böden des Dübener-Niederlausitzer-Altmoränen-Landes. Die mittleren und höheren Mittelgebirgslagen weisen tendenziell höhere C-Vorräte auf. Für die unteren Mittelgebirgslagen und das Hügelland lässt sich kein eindeutiger Trend nachweisen. Die C-Vorräte zwischen 0-30 cm des Mineralbodens waren zur Wiederholungsinventur sehr heterogen verteilt (Anhang: Abb. I-47). Generell dominierten Standorte mit relativ hohen C-Vorräten, wobei sich vor allem im nordöstlichen und im südwestlichen Sachsen Standorte mit höheren und niedrigeren Werten häufig abwechseln. Auf den meisten Standorten erfolgte eine Zunahme der C-Vorräte ungeachtet ihrer regionalen Verteilung (Anhang: Abb. I-48). Besonders deutliche Zunahmen wurden für das nordwestliche und das östliche Sachsen gefunden. Allerdings gibt es auch im südwestlichen Sachsen einige Standorte mit hohen positiven Änderungsraten. Standorte mit moderaten Zunahmen der C-Vorräte erstrecken sich über ganz Sachsen. Standorte mit einer negativen Änderung kommen selten und ebenfalls über ganz Sachsen verstreut vor.

3.2.3 Fazit zum Kohlenstoffstatus

In beiden Auflagehorizonten nahmen die mittleren C-Gehalte seit der Erstinventur ab. Trotz sinkender C-Gehalte im L+Of- und Oh-Horizont und einem Schwund der mittleren Horizontmächtigkeit im L+Of-Horizont erhöhten sich die C-Vorräte der gesamten organischen Auflage (L+Of und Oh) signifikant gegenüber der Erstinventur. Im Vergleich zur organischen Auflage ergab sich für den Mineralboden ein entgegengesetzter Trend mit ansteigenden C-Gehalten in allen Tiefenstufen. In den oberen 30 cm des Mineralbodens wurde deutlich mehr C gespeichert als in der organischen Auflage, wobei der Unterschied zwischen beiden

Kompartimenten mit der Wiederholungsinventur stärker ausgeprägt war. Während die Anzahl der Standorte mit geringen C-Vorräten in der organischen Auflage zum Zeitpunkt der BZE II zunahm, hat sich die Standortanzahl mit mittleren und sehr hohen C-Vorräten nicht wesentlich verändert. Besonders stark vom Abbau der organischen Auflage betroffen waren die mittleren Berglagen im Vogtland und im westlichen Erzgebirge sowie im Niederlausitzer-Altmoränen-Land. Die C-Vorräte des Mineralbodens haben sich an vielen Standorten z.T. drastisch verändert, jedoch zeigt die Verteilung der regionalen C-Vorräte zu beiden Inventurzeitpunkten ein heterogenes Muster. Auf den meisten Standorten erfolgte eine Zunahme der C-Vorräte, wobei deutliche positive Änderungen im nordwestlichen und östlichen Sachsen gefunden wurden.

3.3 Stickstoff

Als ein essenzieller Makronährstoff wird N hauptsächlich in Photosyntheseprodukte eingebaut und dort zur Bildung von Eiweißen genutzt. Der Gesamtvorrat an mineralisiertem N ergibt sich aus der Summe von Nitrat, Nitrit und Ammonium im Boden. Einträge von Stickstoffverbindungen in die Böden von Waldökosystemen sind jedoch als problematisch zu bewerten, da sie in den vergangenen Jahrzehnten stark zugenommen haben. Mit erhöhten N-Einträgen in den Boden sind Änderungen im Bodenzustand verbunden, was das Rückkopplungssystem zwischen Boden und Stoffwechselaktivitäten von Organismen beeinflusst. Die Waldböden Deutschlands enthalten im Durschnitt 9 t ha^{-1}, davon sind 12 % in der organischen Auflage und 50 % in den oberen 30 cm des Mineralbodens zu finden (Ulrich 1995). Die Auswertung der BZE-Daten ergab eine vergleichbare Größenordnung für die Waldböden in Sachsen.

Die N-Gehalte der organischen Auflage waren zu beiden Inventurzeitpunkten im L+Of-Horizont höher als im Oh-Horizont (Tab. 18, Tab. 19). Deutlich niedrigere N-Gehalte wurden im Mineralboden festgestellt. So zeigt der Tiefenverlauf der N-Gehalte im Mineralboden eine Abnahme mit zunehmender Tiefe zu beiden Inventurzeitpunkten. Die N-Gehalte der organischen Auflage sanken zwischen beiden Inventuren sowohl im L+Of-Horizont als auch im Oh-Horizont, wobei sich signifikante Veränderungen lediglich im L+Of-Horiziont ergaben ($P < 0{,}0001$). In allen Tiefenstufen des Minaralbodens waren die N-Gehalte zur Wiederholungsinventur höher als zur Erstinventur. Signifikante Unterschiede wurden lediglich für die unterste Tiefenstufe festgestellt ($P = 0{,}0317$).

Tab. 18: Statistische Kennwerte der Stickstoffgehalte (g kg^{-1}) der BZE I für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	9,64	23,69	19,90	19,11	3,12	77
Oh	7,63	20,09	14,86	14,68	2,92	71
0-5 cm	0,29	6,60	2,20	2,28	1,21	79
5-10 cm	0,20	5,10	1,00	1,20	0,82	79
10-30 cm	0,00	2,00	0,60	0,68	0,45	79

Tab. 19: Statistische Kennwerte der Stickstoffgehalte (g kg^{-1}) der BZE II für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	9,61	27,00	17,29	16,64	3,13	82
Oh	4,90	20,71	14,43	13,85	3,46	79
0-5 cm	0,38	10,63	2,32	2,51	1,52	82
5-10 cm	0,25	5,51	1,17	1,26	0,79	82
10-30 cm	0,15	2,88	0,74	0,86	0,54	82

Der N-Vorrat, der im Mineralboden bis in eine Tiefe von 30 cm gespeichert ist, betrug fast die doppelte Menge des N-Vorrates der gesamten organischen Auflage (Abb. 19).

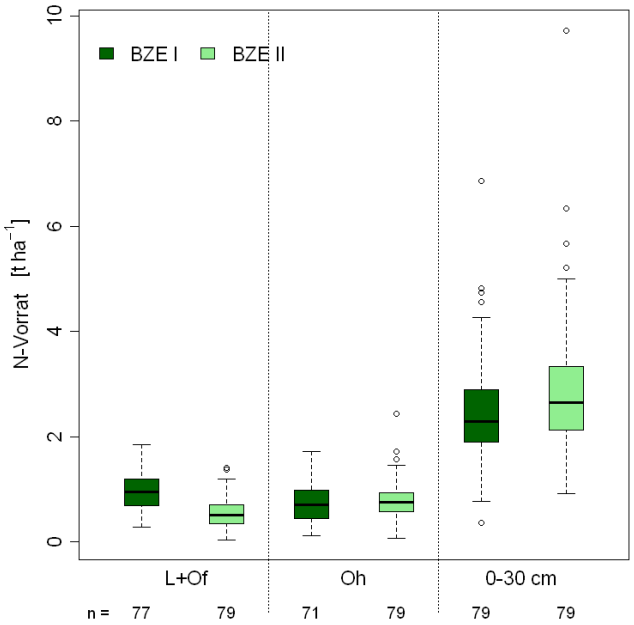

Abb. 19: Gesamtvorräte von Stickstoff in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl).

Einhergehend mit einer schwindenden Humusmächtigkeit (Kapitel 3.1.2) und sinkenden N-Gehalten im Vergleich zur Erstinventur ergaben sich für die BZE II signifikant geringere N-Vorräte in der organischen Auflage ($P < 0{,}0001$; Tab. 20, Tab. 21). Jedoch spiegeln sich die höheren N-Gehalte in allen Tiefenstufen des Mineralbodens in einem signifikanten Anstieg der aufsummierten N-Vorräte zum Zeitpunkt der BZE II wieder ($P < 0{,}0143$; Abb. 20). Somit steht den erhöhten N-Vorräten im Mineralboden ein Schwund der N-Vorräte in der organischen Auflage gegenüber.

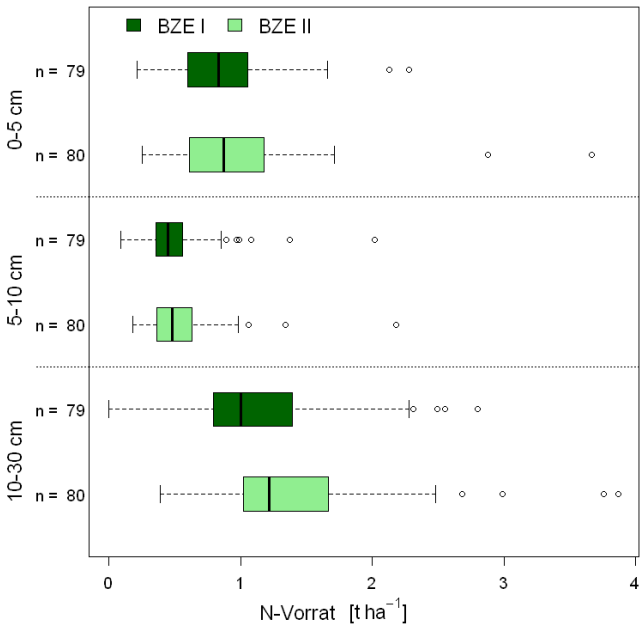

Abb. 20: Tiefenprofil der Stickstoffvorräte im Mineralboden dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Tiefe (n = Stichprobenanzahl).

Tab. 20: Statistische Kennwerte der Stickstoffvorräte (t ha^{-1}) der BZE I für die organische Auflage und für den Mineralboden bis in eine Tiefe von 30 cm.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
Auflage	0,48	3,00	1,65	1,61	0,56	77
0-30 cm	0,36	6,85	2,28	2,46	1,05	79

Tab. 21: Statistische Kennwerte der Stickstoffvorräte (t ha^{-1}) der BZE II für die organische Auflage und für den Mineralboden bis in eine Tiefe von 30 cm.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
Auflage	0,23	3,51	1,26	1,29	0,63	77
0-30 cm	0,91	9,72	2,65	2,90	1,30	79

3.3.1 Bewertung der Stickstoffvorräte

Auf Grundlage von Perzentilgrenzen erfolgte die Bewertung von Standorten hinsichtlich ihrer N-Vorräte in der organischen Auflage (L+Of- und Oh-Horizont) und in den oberen 30 cm des Mineralbodens. Während zur BZE I noch relativ wenige Standorte geringe N-Vorräte in der organischen Auflage aufwiesen, verdoppelte sich deren Anzahl zur Wiederholungsinventur (Anhang: Tab. I-2). Andererseits nahm die Anzahl der Standorte mit sehr hohen N-Vorräten um 60 % seit der Erstinventur ab. Eine Abnahme von Standorte mit erhöhten N-Vorräten wird auch bei Betrachtung der räumlichen Verteilung der N-Vorräte in der organischen Auflage deutlich. Die Werte zur Erstinventur sind an vielen untersuchten Standorten im Vergleich zur Wiederholungsinventur relativ hoch, wobei fast flächendeckend die höchsten N-Vorräte in den mittleren und höheren Berglagen des Erzgebirges sowie im Erzgebirgsvorland vorkamen (Anhang: Abb. I-6). Die meisten Standorte mit relativ geringen N-Vorräten befinden sich im Niederlausitzer-Altmoränen-Land. Ein sehr viel heterogeneres Bild zeigt die räumliche Verteilung der N-Vorräte zum Zeitpunkt der BZE II (Anhang: Abb. I-7). In fast allen Regionen Sachsens kam es zwischen den Bodeninventuren zu einer Abnahme der N-Vorräte (Anhang: Abb. I-8). Besonders deutlich ausgeprägt ist dies in den mittleren und höheren Berglagen sowie im Lausitzer-Löss-Hügelland. Deutliche Vorratszunahmen traten nur punktuell auf und zeigten keine Präferenz für bestimme Wuchsgebiete.

Bezugnehmend auf die oberen 30 cm des Mineralbodens zeigt sich, dass sich die Anzahl von Standorten mit sehr hohen oder sehr niedrigen N-Vorräten im Mineralboden seit der BZE I nur wenig verändert hat (Anhang: Tab. I-11). Größere Änderungen in der Standortanzahl erfolgten für geringe und hohe N-Vorräte. Während die Anzahl der Standorte mit geringen N-Vorräte um ca. 50 % zurückging, verdoppelte sich nahezu die Standortsanzahl für hohe N-Vorräte. Demnach dominierten zur Erstinventur N-limitierte Standorte, wobei ein räumlicher Schwerpunkt im Dübener-Niederlausitzer-Altmoränen-Land besteht (Anhang: Abb. I-51). In den unteren Berglagen und im Hügelland ist die Verteilung von Standorten mit relativ hohen N-Vorräten stärker als in anderen Regionen ausgeprägt. Die Verteilung der N-Vorräte im Mineralboden zur Wiederholungsinventur zeigt ein ähnlich heterogenes Bild wie zur BZE I, jedoch nahm die Häufigkeit N-reicher Standorte zu (Anhang: Abb. I-52). Insgesamt zeichnet sich für ganz Sachsen ein klarer Trend in Richtung N-Zunahme ab, ungeachtet ob die Standorte geringere oder höhere Ausgangswerte besaßen (Anhang: Abb. I-53). Darüber hinaus gab es kaum Standorte mit Vorratsabnahmen.

3.3.2 Fazit zum Stickstoffstatus

Einhergehend mit einer schwindenden Humusmächtigkeit und sinkenden N-Gehalten ergaben sich für die Wiederholungsinventur signifikant geringere N-Vorräte in der organischen Auflage. Während sich die Anzahl von Standorten mit geringen N-Vorräten in der organischen Auflage mit der BZE II verdoppelte, nahm die Anzahl der Standorte mit sehr hohen N-Vorräten ab. In fast

allen Regionen Sachsens sanken seit der BZE I die N-Vorräte, wobei dies besonders in den mittleren und höheren Berglagen sowie im Lausitzer-Löss-Hügelland auffällig war. Deutliche Vorratszunahmen erfolgten v.a. im Niederlausitzer-Altmoränen-Land. Dem N-Schwund in der Auflage steht jedoch ein Anstieg der N-Vorräte im Mineralboden gegenüber. Dieser kann auf höhere N-Gehalte in allen Tiefenstufen zurückgeführt werden. Während die Anzahl der Standorte mit geringen N-Vorräten mit der Wiederholungsinventur zurückging, verdoppelte sich nahezu die Standortsanzahl für hohe N-Vorräte. Insgesamt zeichnet sich für Sachsen ein klarer Trend in Richtung N-Zunahme ab, ungeachtet ob die Standorte geringere oder höhere Ausgangswerte besaßen. Es gab kaum Standorte mit Vorratsabnahmen.

3.4 C/N-Verhältnisse

3.4.1 Status der C/N-Verhältnisse und dessen Veränderung

Das C/N-Verhältnis als Quotient aus C- und N-Gehalt ist ein einfach zu bestimmender und gängiger Indikator, der für die N-Verfügbarkeit von Pflanzen und Mikroorganismen herangezogen werden kann. Für viele Pflanzenarten steht bei einem C/N-Verhältnis < 20 genügend N zur Verfügung. Ab einem Wert > 25 kann sich die mikrobielle Aktivität als Folge von N-Mangel verlangsamen.

Bei der Erstinventur ähneln sich die C/N-Verhältnisse von L+Of-Horizont und Oh-Horizont, jedoch ist das C/N-Verhältnis zur Wiederholungsinventur im Oh-Horizont weiter als im L+Of-Horizont (Tab. 22, Tab. 23). Die Unterschiede zwischen dem C/N-Verhältnis in der organischen Auflage mit dem des Mineralbodens sind nur gering ausgeprägt. Mit Ausnahme des L+Of-Horizonts zur Wiederholungsinventur sind alle Werte in der organischen Auflage niedriger als im Mineralboden (Abb. 21). Das C/N-Verhältnis im L+Of-Horizont zur Wiederholungsinventur weist bereits auf N-Mangel für die Bodenorganismen hin. Womöglich ist der Anteil von kaum oder schlecht zersetzter Streu v.a. von Ästen, Zapfen etc. höher als zur Erstinventur. Mit zunehmender Bodentiefe ergaben sich für beide Untersuchungszeiträume immer stärker verengende C/N-Verhältnisse. Die relativ weiten C/N-Verhältnisse zur Erstinventur in den beiden oberen Tiefenstufen deuten auf einen Mangel an N für die Bodenlebewelt hin. Ähnliches trifft für die oberste Tiefenstufe zur Wiederholungsinventur zu.

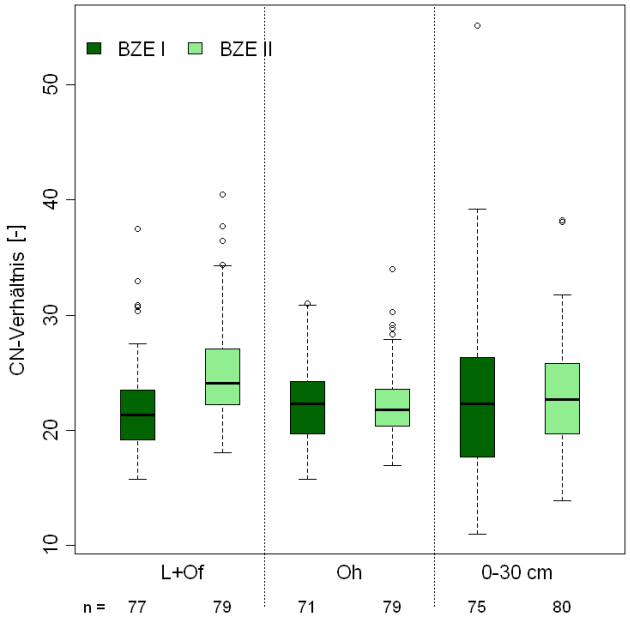

Abb. 21: C/N-Verhältnisse in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl).

Tab. 22: Statistische Kennwerte der C/N-Verhältnisse der BZE I für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	15,72	37,47	21,32	21,96	3,92	77
Oh	15,72	31,00	22,26	22,35	3,67	71
0-5 cm	13,98	38,24	23,84	24,29	5,03	79
5-10 cm	11,68	46,92	23,59	24,04	6,98	78
10-30 cm	9,14	69,43	20,71	22,10	9,30	76

Tab. 23: Statistische Kennwerte der C/N-Verhältnisse der BZE II für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	18,08	40,50	24,10	25,32	4,57	79
Oh	16,96	34,02	21,74	22,28	3,09	79
0-5 cm	16,00	39,08	24,49	24,89	4,67	80
5-10 cm	14,27	42,59	24,54	24,08	5,41	80
10-30 cm	11,88	38,52	21,59	21,72	5,51	80

Das C/N-Verhältnis des L+Of-Horizonts hat sich zwischen den Bodeninventuren signifikant erhöht ($P < 0{,}0001$). Diese Erhöhung kann auf die signifikante Abnahme der N-Gehalte zurückgeführt werden, da sich die C-Gehalte nicht wesentlich geändert haben. Für den Oh-Horizont wurde jedoch keine Änderung festgestellt. Für den Mineralboden ergab die Wiederholungsinventur in den beiden oberen Tiefenstufen zwar etwas höhere und in der untersten Tiefenstufe etwas geringere Werte, die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant (Abb. 22).

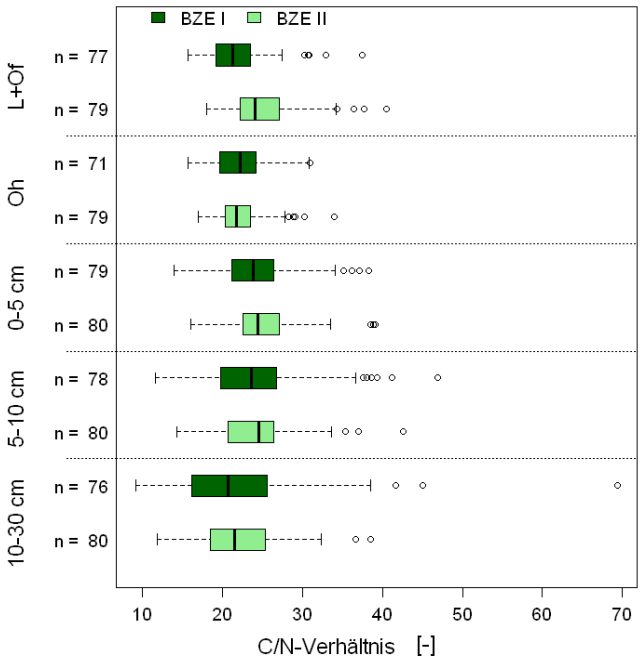

Abb. 22: Tiefenprofil der C/N-Verhältnisse im Mineralboden dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Tiefe (n = Stichprobenanzahl).

3.4.2 Bewertung der C/N-Verhältnisse

Die C/N-Verhältnissen in der organischen Auflage und in oberen 30 cm des Mineralbodens wurden für alle Standorte anhand von Perzentilgrenzen bewertet. Die Anzahl von Standorten mit sehr engen C/N-Verhältnissen in der organischen Auflage ging zwischen BZE I und BZE II drastisch zurück (Anhang: Tab. I-3). Für alle anderen Kategorien nahm die Standortanzahl seit der Erstinventur zu. Das Muster der räumlichen Änderungen der C- und N-Vorräte spiegelt sich in der räumlichen Ausprägung der C/N-Verhältnisse wieder (Anhang: Abb. I-13). Während die C/N-Verhältnisse der organischen Auflage zum Zeitpunkt der BZE I an den meisten Standorten des Mittleren und des Ost-Erzgebirges sowie des Hügellandes relativ eng waren, weiteten sich die C/N-Verhältnisse bis zur Wiederholungsinventur. Während beider Bodeninventuren wurden relativ weite C/N-Verhältnisse im Niederlausitzer-Altmoränen-Land gefunden (Anhang: Abb. I-11, Abb. I-12). Die Darstellung der Veränderungen zwischen BZE I und BZE II ergab trotz überdurchschnittlich hoher Ausgangswerte eine deutliche Erhöhung der C/N-Verhältnisse im

Niederlausitzer-Altmoränen-Land (Anhang: Abb. I-13). Standorte mit sinkenden C/N-Verhältnissen waren weit verbreitet, besonders häufig jedoch im westlichen und mittleren oberen Erzgebirge, im Elbsandsteingebirge und im Dübener-Altmoränen-Land.

Bezüglich Veränderungen der C/N-Verhältnisse im Mineralboden zwischen beiden Bodeninventuren gab es nur geringe Änderungen der Standortanzahl (Anhang: Tab. I-12). Lediglich die Anzahl von Standorten mit hohen und sehr hohen C/N-Verhältnissen erhöhte sich etwas mit der Wiederholungsinventur. Trotz geringer Veränderungen in der Standortanzahl verdeutlicht die räumliche Verteilung der C- und N-Vorräte in den oberen 30 cm des Mineralbodens eine Beziehung mit der räumlichen Verteilung der über alle Tiefenstufen gemittelten C/N-Verhältnisse. Zum einen ist die Verteilung sehr heterogen geprägt. Andererseits dominieren dort, wo zur BZE I-Standorte mit geringen C- und N-Vorräten vorherrschten, auch weite C/N-Verhältnisse. Dies trifft v.a. für das Niederlausitzer-Altmoränen-Land zu (Anhang: Abb. I-56). Umgekehrt wurde an Standorten mit engeren C/N-Verhältnissen, wie z.B. in den mittleren und oberen Lagen des Erzgebirges häufig hohe C- und N-Vorräte beobachtet. Weite C/N-Verhältnisse fanden sich darüber hinaus auch auf Standorten im Elbsandsteingebirge. Zur BZE II weiteten sich die C/N-Verhältisse punktuell unabhängig vom Wuchsgebiet auf einigen Standorten (Anhang: Abb. I-57). Die Veränderungen des C/N-Verhältnisses waren sehr heterogen über die gesamte Landesfläche verteilt (Anhang: Abb. I-58). Es wurden häufig unabhängig vom Wuchsgebiet sowohl höhere als auch sich verengende C/N-Verhältnisse in direkter Nachbarschaft festgestellt. Ein Trend konnte somit nicht aufgezeigt werden.

3.4.3 Fazit zu den C/N-Verhältnissen

Das C/N-Verhältnis des L+Of-Horizonts ist zwischen den Bodeninventuren signifikant weiter geworden. Dies könnte an der geänderten Methodik der Beprobung liegen. Es wurden bei der BZE II auch die Fraktion > 2 cm bis 2 mm beprobt, die viele holzreiche Bestandteile beinhaltet. Jedoch hat sich das C/N-Verhältnis sowohl für den Oh-Horizont als auch für alle Tiefenstufen des Mineralbodens nicht signifikant geändert. Die Anzahl von Standorten mit sehr engen C/N-Verhältnissen in der organischen Auflage ging zwischen BZE I und BZE II drastisch zurück, wobei die Anzahl der Standorte für alle weiteren Bewertungskategorien seit der Erstinventur zunahmen. Während sich für die Veränderungen des C/N-Verhältnisses in der organischen Auflage räumliche Muster abzeichneten, waren die Veränderungen im Mineralboden sehr heterogen und keinem Trend zuordenbar. Möglicherweise ist die Auswertung für das 0-30 cm mächtige Bodenkompartiment aufgrund seiner Heterogenität bezüglich dieses Parameters nicht zielführend. Die Auswertung oberflächennaher Bodenbereiche wäre gegebenenfalls vielversprechender.

3.5 Nährstoffstatus

Der Nährstoffstatus der organischen Auflage und des Mineralbodens gehört zu den wesentlichen Einflussfaktoren, die das Wachstum der Bäume bestimmen. Neben N (Kapitel 3.3) gehören Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K) und Phosphor (P) zu den Hauptnährelementen der Bäume. Für die Nährstoffversorgung der Bäume sind die austauschbaren und organisch gebundenen Nährelementvorräte aufgrund ihrer Verfügbarkeit von Bedeutung.

3.5.1 Calciumstatus und dessen Veränderung

Die Ca-Vorräte der organischen Auflage unterschieden sich nicht signifikant zwischen der BZE I und BZE II (Tab. 24, Tab. 25). Der Ca-Gehalt des L+Of-Horizonts ist von der BZE I zur BZE II signifikant angestiegen ($P < 0{,}001$), während keine signifikante Veränderung in dem Oh-Horizont vorlag. Die Ca-Vorräte haben sich jedoch in beiden Horizonten nicht signifikant verändert, was auf die Abnahme der Mächtigkeit der L+Of-Horizonts (Kapitel 3.1.2) zurückgeführt werden kann (Abb. 23). Die Ca-Gehalte des L+Of-Horizonts waren bei beiden Erhebungen höher als die des Oh-Horizonts (Tab. 26, Tab. 27). Der Tiefengradient mit oben höheren Ca-Gehalten kann als ein Effekt der Bodenschutzkalkungen gedeutet werden.

Tab. 24: Statistische Kennwerte der Gesamtvorräte von Calcium (kg ha^{-1}) in der organischen Auflage und der Vorräte an austauschbarem Calcium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE I.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
Auflage	41,24	1505,28	252,67	336,43	257,27	77
0-30 cm	29,60	6626,22	194,30	394,35	942,73	79

Tab. 25: Statistische Kennwerte der Gesamtvorräte von Calcium (kg ha^{-1}) in der organischen Auflage und der Vorräte an austauschbarem Calcium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE II.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
Auflage	46,42	2203,00	242,13	405,33	414,64	79
0-30 cm	18,52	8490,40	132,28	370,17	1073,10	79

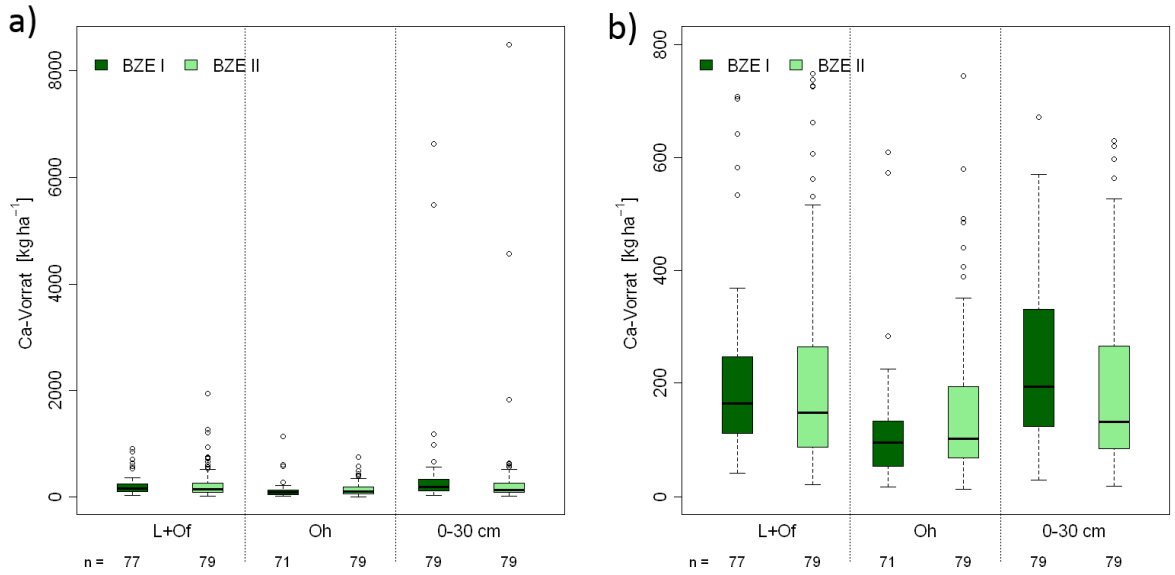

Abb. 23: Gesamtvorräte von Calcium in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und Vorräte an austauschbarem Calcium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 800 kg ha^{-1}.

Der Vorrat an austauschbarem Ca (Median) in den oberen 30 cm des Mineralbodens hat von der BZE I zur BZE II signifikant abgenommen ($P = 0{,}010$; Tab. 24, Tab. 25, Abb. 24). Bei der BZE II konnte eine signifikante Abnahme der Ca-Vorräte und -Gehalte (Mediane) in 5-10 cm ($P < 0{,}001$, $P = 0{,}001$) und 10-30 cm Tiefe ($P = 0{,}014$, $P = 0{,}017$) im Vergleich zur BZE I festgestellt werden (Abb. 24). Bei beiden Erhebungen fanden sich sowohl in der organischen Auflage als auch im Mineralboden mit zunehmender Tiefe abnehmende Gehalte an austauschbarem Ca (Tab. 26, Tab. 27). Möglicherweise deutet dies auf die Bodenschutzkalkungen in den Berglagen und im Gebirgsvorland hin.

Tab. 26: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Calcium (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und der Gehalten an austauschbarem Calcium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE I.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	0,99	19,80	3,58	4,48	3,28	77
Oh	0,54	25,80	1,81	2,60	3,35	71
0-5 cm	0,05	4,24	0,17	0,28	0,52	79
5-10 cm	0,03	3,40	0,08	0,16	0,42	79
10-30 cm	0,01	2,84	0,04	0,11	0,36	79

Tab. 27: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Calcium (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und der Gehalten an austauschbarem Calcium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE II.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	0,98	44,20	4,68	8,44	8,37	82
Oh	0,41	11,20	1,91	2,83	2,25	79
0-5 cm	0,01	7,34	0,13	0,34	0,85	82
5-10 cm	0,00	4,14	0,06	0,16	0,49	82
10-30 cm	0,00	3,21	0,03	0,12	0,39	82

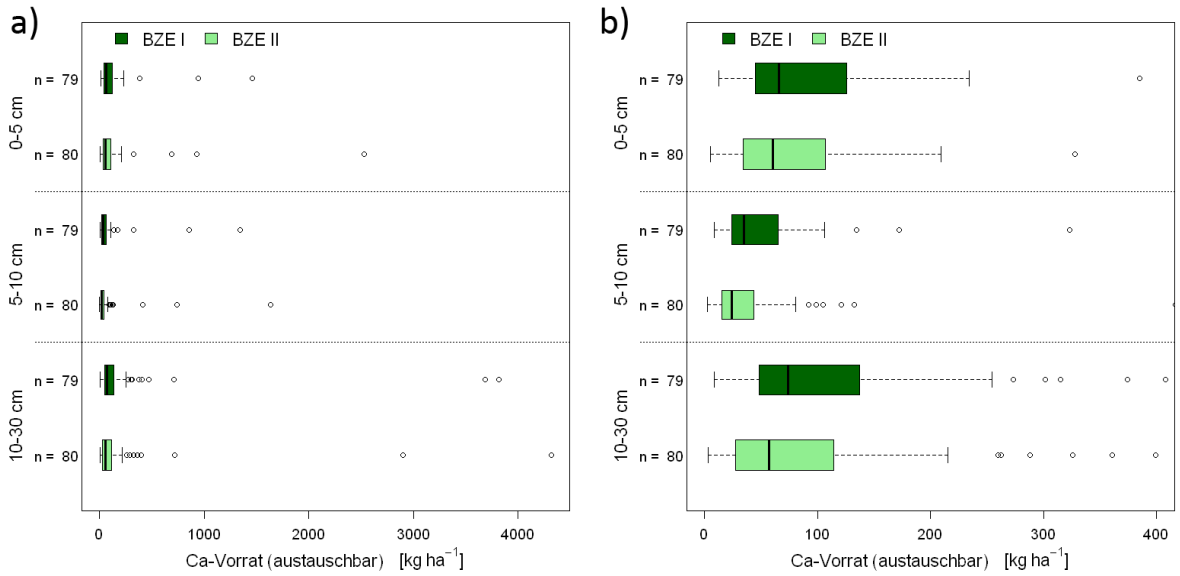

Abb. 24: Tiefenprofil der austauschbaren Calciumvorräte im Mineralboden dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Tiefe (n = Stichprobenanzahl) vom a) Gersamtdatensatz und b) gekappt bei 450 kg ha^{-1}.

3.5.2 Bewertung der Calciumvorräte

Die Verteilung der Ca-Vorräte in der Auflage war zu beiden Inventurzeitpunkten deutlich rechtsschief (Abb. 24 und Anhang: Abb. I-39), d.h. es überwogen Standorte mit geringen Ca-Vorräten, vereinzelt gab es jedoch Standorte mit sehr hohen Ca-Vorräten. Von der BZE I hin zur BZE II gab es keine signifikanten Veränderungen bei Betrachtung des Gesamtkollektivs, jedoch konnte eine Zunahme an Extrema beobachtet werden (Anhang: Tab. I-8). Während bei der BZE I 6,5 % der Standorte unterhalb der niedrigsten Perzentilgrenze von 110,8 kg Ca ha^{-1} und 6,5 % oberhalb der höchsten Perzentilgrenze von 891,1 kg Ca ha^{-1} lagen, stieg die Häufigkeit dieser Standorte während der BZE II auf 13,4 % und 12,2 %. Weiterhin konnten deutliche räumliche Variationen beobachtet werden. Eine Zunahme der Ca-Vorräte erfolgte vor allem in mittleren

und höheren Berglagen wie im Erzgebirge und im Zittauer Gebirge (Anhang: Abb. I-36, Abb. I-37, Abb. I-38) als Ergebnis der Bodenschutzkalkungen. Die stärksten Abnahmen waren im Tiefland im Dübener-Niederlausitzer Altmoränenland feststellbar. Sie sind auf den fortschreitenden Abbau des Depositionspools der basischen Stäube der Emmissionen der Braunkohlenkraftwerke zurückzuführen, da mit dem Einsatz effektiver Filtertechnologien seit den 1990er Jahren vergleichbare Baseneinträge nicht mehr auftreten. Es lag kein ausgeprägtes räumliches Muster der Ca-Vorräte in Sachsen vor (Anhang: Abb. I-37), was auf die Kalkungen sowie auf unterschiedliche geologische Situationen zurückgeführt werden kann. Die höheren Berglagen wiesen jedoch generell höhere Ca-Vorräte auf.

Die Verteilung der Ca-Vorräte im Mineralboden (Abb. 24, Anhang: Abb. I-79) war ebenfalls deutlich rechtsschief und in allen betrachteten Horizonten wurden vereinzelt sehr hohe Vorräte gemessen. Bei der BZE II gab es eine deutliche Zunahme an Standorten, die sehr geringe (< 70,5 kg Ca ha^{-1}) Ca-Vorräte aufwiesen (Anhang: Tab. I-16), auch insgesamt konnte eine deutliche Abnahme an Ca-Vorräten beobachtet werden. Bei der BZE I gehörten 3,8 % der Standorte zu Standorten mit sehr geringen Ca-Vorräten, bei der BZE II waren es 16,3 %. Starke Abnahmen konnten im gesamten Bundesland mit Ausnahme der mittleren und höheren Berglagen (Erzgebirge, Zittauer Gebirge) beobachtet werden, hier wurden Zunahmen beobachtet (Anhang: Abb. I-76, Abb. I-77, Abb. I-78), die auf die Bodenschutzkalkungen zurückgeführt werden können. Zu den Standorten mit den absolut niedrigsten Ca-Vorräten im oberen Mineralboden während der BZE II zählten das Dübener-Niederlausitzer Altmoränenland sowie Teile des Elbsandsteingebirges, der Westlausitzer Platte-Elbtalzone und des Vogtlands (Anhang: Abb. I-77). Die Standorte mit den höchsten Vorräten befanden sich in den mittleren und höheren Berglagen des Erzgebirges und im Sächsisch-Thüringischen Löss-Hügelland.

Im Mittel wies Sachsen „geringe“ Ca-Vorräte in der Auflage und den oberen 30 cm des Mineralbodens auf (AK_Standortskartierung 2003). Die beobachtete Abnahme der Ca-Vorräte im Mineralboden spiegelt den fortschreitenden Verlust von basischen Kationen in den versauerten Waldböden wieder. Durch die Bodenschutzkalkungen der Mittelgebirgsstandorte und des Gebirgsvorlandes blieb der Ca-Vorrat in der Auflage im Landesdurchschnitt gleich. Die deutliche Rechtsschiefe ist Ausdruck des geringen Anteils basenreicherer Bodensubstrate bzw. von Standorten, die in die Kalkungen einbezogen wurden gegenüber einem hohen Anteil an basenarmen, versauerten Standorten. Zu den besser mit Ca versorgten Standorten zählen aufgrund der Bodenschutzkalkungen das Erzgebirge und das Zittauer Gebirge, während das Dübener-Niederlausitzer-Altmoränenland, das Vogtland und das Elbsandsteingebirge wegen ihrer Bodenausgangssubstrate sehr Ca-arme Standorte sind.

3.5.3 Kaliumstatus und dessen Veränderung

Während in der organischen Auflage keine signifikanten Änderungen im K-Vorrat zwischen beiden Inventuren auftraten (Tab. 28, Tab. 29), nahm der K-Vorrat im L+Of-Horizont ab ($P < 0{,}001$; Abb. 25). Diese Abnahme resultierte aus der Abnahme der Mächtigkeit des L+Of-Horizonts, da keine signifikanten Veränderungen in den K-Gehalten der Auflagenhorizonte vorlagen (Tab. 30, Tab. 31).

Tab. 28: Statistische Kennwerte der Gesamtvorräte von Kalium (kg ha^{-1}) in der organischen Auflage und der Vorräte an austauschbarem Kalium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE I.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
Auflage	26,30	310,40	99,91	113,03	56,21	77
0-30 cm	16,34	454,74	82,54	104,69	63,60	79

Tab. 29: Statistische Kennwerte der Gesamtvorräte von Kalium (kg ha^{-1}) in der organischen Auflage und der Vorräte an austauschbarem Kalium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE II.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
Auflage	10,60	281,38	90,17	103,99	57,21	79
0-30 cm	18,92	508,94	77,89	99,48	74,96	79

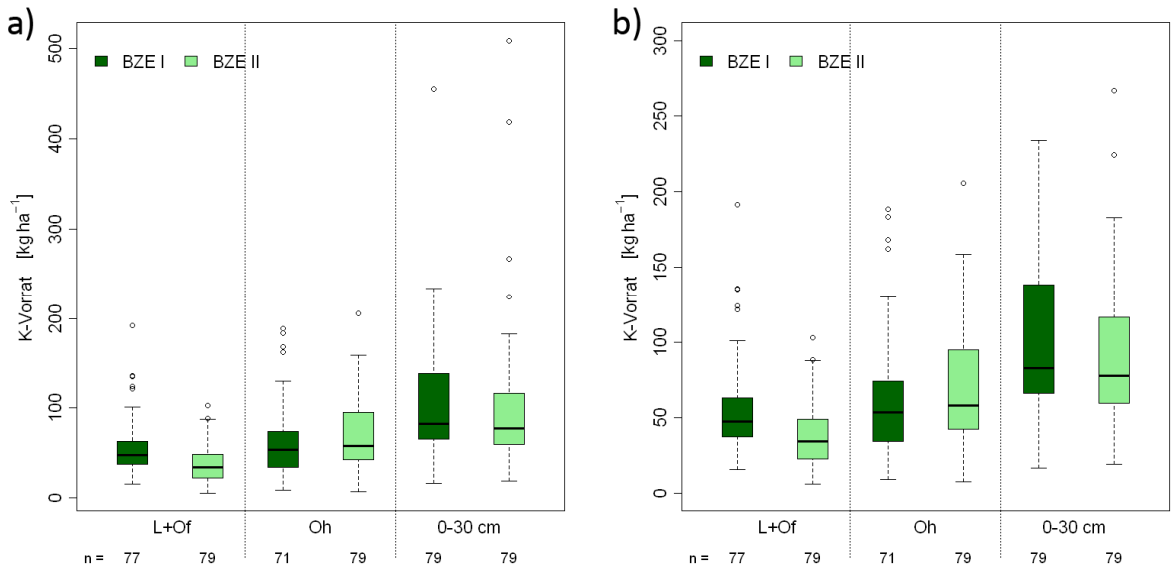

Abb. 25: Gesamtvorräte von Kalium in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und Vorräte an austauschbarem Kalium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 300 kg ha^{-1}.

Der Vorrat an austauschbarem K in den oberen 30 cm des Mineralbodens unterschied sich nicht zwischen der BZE I und BZE II (Tab. 28, Tab. 29). Auch die einzelnen Tiefenstufen wiesen keine signifikanten Veränderungen in den K-Vorräten und K-Gehalten zwischen beiden Erhebungen auf (Abb. 26, Tab. 30, Tab. 31).

Tab. 30: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Kalium (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und der Gehalten an austauschbarem Kalium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE I.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	0,56	2,50	1,02	1,09	0,37	77
Oh	0,39	3,51	1,18	1,26	0,56	71
0-5 cm	0,01	0,24	0,06	0,06	0,04	79
5-10 cm	0,01	0,20	0,04	0,04	0,03	79
10-30 cm	0,01	0,11	0,03	0,03	0,02	79

Tab. 31: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Kalium (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und der Gehalten an austauschbarem Kalium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE II.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	0,38	3,84	1,14	1,25	0,54	82
Oh	0,36	4,95	1,08	1,31	0,77	79
0-5 cm	0,01	0,51	0,06	0,07	0,07	82
5-10 cm	0,00	0,20	0,04	0,04	0,03	82
10-30 cm	0,00	0,15	0,03	0,03	0,03	82

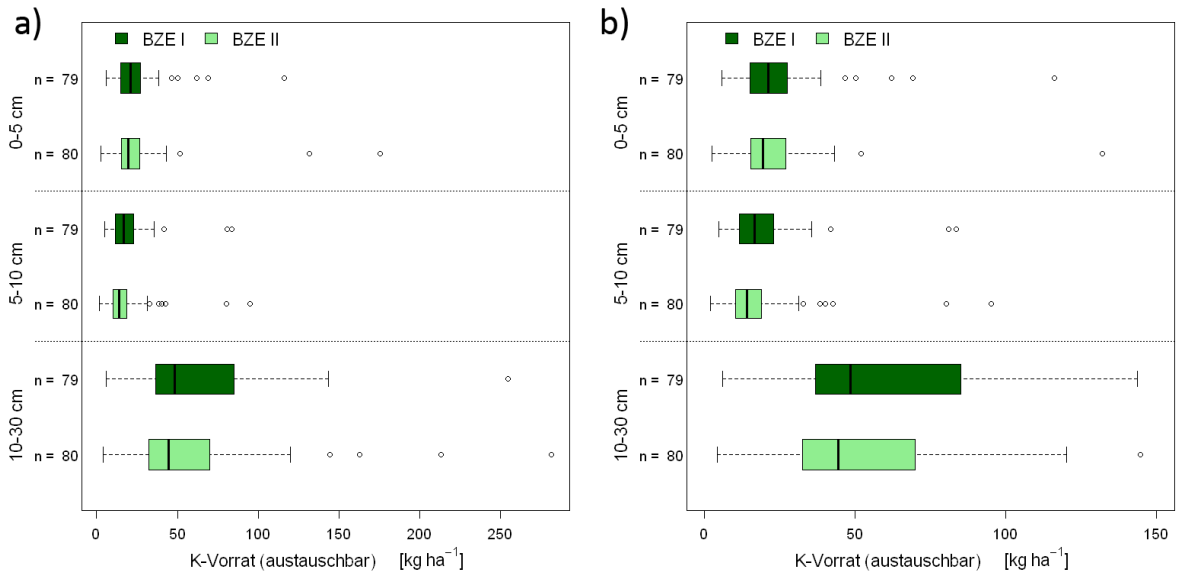

Abb. 26: Tiefenprofil der austauschbaren Kaliumvorräte im Mineralboden dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Tiefe (n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 150 kg ha^{-1}.

3.5.4 Bewertung der Kaliumvorräte

Die Verteilung der austauschbaren K-Vorräte in der Auflage war rechtsschief (Abb. 26, Anhang: Abb. I-34), jedoch war diese Schiefe deutlich geringer ausgeprägt als im Mineralboden oder bei Ca. Insgesamt konnte kein signifikanter Unterschied in den K-Vorräten zwischen der BZE I und BZE II beobachtet werden, Standorte mit sehr geringen Vorräten (< 48,3 kg K ha^{-1}) nahmen jedoch von 5,2 % auf 14,6 % zu, während Standorte mit mittleren Vorräten (76,0-118,0 kg K ha^{-1}) von 39,0 % auf 26,8 % abnahmen (Anhang: Tab. I-7). Partielle Abnahmen der K-Vorräte in der Auflage konnten in allen Wuchsgebieten beobachtet werden, während Zunahmen insbesondere in den mittleren und höheren Berglagen des Erzgebirges und im Grenzgebiet Westlausitzer Platte-Elbtalzone/Lausitzer Löss-Hügelland vorkamen (Anhang: Abb. I-31, Abb. I-32). Die Verteilung der austauschbaren K-Vorräte im Mineralboden war rechtsschief (Abb. 26, Anhang: Abb. I-74). Im Mittel konnte keine signifikante Veränderung zwischen den Inventuren ermittelt werden. Es erfolgte jedoch insbesondere eine Abnahme der K-Vorräte an Standorten mit hohen Vorräten (103,1-167,9 kg K ha^{-1}; von 30,4 % auf 18,8 %), während eine Zunahme auf Standorten mit mittleren Vorräten (69,1-103,1 kg K ha^{-1}; von 27,9 % auf 37,5 %) beobachtet wurde (Anhang: Tab. I-15). Die höchsten Abnahmen erfolgten im Dübener-Niederlausitzer Altmoränenland, im Gebiet Westlausitzer Platte-Elbtalzone und im Sächsisch-Thüringischen Löss-Hügelland (Anhang: Abb. I-71, Abb. I-72, Abb I-73). Die niedrigsten Vorräte kamen zur Wiederholungsinventur im Osten des Dübener-Niederlausitzer Altmoränenlandes sowie partiell im Erzgebirge, Vogtland und Elbsandsteingebirge vor. Das

westliche Hügelland im Bereich der Lössböden (z.B. Sächsisch-Thüringisches Löss-Hügelland) wies hingegen die höchsten Vorräte auf (Anhang: Abb. I-72).

Im Mittel wies Sachsen „sehr geringe“ bis „geringe“ K-Vorräte in der Auflage und den oberen 30 cm des Mineralbodens auf (AK_Standortskartierung 2003). Es gab keine Veränderung in den mittleren K-Vorräten zwischen den beiden Erhebungen. Das Dübener-Niederlausitzer Altmoränenland, welches großflächig die niedrigsten K-Vorräte aufwies, zeigte jedoch eine weitere Abnahme der Vorräte. Dies könnte sich langfristig negativ auf das Baumwachstum auswirken und sollte bei der Bewirtschaftung berücksichtigt werden.

3.5.5 Magnesiumstatus und dessen Veränderung

Der Mg-Vorrat der organischen Auflage wies keine signifikante Veränderung zwischen der BZE I und BZE II auf (Tab. 32, Tab. 33). Es gab jedoch eine Abnahme des Mg-Vorrats des L+Of-Horizonts zwischen beiden Inventuren ($P = 0{,}019$) und eine Zunahme des Mg-Vorrats des Oh-Horizonts ($P < 0{,}001$; Abb. 27). Die signifikante Zunahme lag ebenfalls in dem Mg-Gehalt des Oh-Horizonts vor, nicht jedoch die Abnahme im L+Of-Horizonts (Tab. 34, Tab. 35).

Tab. 32: Statistische Kennwerte der Gesamtvorräte von Magnesium (kg ha^{-1}) in der organischen Auflage und der Vorräte an austauschbarem Magnesium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE I.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
Auflage	21,68	490,12	92,13	114,61	74,38	77
0-30 cm	5,82	1641,48	35,45	70,25	188,59	79

Tab. 33: Statistische Kennwerte der Gesamtvorräte von Magnesium (kg ha^{-1}) in der organischen Auflage und der Vorräte an austauschbarem Magnesium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE II.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
Auflage	7,56	1012,76	93,51	160,41	176,80	79
0-30 cm	5,54	1386,14	34,17	80,71	166,76	79

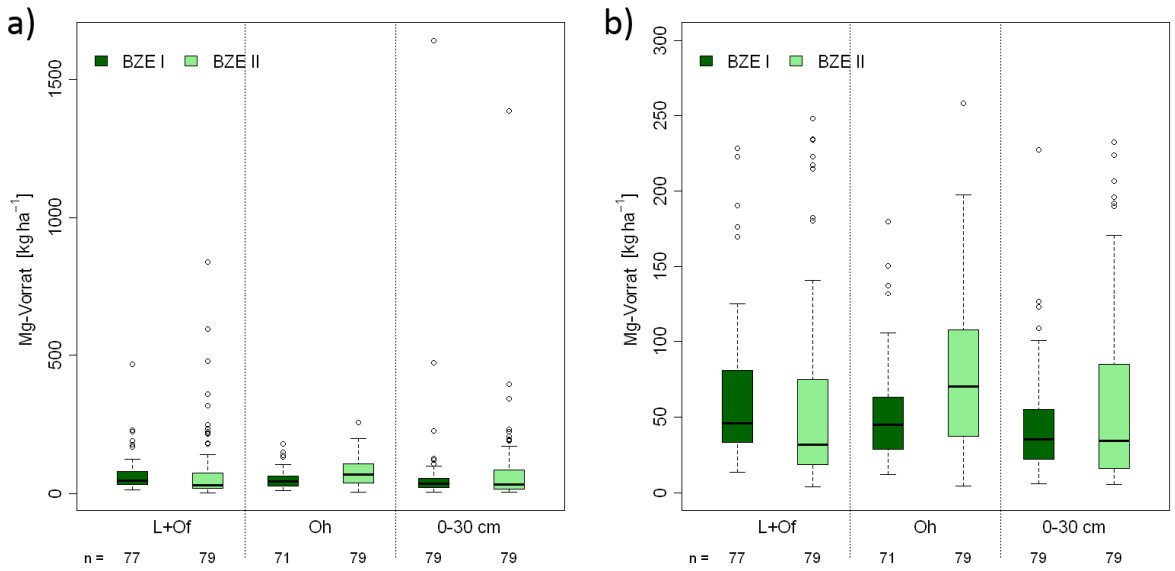

Abb. 27: Gesamtvorräte von Magnesium in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und Vorräte an austauschbarem Magnesium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 300 kg ha^{-1}.

Der Vorrat an austauschbarem Mg in den oberen 30 cm des Mineralbodens zeigte keine Veränderung zwischen der BZE I und BZE II (Tab. 32, Tab. 33, Abb. 28). Auch in den einzelnen Tiefenstufen konnte kein Unterschied zwischen den beiden Erhebungen in den Mg-Vorräten (Abb. 28) sowie Mg-Gehalten beobachtet werden (Tab. 34, Tab. 35).

Tab. 34: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Magnesium (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und der Gehalten an austauschbarem Magnesium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE I.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	0,47	7,35	1,00	1,33	1,08	77
Oh	0,35	5,99	0,95	1,11	0,75	71
0-5 cm	0,00	0,50	0,03	0,04	0,06	79
5-10 cm	0,00	0,48	0,02	0,02	0,05	79
10-30 cm	0,00	0,95	0,01	0,03	0,11	79

Tab. 35: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Magnesium (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) und der Gehalten an austauschbarem Magnesium in den oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE II.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	0,27	19,10	1,10	2,59	3,51	82
Oh	0,25	6,00	1,12	1,53	1,11	79
0-5 cm	0,00	0,81	0,03	0,08	0,12	82
5-10 cm	0,00	0,50	0,01	0,04	0,06	82
10-30 cm	0,00	0,68	0,01	0,03	0,08	82

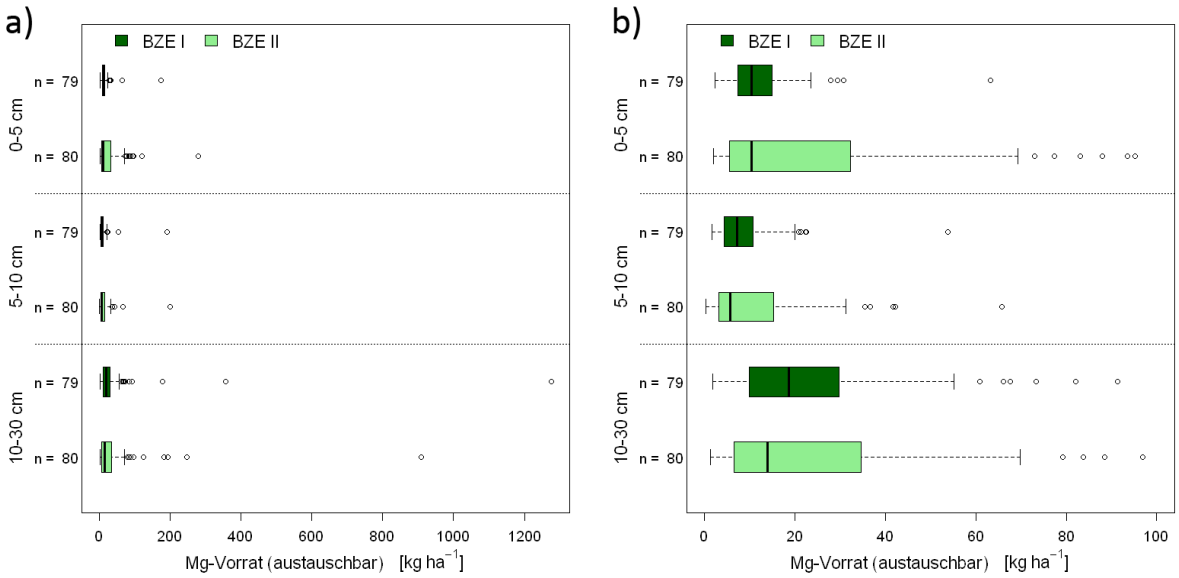

Abb. 28: Tiefenprofil der austauschbaren Magnesiumvorräte im Mineralboden dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Tiefe (n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 100 kg ha^{-1}.

3.5.6 Bewertung der Magnesiumvorräte

Bei den Mg-Vorräten in der Auflage lag eine deutliche Rechtsschiefe vor (Abb. 28, Anhang: Abb. I-44). Wie auch bei Ca gab es eine Zunahme in den Extrema von der BZE I zur BZE II (Anhang. Tab. I-9). Während nur 5,2 % der Standorte sehr niedrige (< 42,8 kg ha^{-1}) und 2,6 % der Standorte sehr hohe Mg-Vorräte (> 298,0 kg ha−1) bei der BZE I aufwiesen, stieg die Häufigkeit auf 14,6 % und 15,9 % bei der BZE II. Zunahmen wurden vor allem in den mittleren und hohen Berglagen (z.B. Erzgebirge, Vogtland und Zittauer Gebirge) beobachtet und können auf die Bodenschutzkalkung zurückgeführt werden (Anhang: Abb. I-43). Abnahmen waren auf Standorte im gesamten Bundesland verteilt (Anhang: Abb. I-41, Abb. I-42, Abb. I-43). Die absolut höchsten Mg-Vorräte kamen ebenfalls in den mittleren und hohen Berglagen vor, die niedrigsten im

Westen des Dübener-Niederlausitzer Altmoränenlands, im Sächsisch-Thüringischen Löss-Hügelland und im östlichen Elbsandsteingebirge (Anhang: Abb. I-42).

Auch bei den Mg-Vorräten im Mineralboden lag eine deutliche Rechtsschiefe vor (Abb. 28, Anhang: Abb. I-84). Wie in der Auflage konnte auch im Mineralboden eine Zunahme in den Extrema beobachtet werden (Anhang: Tab. I-17), wobei im Mittel keine signifikante Veränderung vorlag. Während der BZE I zählten 5,1 % der Standorte zu den Standorten mit sehr geringen Mg-Vorräten (< 12,1 kg ha^{-1}) und 3,8 % zu den Standorten mit sehr hohen Vorräten (> 132,4 kg ha^{-1}), während der BZE II stieg die Häufigkeit auf jeweils 15,0 %. Eine Zunahme der Mg-Vorräte erfolgte in den mittleren und höheren Berglagen, eine Abnahme im Tief- und Hügelland (Anhang: Abb. I-81, Abb. I-82, Abb. I-83). Während der BZE II lagen die höchsten Vorräte an Standorten in mittleren und hohen Berglagen (Anhang: Abb. I-82). Die niedrigsten Vorräte kamen im Dübener-Niederlausitzer Altmoränenland und im Elbsandsteingebirge vor (Anhang: Abb. I-82).

Im Mittel wies Sachsen „geringe“ Mg-Vorräte in der Auflage und den oberen 30 cm des Mineralbodens auf (AK_Standortskartierung 2003). Es gab keine Veränderung in den mittleren Mg-Vorräten zwischen den beiden Erhebungen. Allerdings lag eine Zunahme an Extrema vor. Ähnlich wie bei den K-Vorräten spiegeln sich einerseits die zunehmenden Verluste von basischen Kationen in den versauerten Böden wider und andererseits zeigt sich der Einfluss der Bodenschutzkalkung. Weitere Abnahmen der Mg-Vorräte im Dübener-Niederlausitzer Altmoränenland, welches die geringsten Vorräte aufweist, können sich langfristig negativ auf das Wachstum der Bäume auswirken. Dagegen finden wir eine gute Mg-Versorgung in den mittleren und hohen Berglagen auf Böden, die gekalkt wurden bzw. den wenigen Standorten mit basischen Ausgangsgesteinen.

3.5.7 Phosphorstatus der organischen Auflage

Der Gesamtvorrat von P in der organischen Auflage ist von der BZE I zur BZE II signifikant gesunken ($P < 0{,}001$; Tab. 36). Der Rückgang ist auf eine Abnahme der Vorräte im L+Of-Horizont zurückzuführen ($P < 0{,}001$; Abb. 29). Diese Abnahme zeigte sich ebenfalls in den P-Gehalten ($P < 0{,}001$; Tab. 37, Tab. 38).

Tab. 36: Statistische Kennwerte der Gesamtvorräte von Phosphor (kg ha^{-1}) in der organischen Auflage für die BZE I und BZE II.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
BZE I	33,82	184,34	91,78	91,91	31,09	77
BZE II	3,77	294,96	67,92	72,46	39,50	79

Tab. 37: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Phosphor (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) für die BZE I.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	0,51	1,76	1,04	1,04	0,22	77
Oh	0,48	1,83	0,84	0,88	0,23	71

Tab. 38: Statistische Kennwerte der Gesamtgehalte von Phosphor (g kg^{-1}) in der organischen Auflage (L+Of und Oh) für die BZE II.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	0,42	1,82	0,90	0,89	0,22	79
Oh	0,27	1,85	0,84	0,84	0,26	79

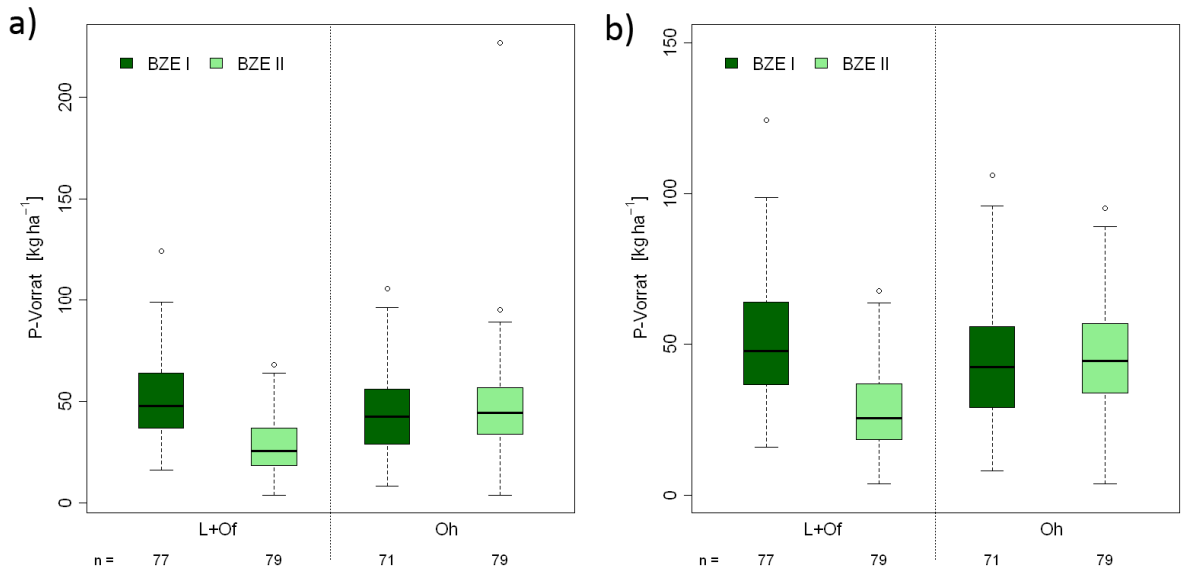

Abb. 29: Gesamtvorräte von Phosphor in der organischen Auflage (L+Of und Oh; n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 60 kg ha^{-1}.

3.5.8 Bewertung der Phosphorvorräte

Die P-Vorräte waren während der BZE I annähernd normalverteilt, nahmen jedoch mit der BZE II an Rechtsschiefe zu (Abb. 29, Anhang: Abb. I-29). Im Rahmen der BZE II gab es folglich eine Zunahme an Standorten mit geringen (42,3-62,4 kg ha^{-1}) und sehr geringen P-Vorräten (< 42,3 kg ha^{-1}; Anhang: Tab. I-6). Die Häufigkeiten stiegen von 3,9 % (BZE I) auf 15,9 % (BZE II) bei den Standorten mit sehr geringen Vorräten und von 16,9 % auf 29,3 % bei den Standorten mit den geringen Vorräten. Zu- und Abnahmen an P-Vorräten fanden über alle Wuchsgebiete statt, wobei keine regionalen Muster erkannt wurden (Anhang: Abb. I-26, Abb. I-27, Abb. I-28). Des

Weiteren waren während der BZE II auch die Standorte mit den höchsten und niedrigsten Vorräten über ganz Sachsen verteilt (Anhang: Abb. I-26, Abb. I-27).

Den insgesamt geringen und abnehmenden P-Vorräten sollte bei der Bewirtschaftung der Wälder Aufmerksamkeit geschenkt werden, um einen P-Mangel vorzubeugen.

3.5.9 Fazit zum Nährstoffstatus

Die Bodenzustandserhebungen im Wald in Sachsen zeigen, dass der mittlere Nährstoffstatus der organischen Auflage und des oberen Mineralbodens als „gering“ eingestuft werden kann. In Sachsen lagen nur wenige basenreiche Standorte mit sehr guter Nährstoffversorgung vor, was durch die starke Rechtsschiefe der Daten ausgedrückt wird. Obwohl nur eine signifikante Abnahme des Ca-Vorrats im Mineralboden und eine signifikante Abnahme des P-Vorrats in der Auflage von der BZE I zur BZE II beobachtet werden konnte, spiegelten die untersuchten Nährstoffe einen zunehmenden Verlust von basischen Kationen in den versauerten Böden wider. Bis auf die beiden genannten Veränderungen, waren keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Erhebungen feststellbar, es lag jedoch eine Zunahme an Extrema vor. Dies bedeutet, dass auf der einen Seite Standorte mit sehr geringen Vorräten zunahmen (durch Versauerung und Nährstoffentzüge), auf der anderen Seite aber auch, dass die Anzahl von Standorten mit sehr hohen Vorräten durch die Bodenschutzkalkung zunahmen. Regional bestanden jedoch deutliche Unterschiede. Während die mittleren und hohen Mittelgebirgslagen (z.B. Erzgebirge, Zittauer Gebirge) besser ausgestattete Standortszustände, u. a. infolge der Bodenschutzkalkung repräsentieren und somit von einer mangelfreien Nährstoffversorgung der Bäume ausgegangen werden kann, befinden sich vor allem die Standorte im Dübener-Niederlausitzer-Altmoränenland sowie in Teilen des Elbsandsteingebirges und des Vogtlandes aufgrund der geologisch bedingten basenarmen Bodensubstrate auf einem ärmeren Zustandsniveau. Auf diese Regionen sollte zukünftig ein größeres Augenmerk gelegt werden, um negative Effekte auf das Baumwachstum zu vermeiden. Auch die flächendeckende Abnahme der P-Vorräte sollte beachtet werden.

3.6 Säure-Basen-Status

3.6.1 Bodenreaktion und dessen Veränderung

Der pH-Wert ist Ausdruck der Bodenreaktion, welche die aktuellen Säure- oder Basenwirkung der Bodenlösung widerspiegelt. Zahlreiche pedogenetische Prozesse der Bodenentstehung und -entwicklung werden durch die Bodenreaktion gesteuert. Mit Hilfe des pH-Wertes kann z.B. das Verhalten von Nähr- und Schadstoffen beurteilt oder die Eignung des Bodens als Pflanzenstandort ermittelt werden. Er erlaubt weiterhin Aussagen über den Boden als Lebensraum für Mikroorganismen oder als Filter für Schadstoffe. Der pH-Wert gilt als eine der wichtigsten und aussagekräftigsten Bodenkenngrößen und lässt sich ferner mit einfachen Mitteln im Gelände oder im Labor bestimmen.

In Tab. 39 und Tab. 40 sind einige statistischen Kennwerte der pH(H_2O)-Werte und in Tab. 41 und Tab. 42 für pH(KCl)-Werte für beide Inventurzeitpunkte zusammengefasst. Die pH-Werte haben sich mit der Wiederholungsinventur für das Gesamtkollektiv erhöht (Abb. 30, Abb. 31). Besonders deutlich ist die Veränderung im oberen Auflagehorizont (L+Of-Horizont) ausgeprägt. So wurde ein signifikanter Anstieg der pH(H_2O)-Werte als auch der pH(KCl)-Werte im L+Of-Horizont festgestellt ($P < 0{,}0001$). Die pH-Werte im Oh-Horizont waren deutlich niedriger als im darüber liegenden Horizont. Jedoch auch im Oh-Horizont stiegen zwischen beiden Inventuren die pH(H_2O)-Werte ($P = 0{,}0016$) und die pH(KCl)-Werte ($P = 0{,}0015$) signifikant an. Zwar hat die Bodenazidität in der organischen Auflage mit der Wiederholungsinventur abgenommen, jedoch liegen v.a. die pH-Werte des Oh-Horizonts weiterhin im stark bis sehr stark sauren Bereich.

Tab. 39: Statistische Kennwerte der pH(H_2O) Werte der BZE I für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	3,23	5,29	3,95	4,02	0,45	77
Oh	3,04	6,15	3,61	3,74	0,50	71
0-5 cm	3,22	5,76	3,70	3,83	0,45	79
5-10 cm	3,22	5,86	3,82	3,91	0,41	79
10-30 cm	3,60	6,18	4,06	4,14	0,39	79

Tab. 40: Statistische Kennwerte der pH(H_2O)-Werte der BZE II für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	N
L+Of	3,42	6,48	4,27	4,48	0,72	82
Oh	3,29	5,40	3,81	3,91	0,40	79
0-5 cm	3,64	6,17	3,96	4,05	0,41	82
5-10 cm	3,73	5,92	4,05	4,13	0,34	82
10-30 cm	3,72	6,00	4,27	4,28	0,32	82

Die pH-Werte im Mineralboden waren zur Wiederholungsinventur höher als in der organischen Auflage. Mit zunehmender Tiefe nahmen die pH(H_2O)-Werte und die pH(KCl)-Werte sowohl bei der Erstinventur als auch bei der Wiederholungsinventur zu. Der Vergleich der einzelnen Tiefenstufen verdeutlicht, dass die pH-Werte seit der BZE I in allen Tiefenstufen zugenommen haben. Die Unterschiede zwischen den Inventuren waren für jede Tiefenstufe signifikant ($P < 0{,}0001$).

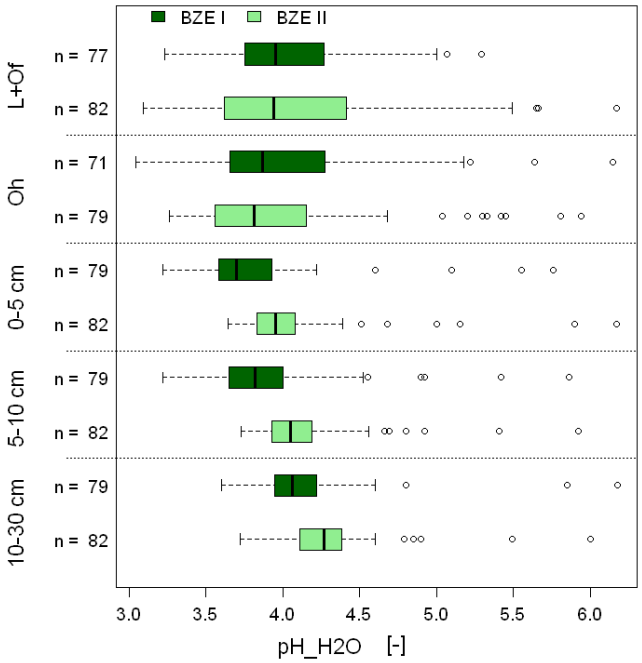

Abb. 30: Vergleich der pH(H_2O)-Werte zwischen BZE I und BZE II für die organische Auflage (L+Of-Horizont, Oh-Horizont) sowie für die verschiedenen Tiefenstufen (0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm) des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl).

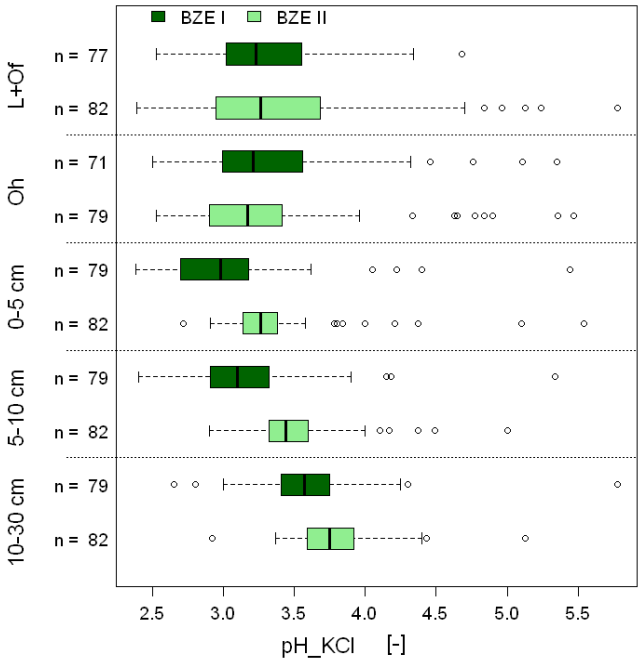

Abb. 31: Vergleich der pH(KCl)-Werte zwischen BZE I und BZE II für die organische Auflage (L+Of-Horizont, Oh-Horizont) sowie für die verschiedenen Tiefenstufen (0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm) des Mineralbodens (n = Stichprobenanzahl).

Tab. 41: Statistische Kennwerte der pH(KCL) Werte der BZE I für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	2,53	5,11	3,29	3,30	0,45	77
Oh	2,39	5,35	3,00	3,05	0,47	71
0-5 cm	2,38	5,44	2,98	3,02	0,47	79
5-10 cm	2,40	5,34	3,10	3,16	0,43	79
10-30 cm	2,65	5,78	3,57	3,60	0,39	79

Tab. 42: Statistische Kennwerte der pH(KCL) Werte der BZE II für die verschiedenen Auflagehorizonte und Tiefenstufen des Mineralbodens.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
L+Of	2,69	6,09	3,55	3,82	0,81	82
Oh	2,63	4,33	3,13	3,24	0,39	79
0-5 cm	2,72	5,54	3,26	3,33	0,41	82
5-10 cm	2,90	5,00	3,44	3,50	0,32	82
10-30 cm	2,92	5,13	3,75	3,79	0,30	82

3.6.2 Bewertung der Bodenreaktion

Die Standorte wurden hinsichtlich ihrer pH(H_2O)-Werte und ihrer pH(KCl)-Werte in der organischen Auflage (L+Of- und Oh-Horizont) und im Mineralboden anhand von Perzentilgrenzen bewertet. Basierend auf dieser Bewertung zeigt sich, dass zur Erstinventur sowohl die pH(H_2O)- als auch die pH(KCl)-Werte in der organischen Auflage ein deutliches Nord-Süd-Gefälle mit häufigerem Vorkommen von höheren Werten im Norden und niedrigeren Werten im Süden aufwiesen (Anhang: Abb. I-16, Abb. I-21). Zur Wiederholungsinventur war die Verteilung heterogener (Anhang: Abb. I-17, Abb. I-22). Deutliche regionale Unterschiede ergeben sich aus dem direkten Vergleich beider Bodeninventuren (Anhang: Abb. I-18, Abb. I-23). Die pH-Werte in der organischen Auflage nahmen auf den sandigen Standorten des Düberner-Niederlausitzer-Altmoränen-Landes ab. Auch das sich im Süden anschließende von Lösslehm dominierte Hügelland wird von leicht sinkenden Werten geprägt. Dagegen nahm in den mittleren und höheren Berglagen der pH-Wert deutlich zu. Die Veränderungen sind jedoch bei den pH(H_2O)-Werten weniger stark ausgeprägt als bei den pH(KCl)-Werten. Je niedriger die Bodenreaktion war, je größer war der Unterschied zwischen pH(H_2O) und pH(KCl). Die Auswertung der Perzentilgrenzen für die pH(H_2O)- und pH(KCl)-Werte in der organische Auflage zeigt, dass die Anzahl der Standorte, die eine Bewertung als sehr gering erfahren haben, seit der Erstinventur um mehr als 10 % zurückgegangen sind (Anhang: Tab. I-4, Tab. I-5). Die Anzahl von als gering und mittel bewerteten Standorten hat sich hingegen kaum verändert. Größere Veränderungen gibt es bei Standorten mit einem pH(H_2O)-Wert > 4 bzw. einem pH(KCl)-Wert > 3,3. Mit der Wiederholungsinventur erhöhte sich deren Anzahl deutlich.

Basierend auf den Perzentilgrenzen ergaben sich für den Mineralboden (0-30 cm) sowohl bei den pH(H_2O)- als auch bei den pH(KCl)-Werten zum Zeitpunkt der BZE I in den oberen 30 cm des Mineralbodens deutliche regionale Unterschiede (Anhang: Abb. I-61, Abb. I-66). Generell gab es die meisten Standorte mit niedrigeren Werten in den mittleren und höheren Berglagen und z.T. im Niederlausitzer-Altmoränen-Land. Dabei waren niedrige pH(KCl)-Werte in den mittleren und höheren Berglagen stärker ausgeprägt als niedrige pH(H_2O)-Werte. In den verbleibenden Landesteilen war kein eindeutiger regionaler Trend zu beobachten. Für die Wiederholungsinventur zeichnet sich ein sehr heterogenes Bild ab (Anhang: Abb. I-62, Abb. I-67). Überdurchschnittlich viele Standorte mit hohen pH-Werten prägen Nord- und Nordostsachen, aber auch das von Löss beeinflusste Hügelland Mittelsachsens. Insgesamt gab es einen deutlichen Anstieg der pH-Werte in fast allen Regionen Sachsens (Anhang: Abb. I-63, Abb. I-68). Nur wenige Standorte verzeichneten abnehmende pH-Werte. Die Anteile in den Perzentilen haben sich mit der Wiederholungsinventur stark verschoben (Anhang: Tab. I-13, Tab. I-14). Die Anzahl von sehr sauren Standorten ist gegenüber der Erstinventur um ca. 20 % gesunken. Auch die Anzahl der als niedrig zu bewerteten Standorte hat stark abgenommen. Mit der Wiederholungsinventur hat sich die Anzahl von Standorten mit pH(H_2O)-Werten > 3,94 bzw. pH(KCl)-Werten > 3,35 mehr als verdoppelt. Lediglich bei den als sehr hoch bewerteten Standorten gab es nur eine leichte Zunahme mit der BZE II.

3.6.3 Bewertung der Pufferreaktionen

Der Säurezustand der Waldböden wirkt sich entscheidend auf die Lebensbedingungen der Bodenorganismen, die Verfügbarkeit von Nährstoffen und die Nitrifizierung aus. Er bestimmt ferner die Gefahr des Auftretens von toxisch wirkenden Aluminium- und Schwermetallkationen in der Bodenlösung. Die in der Lösungsphase des Mineralbodens gemessenen pH-Werte lassen sich jeweils bestimmten Pufferbereichen mit spezifischen ökologischen Funktionen zuordnen. Die nach der Ad-hoc-AG-Boden (2005) klassifizierten Pufferbereiche gliedern sich in den Carbonat-Pufferbereich (pH > 6,2), den Silikat-Pufferbereich (6,2 < pH > 5,0), den Austauscher-Pufferbereich (5,0 < pH > 4,2), den Aluminium-Pufferbereich (4,2 < pH > 3,0) und den Eisen-Pufferbereich (pH < 3,0). Für das Pflanzenwachstum, den Humusgehalt im Boden und in der Nährstoffverfügbarkeit liegen entsprechend der Standortbedingungen die optimalen Boden-pH-Werte zwischen 5,4 bis 7,0, was aber bei den gegebenen geologischen Ausgangsbedingungen für sächsische Waldböden sehr selten zu erwarten ist. Kritisch ist die chemische Zusammensetzung der Bodenlösung unterhalb einem pH-Wert von 4,2 zu sehen, da zusätzlich zu den Protonen auch die das Pflanzenwachstum und die Bodenlebewesen schädigende Aluminium- und Eisenionen von der Bodenmatrix in die Bodenlösung gelangen und aufgespeicherte Schwermetallvorräte verstärkt mobilisiert werden können.

Die pH-Werte des Bodens wurden in wässriger Suspension (pH[H_2O]) und in 0,1 Mol. Salzsuspension (pH[KCl]) bestimmt. Die in reiner Boden-Wasser-Suspension ermittelten Werte geben den aktuellen Zustand der Säurebelastung an, die sowohl aus biologischen Prozessen als auch aus den Säureeinträgen mit den Niederschlägen herrühren kann. Die pH(H_2O)-Werte unterliegen daher stärker saisonalen Schwankungen. Anders verhält es sich mit dem in der Salzsuspension gemessenen Werten, da diese einen weitgehend unabhängigen Eindruck der potenziellen Azidität wiedergeben. Bei der Zugabe von Salzen kann zum einen ein Austausch von Ionen stattfinden, zum anderen können austauschbar gebundene Protonen in Lösung gehen. Anhand der pH(KCl)-Werte lässt sich somit die maximal mögliche Säurestärke feststellen. Die in KCl-Lösung bestimmten pH-Werte sind normalerweise um 0,6 bis 0,8 pH-Wert-Einheiten geringer als die in Wasser gemessenen, was v.a. als Resultat der erhöhten Protonenkonzentrationen durch Hydrolyse infolge verstärkter Freisetzung von Aluminiumionen gedeutet wird (Backes 1993).

Die in den Karten angegebenen Pufferbereiche in wässriger Suspension zum Zeitpunkt der BZE I (Abb. 32) und BZE II (Abb. 32, Abb. 33) liegen vorrangig im Aluminium- und daneben auch im Austauscher-Pufferbereich. Nur zwei Untersuchungspunkte befinden sich im Silikat-Pufferbereich. Zur Erstinventur dominieren in allen Landesteilen Aluminium-Pufferbereiche. Lediglich in der Übergangszone von Sächsisch-Thüringischem-Löss-Hügelland, Erzgebirgsvorland und Elbtalzone sowie im Niederlausitzer Altmoränenland gibt es Standorte im ökologisch günstigeren Austauscher-Pufferbereich. Mit der Wiederholungsinventur nehmen die Standorte im Austauscher-Pufferbereich zu, was besonders im Erzgebirge und im Dübener-Altmoränenland deutlich wird.

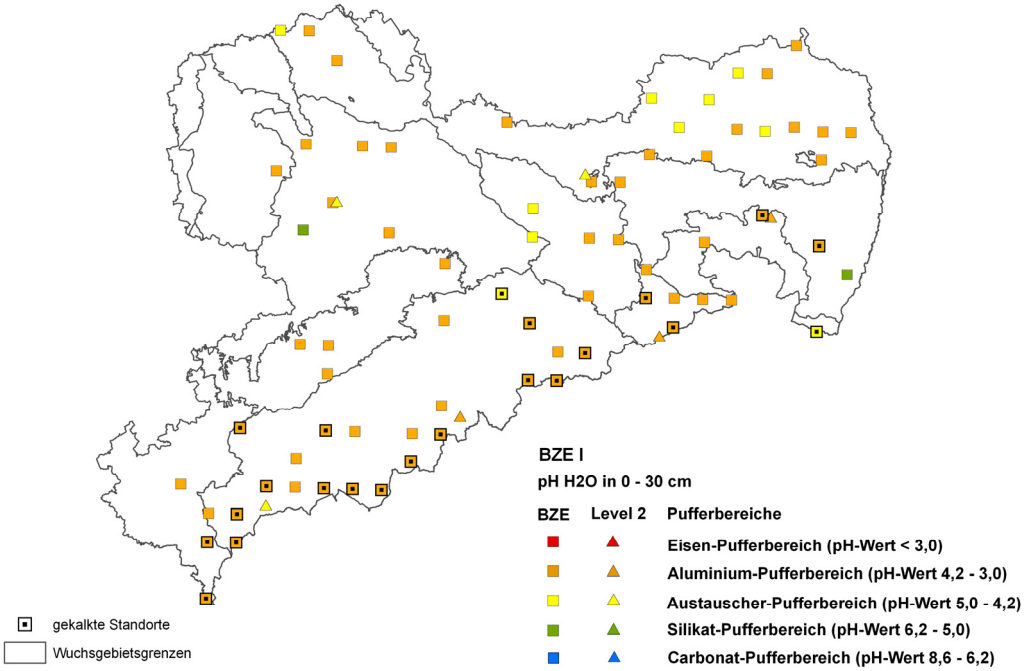

Abb. 32: Räumliche Verteilung der Pufferbereiche zur BZE I gemessen in wässriger Lösung.

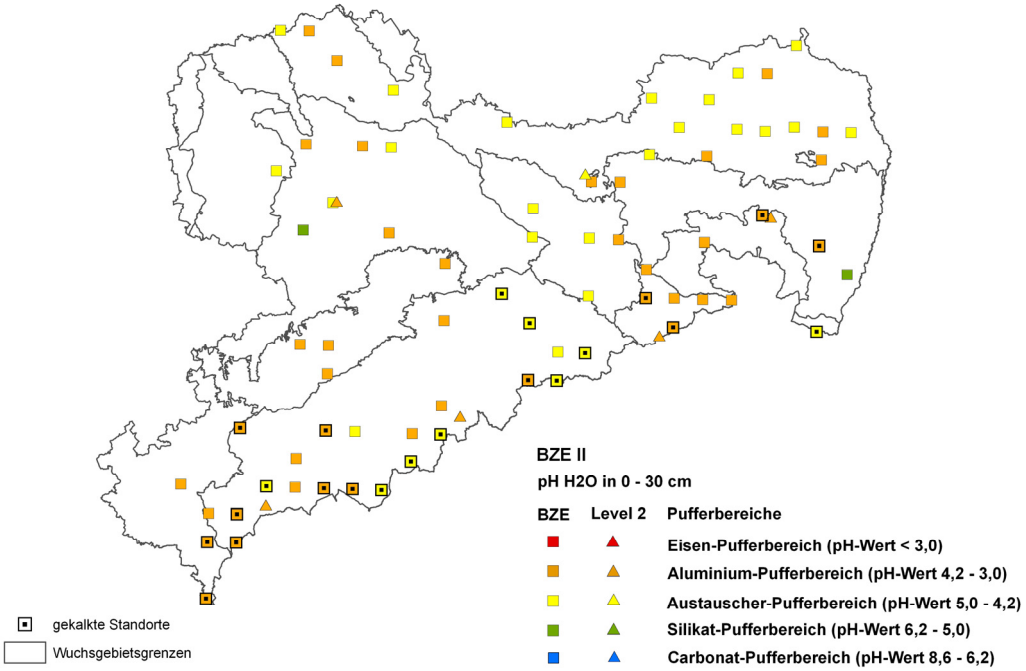

Abb. 33: Räumliche Verteilung der Pufferbereiche zur BZE II gemessen in wässriger Lösung.

Anders verhält es sich mit der Verteilung der Standorte, wenn deren Pufferbereiche durch in Salzsuspension gemessene pH-Werte bestimmt wurden (Abb. 34, Abb. 35). Zum Zeitpunkt der BZE I lagen bis auf einige Punkte im Erzgebirge, die sich im von extremen Nährstoffmangel und Aluminiumtoxizität geprägten Eisen-Pufferbereich befanden, die meisten Untersuchungspunkte im Aluminium-Pufferbereich. Mit der Widerholungsinventur änderte sich die Situation im Erzgebirge deutlich. Nahezu alle Standorte, die zur BZE I im Eisen-Pufferbereich lagen, sind in den als ökologisch besser zu bewertenden Aluminium-Pufferbereich überführt worden. Für die anderen Landesteile hat sich kaum etwas geändert. Lediglich im Niederlausitzer-Altmoränen-Land haben einige Standorte einen ökologisch besseren Zustand hinsichtlich ihrer Pufferkapazitäten erreicht.

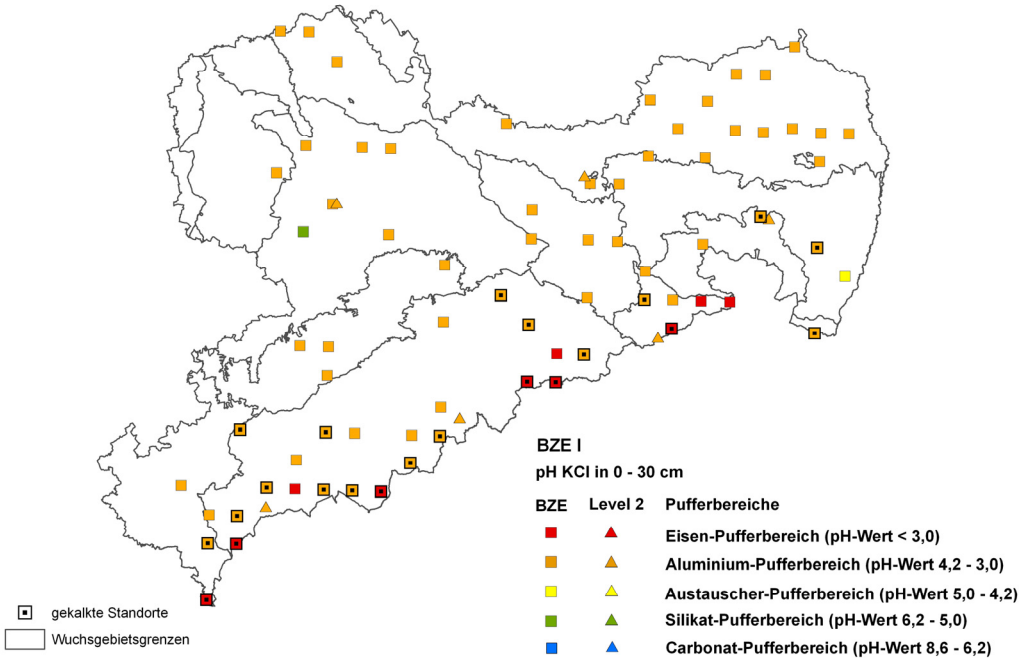

Abb. 34: Räumliche Verteilung der Pufferbereiche zur BZE I gemessen in einer Salzlösung.

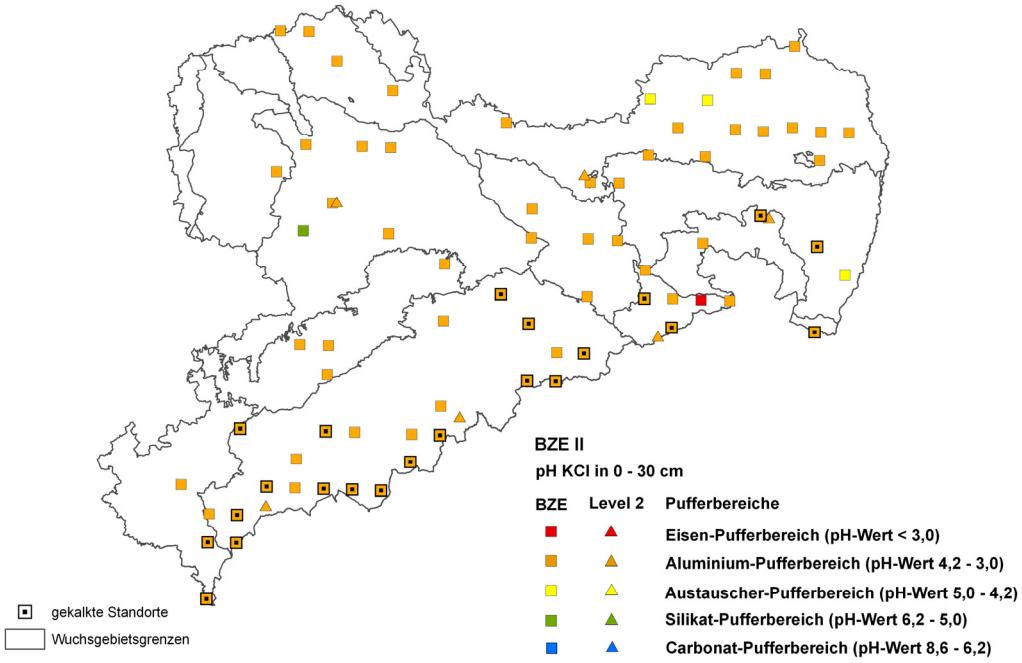

Abb. 35: Räumliche Verteilung der Pufferbereiche zur BZE II gemessen in einer Salzlösung.

3.6.4 Fazit zur Bodenreaktion und Pufferbereichen

Die Bodenacidität in der organischen Auflage zwischen beiden Bodeninventuren hat zwar abgenommen, jedoch liegen v.a. die pH-Werte des Oh-Horizonts weiterhin im stark bis sehr stark sauren Bereich. Die Anzahl der Standorte mit „sehr gering“ bewerteten pH-Werten hat mit der Wiederholungsinventur abgenommen. Andererseits hat die Anzahl der als hoch bewerteten Standorte deutlich zugenommen. Insbesondere sandige Standorte des Düberner-Niederlausitzer-Altmoränen-Landes und teilweise von Löss geprägte Standorte des Hügellandes sind von sinkenden pH-Werten in der organischen Auflage geprägt. Dagegen nahmen in den mittleren und höheren Berglagen die pH-Werte deutlich zu. Generell waren die pH-Werte im Mineralboden deutlich höher als in der organischen Auflage. Zudem hat die Bodenacidität seit der Erstinventur in allen Tiefenstufen abgenommen. Die Anzahl der Standorte mit gering bewerteten pH-Werten ist seit der Erstinventur zurückgegangen, wohingegen Standorte mit mittel bis hoch bewerteten pH-Werten deutlich zugenommen haben. Die meisten Standorte mit den niedrigeren pH-Werten befanden sich in den mittleren und höheren Berglagen und z.T. im Niederlausitzer-Altmoränen-Land. In den verbleibenden Landesteilen war kein eindeutiger regionaler Trend ausgeprägt. Auch für die Wiederholungsinventur zeichnete sich ein sehr heterogenes Bild ab.

Die Unterschiede zwischen pH(H_2O) und pH(KCl) sind sowohl in der organischen Auflage als auch im Mineralboden zur Wiederholungsinventur geringer als zur Erstinventur. Dies deutet darauf hin, dass die Versauerung in Sachsen abgenommen hat. Beim Vergleich der Pufferbereiche

gemessen in Salzsuspension (KCl) zwischen beiden Inventuren wird deutlich, dass durch Kalkungsmaßnahmen im Erzgebirge die Nährstoffverfügbarkeit erhöht und die Aluminiumtoxizität reduziert werden konnte.

3.6.5 Kationenaustauschkapazität und Basensättigung

Der Kationenaustausch im Boden spielt eine wichtige Rolle, da an Austauschern gebundene Nährkationen eine relativ leicht verfügbare Quelle darstellen. Die effektive Kationenaustauschkapazität (AK_e) spiegelt die tatsächliche Austauschkapazität bei gegebenen pH-Wert des Bodens wieder. Neben der Höhe der Austauschkapazität ist die Art der gebundenen Kationen entscheidend. Daher wird die Basensättigung (BS), die den prozentualen Anteil von basischen Nährkationen (Ca, Mg, K und Na) an der AK_e repräsentiert, zusätzlich angegeben, um einen Standort zu charakterisieren.

Die mittlere effektive Austauschkapazität (AK_e) (ohne Natrium) nahm mit zunehmender Tiefe ab (Abb. 36). Sowohl in den oberen 30 cm des Mineralbodens (Tab. 43, Tab. 44) als auch innerhalb der einzelnen Tiefenstufen gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen BZE I und BZE II (Abb. 36). Die AK_e nahm mit der Tiefe ab

Die mittlere Basensättigung (BS) (ohne Natrium) nahm mit zunehmender Bodentiefe ab (Abb. 37). Die BS in den oberen 30 cm des Mineralbodens unterschied sich nicht signifikant zwischen beiden Erhebungen (Tab. 43, Tab. 44). Bei Betrachtung der Tiefenstufen konnte lediglich in 5-10 cm Tiefe eine signifikante Abnahme der BS festgestellt werden ($P = 0{,}031$; Abb. 37).

Tab. 43: Statistische Kennwerte der effektiven Kationenaustauschkapazität (µmol g^{-1}) und der Basensättigung (%) der oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE I.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
AK_e	10,65	236,26	70,79	70,50	40,60	79
BS	2,82	98,08	10,49	14,65	16,06	79

Tab. 44: Statistische Kennwerte der effektiven Kationenaustauschkapazität (µmol g^{-1}) und der Basensättigung (%) der oberen 0-30 cm des Mineralbodens für die BZE II.

	Min	Max	Median	Mittelwert	Std	n
AK_e	10,72	277,67	72,09	72,55	42,63	82
BS	1,80	97,49	8,61	12,90	16,49	82

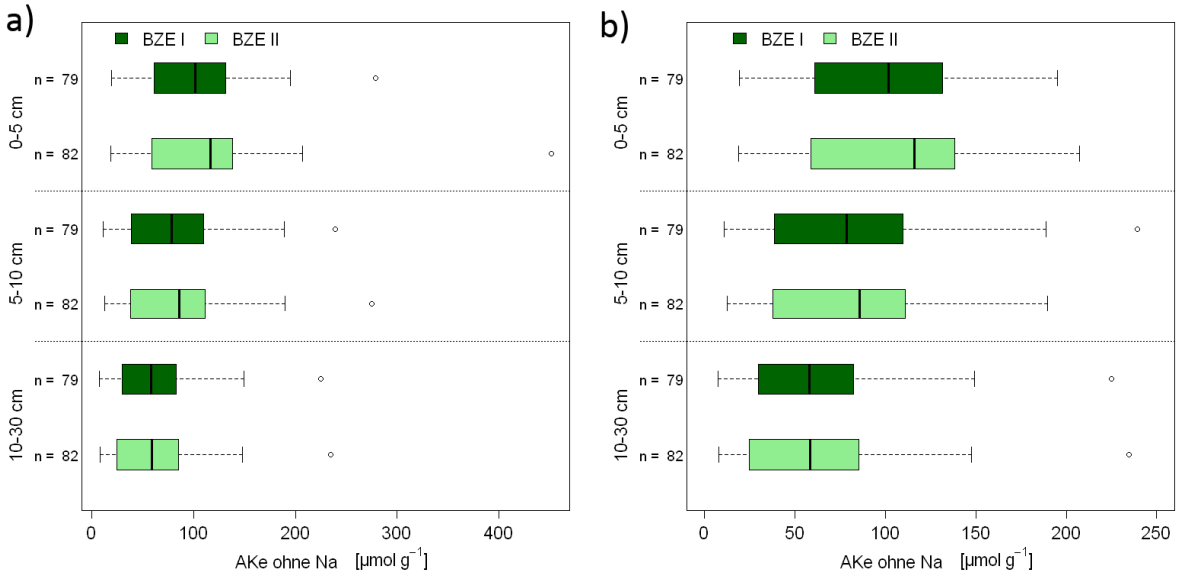

Abb. 36: Tiefenprofil der effektiven Kationenaustauschkapazität ohne Natrium dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Mineralbodentiefe (n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 250 µmol g^{-1}.

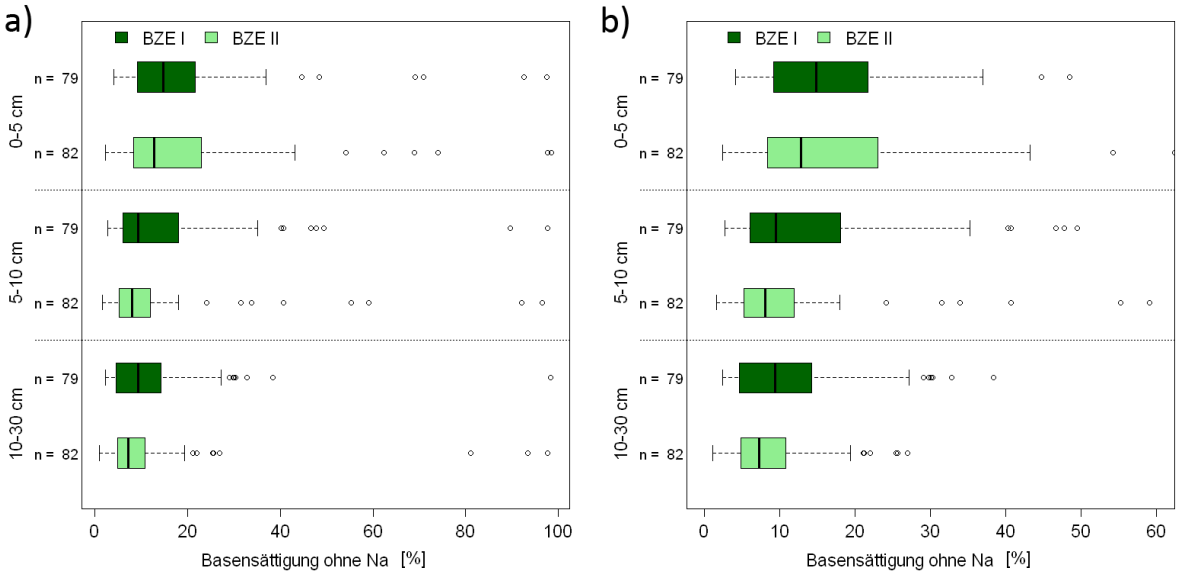

Abb. 37: Tiefenprofil der Basensättigung ohne Natrium dargestellt für 0-5 cm, 5-10 cm und 10-30 cm Mineralbodentiefe (n = Stichprobenanzahl). a) mit allen Ausreißern b) gekappt bei 60 %.

3.6.6 Bewertung der Standorte hinsichtlich der effektiver Austauschkapazität und Basensättigung

Die Verteilung der Basensättigung (BS) war deutlich rechtsschief (Abb. 37, Anhang: Abb. I-89), d.h. es gab viele Standorte mit einer sehr niedrigen BS von < 20 % und sehr wenige Standorte mit hoher BS > 80 %. Es wurden vorwiegend carbonatfreie Standorte mit sehr niedriger BS beprobt, die durch eine sehr niedrige BS gekennzeichnet sind. Eine Zunahme der BS seit der BZE I erfolgte vor allem in den mittleren und hohen Berglagen und ist vermutlich auf die Bodenschutzkalkung zurückzuführen (Anhang: Abb. I-88, Abb. I-93). Abnahmen der BS wurden vor allem im Tiefland aber auch im Hügelland beobachtet. Bei der BZE I wiesen die Standorte der Berglagen die niedrigste BS auf, während die höchsten Werte im Tief- und Hügelland vorkamen (Anhang: Abb. I-86, Abb. I-91). Mit der BZE II ergaben sich jedoch keine systematischen räumlichen Unterschiede in Sachsen (Anhang: Abb. I-87, Abb. I-92).

Obwohl die AK_e der untersuchten Standorte als „mittel“ eingestuft werden kann (AK_Standortskartierung 2003), spiegelt die niedrige als „basenarm“ einzustufende BS die starke Versauerung der meisten Standorte wider. Eine Kalkung könnte die Nährstoffversorgung der Bäume mit basischen Kationen jedoch über einen gewissen Zeitraum sicherstellen.

3.6.7 Fazit zur Kationenaustauschkapazität und Basensättigung

Obwohl die AK_e der untersuchten Standorte als „mittel“ beurteilt wird (AK_Standortskartierung 2003), spiegelt die insgesamt niedrige Basensättigung, die starke Versauerung der meisten Standorte in Sachsen wider.

4 Beziehung zwischen forstlichen Standorteigenschaften, Bestandesstruktur und Kalkung

4.1 Einfluss der Bodenform auf die Eigenschaften der Auflagemächtigkeit

Um den Einfluss der Bodenform auf die Bodenchemie zu untersuchen wurden die BZE und DBF-Standorte entsprechend ihrer Lokalbodenform in Bodenformengruppen zusammengefasst (Tab. 45).

Tab. 45: Zuordnung der Lokalbodenformen zu den Bodenformengruppen.

Nr.	Bodenformengruppe	Lokalbodenform
1	Basalt; Braunerde	RsBa1
2	Lösslehm; Braunerdegruppe (Braunerde u. Braunstaugleye)	NaLL1, LuLB1, MaLB1, WuLB1, GbLB1
3	Lösslehm; Staugleye	WmLU1, LiLU1, GbLU1, WhLU1
4	Decksand ü. Lehm; Staugleye	RöLU2, BaLU1
5	Gneis; Braunerdegruppe (Braunerde u. Braunstaugleye)	OgGn1, WoGn1, RoGn1, HgGn1, OgGB1
6	Granit u.a. (Porphyr, Syenit); Braunerdegruppe (Braunerde u. Braunstaugleye)	RaGt1, HoGB1, LeP1, CoSy1, HoGt1, SöGt1
7	Grundgestein (Gneis, Granit, Phyllit, Schiefer, Phonolith, Lehmsandstein); Braunpodsole	NeGn1, EbGt1, LoLs1, NiLs1, TePh1, LüPl1, WiSf1, CdLs1
8	Grundgestein (Granit, Porphyr, Sandstein); Podsole	RiGt1, KaP1, ReSn1
9	Sand-Granit; Braunerdegruppe (Braunerde u. Braunstaugleye)	LaGt1, HeGt1, MoGB1
10	Phyllit u. Schiefer; Braunerden	EfPh1, ZwPh1, BdSf1, BlSf1, LaSf1, AdPh1
11	Grundgestein (Granit, Porphyr); Humusstaugleye	RiGG1, KlGG1
12	pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft; terrestrisch	MzS1, NeS1, BtS1, GlS1
13	pleist. Sandformen ziemlich armer Nährkraft; terrestrisch	KoS1, SaS1, ZhS1, BäS1
14	armer Graugley	SpSU1
15	pleist. Sand; Gleypodsole	LuSB1, WbSB1, GtSB1
16	vollhydromorphe Böden; (Humusgley, Moor)	ScSG1
-1	Sonstiges	YdSm1, PoH1, NfLL1, SMz1

Bei der Auswertung wurden nur solche Bodenformengruppen berücksichtigt bei denen zu beiden Inventuren jeweils mindestens drei Punkte beprobt wurden. Dieses waren Braunstaugleye auf Lösslehm (2), Staugleye auf Lösslehm (3), Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis (5), Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a. (6), Braunpodsole auf Grundgestein (7), Podsole auf Grundgestein (8), Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit (9), Braunerden auf Phyllit u. Schiefer (10), pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft (12), pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft (13), Gleypodsole auf pleistozänen Sanden (15).

4.1.1 Humusauflage und Feinbodenvorrat

Die Auflagemächtigkeit unterschied sich nicht signifikant zwischen den Gruppen. Die gesamte Auflage erreichte eine Mächtigkeit (BZE II) von 3,8 ± 1,2 bis 7,5 ± 4,5 cm. Die Mächtigkeit des L+Of-Horizonts reichte von 2,0 ± 0,7 bis 3,9 ± 1,9 cm und der Oh-Horizont von 1,8 ± 1,0 bis 3,6 ± 2,6 cm.

Wie bei der Auflagemächtigkeit gab es auch beim Auflagevorrat (Abb. 38) zu keinem Inventurzeitpunkt signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen. Die Auflagevorräte (BZE II) reichten von 69 ± 20 t ha^{-1} bei Gruppe 10 (Grundgesteins-Humusstaugleye) bis 130 ± 44 und 174 ± 106 t ha^{-1} bei den Gruppen 9 (Sand-Granit-Braunerdegruppe) und 15 (Sand-Gleypodsole). Davon nahm der L+Of-Horizont 22 ± 13 bis 66 ± 29 t ha^{-1} ein, die Vorräte des Oh-Horizonts reichten von 40 ± 12 bis 109 ± 78 t ha^{-1}.

Beim Feinbodenvorrat des Mineralbodens (Abb. 38) teilten sich die Bodenformengruppen in zwei Teile (ANOVA, $P < 0{,}001$): auf der einen Seite standen mit Werten zwischen 3270 ± 350 und 4330 ± 230 t ha^{-1} die Gruppen 2, 3, 12, 13 und 15 als die Böden mit geringen oder keinem Anteil an Grobboden (Gruppen mit Lösslehm oder pleistozänem Sand). Auf der anderen Seite waren mit den Gruppen 5, 6, 7 und 10 und Werten zwischen 1760 ± 350 und 2350 ± 470 t ha^{-1} die Grundgesteinsverwitterungsböden zu finden. Die Gruppen 8 (Grundgesteinspodsole) und 9 (Sand-Granit Braunerdergruppe) lagen mit 2600 ± 1420 und 3100 ± 740 t ha^{-1} Feinbodenvorräten zwischen den beiden zuvor genannten Teilkollektiven. In der Tiefenstufe 0-10 cm reichten die Werte von 610 ± 110 bis 1330 ± 110 t ha^{-1}, in der Tiefenstufe 10-30 cm von 1300 ± 300 bis 3000 ± 160 t ha^{-1}.

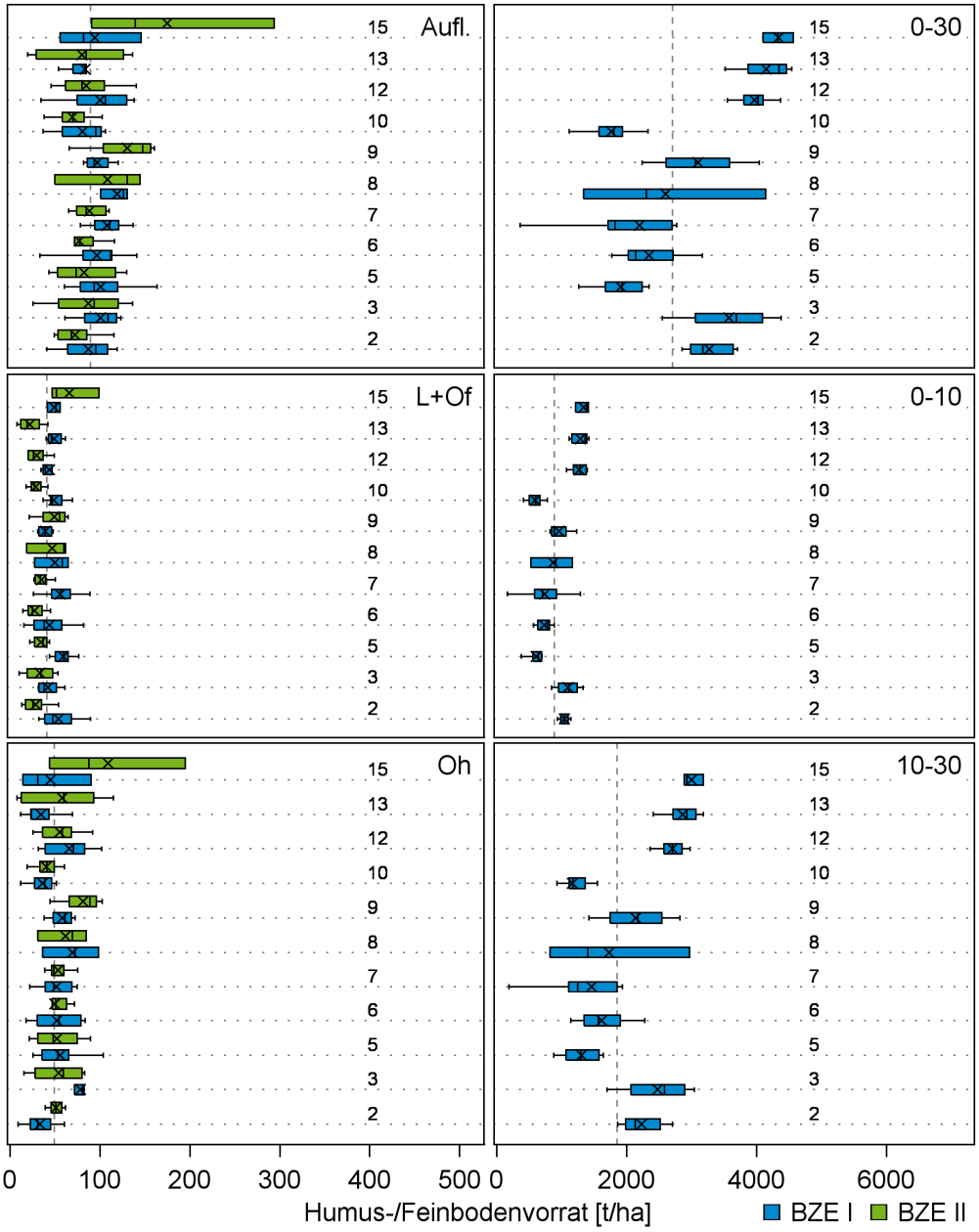

Abb. 38: Humusvorrat der Auflage (links) und Feinbodenvorrat des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm) (rechts) gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden.

4.1.2 Kohlenstoffkonzentration

Bei der Kohlenstoff (C)-Konzentration der organischen Auflage (Abb. 39) gab es zu beiden Inventurzeitpunkten signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$, ANOVA, $P < 0{,}001$). Hohe C-Konzentrationen mit BZE II-Mittelwerten zwischen 35,6 ± 5,1 % und 38,3 ± 4,9 % fanden sich in der Auflage der Gruppen 5, 6, 7, 8 und 10 (Grundgesteins-Braunerden, -Braunpodsole u. -Podsole), niedrige BZE II-Mittelwerte mit Werten von 30,4 ± 5,1 % und 25,6 ± 5,0 % lagen in der Auflage der Gruppen 12 und 13 vor (terr. pleist. Sandformen mittlerer u. ziemlich armer Nährkraft). Während im L+Of-Horizont keine Unterschiede zwischen den Bodenformengruppen festgestellt werden konnten, war im Oh-Horizont die C-Konzentration in Gruppe 13 mit 20,5 ± 5,4 % signifikant niedriger als in den Mittelgebirgsgruppen 5, 6, 7, 8 und 10 mit Werten zwischen 31,7 ± 6,8 % und 35,3 ± 5,5 % (ANOVA, $P < 0{,}001$). Bei Gruppe 15 war eine deutliche Abnahme zwischen beiden Inventuren zu verzeichnen.

Im Mineralboden (Abb. 39) unterschieden sich die C-Konzentrationen zwischen den Gruppen sowohl bei der BZE I als auch bei der BZE II (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$, bzw. ANOVA, $P < 0{,}001$). Insbesondere in den Gruppen 12 und 13 (terr. pleist. Sandformen) waren die C-Konzentrationen (BZE II) mit 1,7 ± 0,5 %, bzw. 1,0 ± 0,5 % deutlich niedriger als in den anderen Gruppen. Die höchsten C-Konzentrationen (BZE II) wurden in den Gruppen 5 mit 3,4 ± 1,0 % (Gneis-Braunerdegruppe), 7 mit 3,6 ± 1,7 % (Grundgesteins-Braunpodsole) und 10 mit 3,7 ± 1,3 % (Pyllith/Schiefer-Braunerden) erreicht. In der Tiefenstufe 0-10 cm waren bei beiden Inventuren vor allem in der Gruppe 10 mit BZE II-Werten von 6,3 ± 1,7 % aber auch in den Gruppen 5 und 7 mit 5,1 ± 1,1 % und 4,9 ± 1,9 % die Werte deutlich höher als in den Tieflandböden 12, 13 und 15 mit 3,1 ± 1,1 %, 1,7 ± 0,7 % und 2,1 ± 0,7 % (Welch-ANOVA, $P < 0{,}001$). Gegenüber Gruppe 10 signifikant niedrigere C-Konzentrationen traten auch in den Gruppen 2 und 9 mit 3,7 ± 0,7 % und 3,1 ± 0,6 % auf. In der Tiefenstufe 10-30 cm ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen 5 und 7 mit 2,6 ± 1,1 % und 2,8 ± 1,5 %. zu der Gruppe 13 mit 0,7 ± 0,4 % (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$).

4.1.3 Kohlenstoffvorrat

Beim C-Vorrat der Auflage konnten bei keiner Inventur weder im L+Of noch im Oh oder der gesamten Auflage signifikante Unterschiede festgestellt werden. Allerdings war zwischen den Inventuren im Oh eine stärkere Abnahme im Vergleich zum L+Of zu verzeichnen. Die Unterschiede zwischen den Gruppen waren signifikant (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$).

Während sich über den gesamten Mineralboden in der Tiefenstufe 10-30 cm bei keiner Inventur signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen ergaben, war in der Tiefenstufe 0-10 cm der C-Vorrat in der Gruppe 13 mit 20,7 ± 7,2 t ha^{-1} signifikant kleiner als in der Gruppe 2 mit 37,9 ± 7,0 t ha^{-1} (ANOVA, $P < 0{,}05$). Die Gesamtvorräte des Mineralbodens der Bodenformengruppen reichten von 39,2 ± 14,3 t ha^{-1} in Gruppe 13 (terr. pleist. ziemlich arme

Sandformen) bis 81,6 ± 37,6 t ha^{-1} in Gruppe 3 (Lösslehm-Staugleye). Zwischen den Inventuren war in Gruppe 8 (Grundgesteinspodsole) die stärkste Zunahme zu verzeichnen (ANOVA, $P < 0{,}05$).

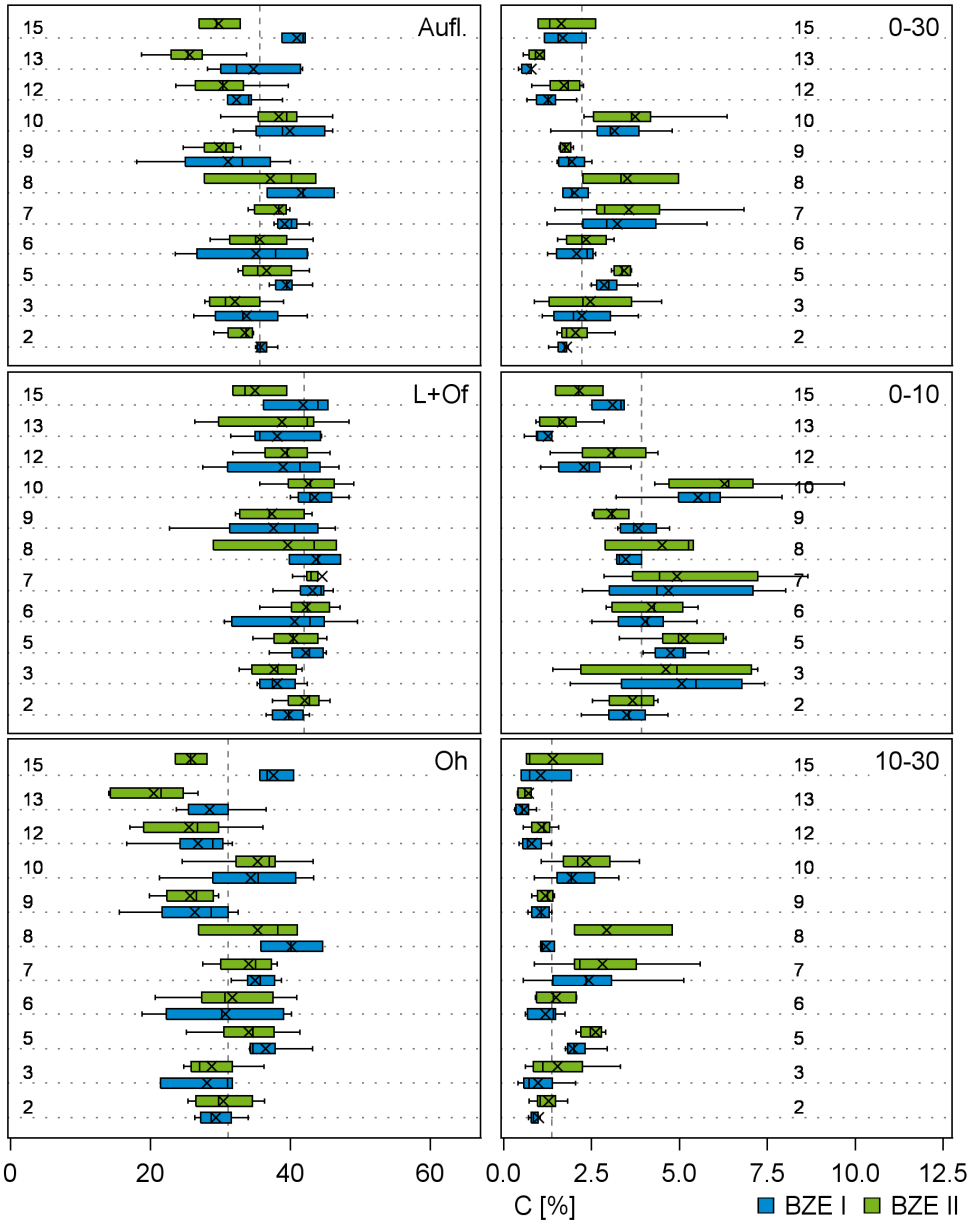

Abb. 39: Kohlenstoffkonzentration gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden.

4.1.4 Stickstoffkonzentration

Die Stickstoff (N)-Konzentrationen waren sowohl in der Auflage als auch im Mineralboden in den Bodenformengruppen des Tieflands (12, 13, 15) im Vergleich zu denen der übrigen Böden deutlich niedriger (Abb. 40). In der Auflage waren die Unterschiede bei der BZE II ausgeprägter. Die N-Konzentrationen der Auflage waren in den Bodenformengruppen des Tieflands (12, 13, 15) mit Werten zwischen 0,87 ± 0,18 % und 1,26 ± 0,18 % niedriger als in den übrigen Gruppen mit Ausnahme von 9 (Sand-Granit-Braunerdegruppe), mit BZE II-Mittelwerten zwischen 1,50 ± 0,42 % und 1,72 ± 0,22 % (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$, bzw. ANOVA, $P < 0{,}001$). Diese Tendenz zeigte sich sowohl im L+Of- als auch im Oh-Horizont.

Im Mineralboden wurden die niedrigsten Werte ebenfalls in den Tieflands-Gruppen 12, 13 und 15 erreicht, mit einer N-Konzentration bei der BZE II von 0,07 ± 0,02 %, 0,04 ± 0,01 % und 0,05 ± 0,02 % (Abb. 40). Die höchsten N-Konzentrationen traten bei der BZE II in den Gruppen 5 (Gneis-Braunerdegruppe) mit 0,16 ± 0,04 % und 10 (Phyllith/Schiefer-Braunerden) mit 0,18 ± 0,05 % auf (Welch-ANOVA, $P < 0{,}001$, bzw. ANOVA, $P < 0{,}001$). In der Tiefenstufe 0-10 cm reichte die Spannweite bei der BZE II von 0,27 ± 0,06 % in Gruppe 10 bis 0,06 ± 0,02 % in Gruppe 13. Die Unterschiede zwischen den Gruppen mit hohen und niedrigen N-Konzentrationen waren signifikant (Welch-ANOVA, $P < 0{,}001$), es unterschieden sich dabei aber auch die beiden Tiefland-Bodenformengruppen 12 und 13. Auch in der Tiefenstufe 10-30 cm war die N-Konzentration in den Böden der Gruppen 12, 13 und 15 geringer als in der entsprechenden Tiefenstufe der Gruppen 5, 7 und 10. Die Spanne der N-Konzentrationen reichte von 0,03 ± 0,01 % in Gruppe 13 bis 0,13 ± 0,04 % in Gruppe 5. Im Unterschied zu der Tiefenstufe 0-10 cm traten auch in Böden der Gruppe 9 mit 0,05 ± 0,01 % im Vergleich zu den Gruppen 5 und 10 niedrigere N-Konzentrationen auf.

Insgesamt waren die N-Konzentrationen der Auflage bei der BZE II niedriger als bei der BZE I (Kapitel 3.3). Dies war besonders im L+Of-Horizont ausgeprägt. Unterschiede gab es zwischen den Bodenformengruppen in der Entwicklung zwischen den Inventuren der N-Konzentration aber nicht.

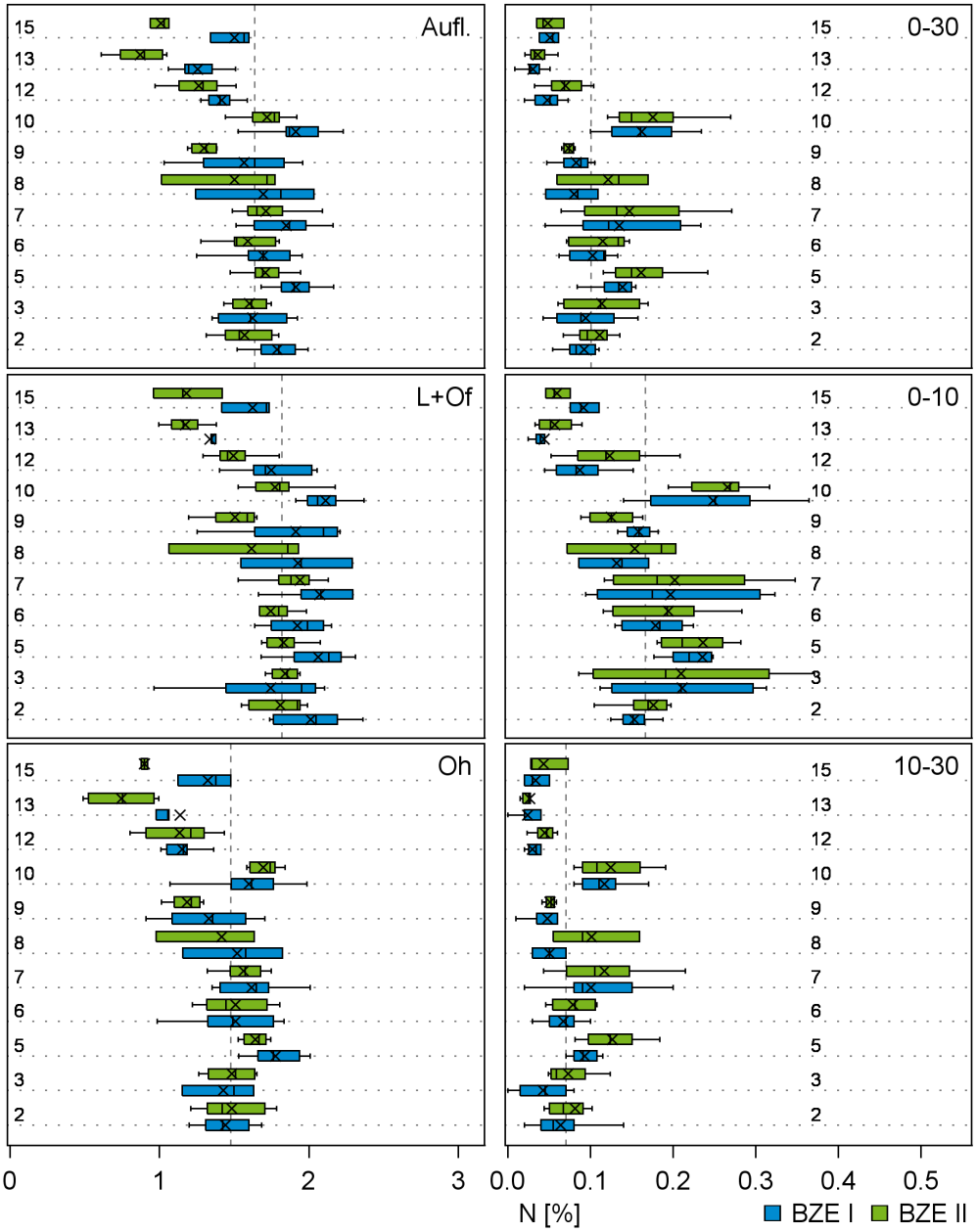

Abb. 40: Stickstoffkonzentration gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden.

4.1.5 Stickstoffvorrat

In der Auflage ergaben sich zwischen den Gruppen aufgrund der hohen Streuung keine signifikanten Unterschiede im N-Vorrat (Abb. 41). Allerdings waren bei getrennter Betrachtung der Auflagehorizonte Unterschiede erkennbar. Im L+Of-Horizont waren Unterschiede zwischen den Gruppen bei beiden Inventuren signifikant (ANOVA, $P < 0{,}05$, Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$), im Oh-Horizont war dies nur bei der BZE I der Fall (ANOVA, $P < 0{,}05$). Der Spanne der N-Vorräte reichte bei der BZE II für die Gesamtauflage von 0,26 ± 0,15 in Gruppe 13 (terr. pleist. ziemlich arme Sandformen) bis 1,79 ± 1,16 t ha^{-1} in Gruppe 15 (Sand-Gleypodsole). Somit nahmen Tieflandgruppen die beiden Extrema ein.

Die N-Vorräte im Mineralboden (Abb. 41) unterschieden sich sowohl zur Erstinventur (ANOVA, $P < 0{,}01$) als auch zur Wiederholungsinventur (ANOVA, $P < 0{,}05$) zwischen den Gruppen. Signifikant waren die Unterschiede zwischen der Gruppe 13 (terr. pleist. ziemlich arme Sandformen) mit dem niedrigsten Vorrat von 1,5 ± 0,3 t ha^{-1} zu der Gruppe 2 (Lösslehm-Braunerdegruppe) mit einem Vorrat von 3,6 ± 1,2 t ha^{-1}. Ebenfalls hohe Vorräte erreicht die Gruppe 3 (Lösslehm-Staugleye) mit 3,9 ± 1,5 t ha^{-1}. Zwischen Gruppe 2 (Lösslehm-Braunerdegruppe) und 15 (Sand-Gleypodsole) unterschied sich das Verhältnis zwischen Auflage und Mineralboden am stärksten, da in Gruppe 2 dreimal so viel N im Mineralboden wie in der Auflage gespeichert wurde. In Gruppe 15 (Sand-Gleypodsole) war dagegen der Vorrat der Auflage fast genauso hoch wie im Mineralboden. In der Tiefenstufe 0-10 cm traten Unterschiede vor allem zwischen den Tieflandböden der Gruppen 13 und 15 mit niedrigen N-Vorräten von 0,71 ± 0,22 und 0,79 ± 0,22 t ha^{-1} zu den übrigen Böden mit maximal 2,19 ± 1,27 t ha^{-1} in Gruppe 3 (Lösslehm-Staugleye) hervor (ANOVA, $P < 0{,}001$). Auch in der Tiefenstufe 10-30 cm waren in der Gruppe 13 ziemlich arme pleist. Sandformen) die N-Vorräte mit 0,70 ± 0,26 t ha^{-1} deutlich niedriger als in den übrigen Gruppen mit maximal 1,75 ± 0,89 t ha^{-1} in Gruppe 2 (Lösslehm-Braunerdegruppe).

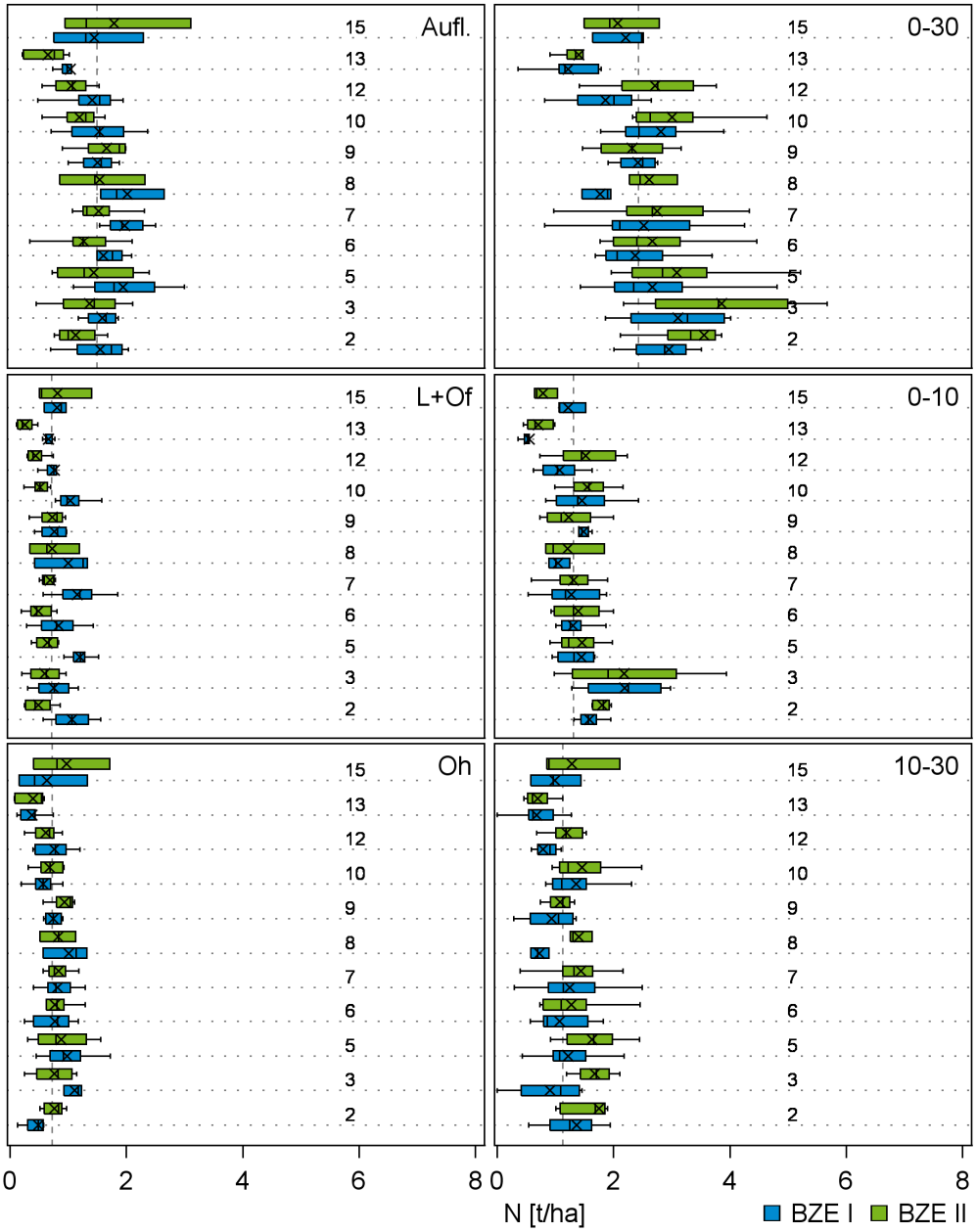

Abb. 41: Stickstoffvorrat gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden.

4.1.6 C/N-Verhältnis

Die C/N-Werte der organischen Auflage (Abb. 42) unterschieden sich zwischen den untersuchten Bodenformengruppen zu beiden Inventurzeitpunkten (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$, Welch-ANOVA, $P < 0{,}001$). Das C/N-Verhältnis (BZE II) der Gruppen 13 (terr. pleist. ziemlich arme Sandformen) und 15 (Sand-Gleypodsole) mit Werten von 29,8 ± 3,9 und 29,5 ± 3,6 war signifikant weiter als in den restlichen Gruppen 2, 3, 5, 6, 7, 9 und 10 mit Werten von 20,0 ± 2,2 bis 23,0 ± 2,6. Nur Gruppe 12 (terr. pleist. mittlere Sandformen) hatte mit 24,2 ± 2,4 ein gegenüber den Gruppen 13 und 15 nicht signifikantes engeres C/N-Verhältnis. Derselbe Trend zeigte sich auch bei getrennter Betrachtung des L+Of- und Oh-Horizonts, wobei im Oh-Horizont die Unterschiede zwischen den Bodenformengruppen ausgeprägter waren. Hier erreichten die Gruppen 13 und 15 BZE II-Werte von 29,8 ± 3,9 und 27,9 ± 3,6. Die C/N-Werte der Gruppen 2, 3, 5, 6, 7, 9 und 10 reichten von 19,4 ± 2,1 bei Gruppe 3 bis 21,7 ± 2,8 bei Gruppe 9. Auch Gruppe 12 unterschied sich mit einem C/N-Verhältnis im Oh-Horizont von 22,4 ± 2,4 signifikant von den beiden anderen Tiefland-Bodenformengruppen. Unter den Bodenformengruppen der Mittelgebirge zeigte Gruppe 8 (Granit-Podsole) ein weiteres C/N-Verhältnis als die übrigen Gruppen. Im L+Of-Horizont reichte die Spanne von 20,5 ± 2,7 bei Gruppe 3 bis 32,8 ± 4,9 bei Gruppe 13. Im L+Of-Horizont nahm das C/N-Verhältnis insgesamt zwischen den Inventuren deutlich zu (Kapitel 3.4), wobei es dabei zwischen den Bodenformengruppen keine signifikanten Unterschiede gab.

Das C/N-Verhältnis des Mineralbodens (Abb. 42) zeigte dasselbe Muster wie in der Auflage und wies zum Zeitpunkt der BZE II signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen auf (ANOVA, $P < 0{,}001$). Ein enges C/N-Verhältnis ergab sich in den Lösslehm- und Grundgesteins-Braunerde-Gruppen 2, 3, 5, 6 und 10 mit BZE II-Mittelwerten zwischen 19,2 ± 3,4 und 20,9 ± 3,0. Bei den Tieflandböden lagen allerdings die Gruppen 12 und 13 dichter beieinander als in der Auflage mit geringeren Unterschieden der Gruppe 13 zu den übrigen Gruppen. Ein weites C/N-Verhältnis wurde insbesondere bei den Gruppen 8 (Grundgesteins-Podsole) und 15 (Sand-Gleypodsole) gefunden. In diesen Gruppen lagen die BZE II-Mittelwerte bei 30,7 ± 6,7 und 32,5 ± 5,3. Bei getrennter Betrachtung der beiden Tiefenstufe 0-10 cm und 10-30 cm zeigte sich dasselbe Muster, wobei in der Tiefenstufe 0-10 cm die Unterschiede ausgeprägter waren. Hier lagen das C/N-Verhältnis der Gruppen 8, 13 und 15 mit Werten von 31,7 ± 7,5, 29,1 ± 2,6 und 35,8 ± 3,4 deutlich über dem C/N-Verhältnis der übrigen, deren Werte zwischen 21,7 ± 4,6 bis 25,4 ± 3,1 lagen. In der Tiefenstufe 10-30 cm reichte die Spanne von 16,5 ± 2,7 bei Gruppe 2 bis 29,7 ± 7,1 bei Gruppe 8.

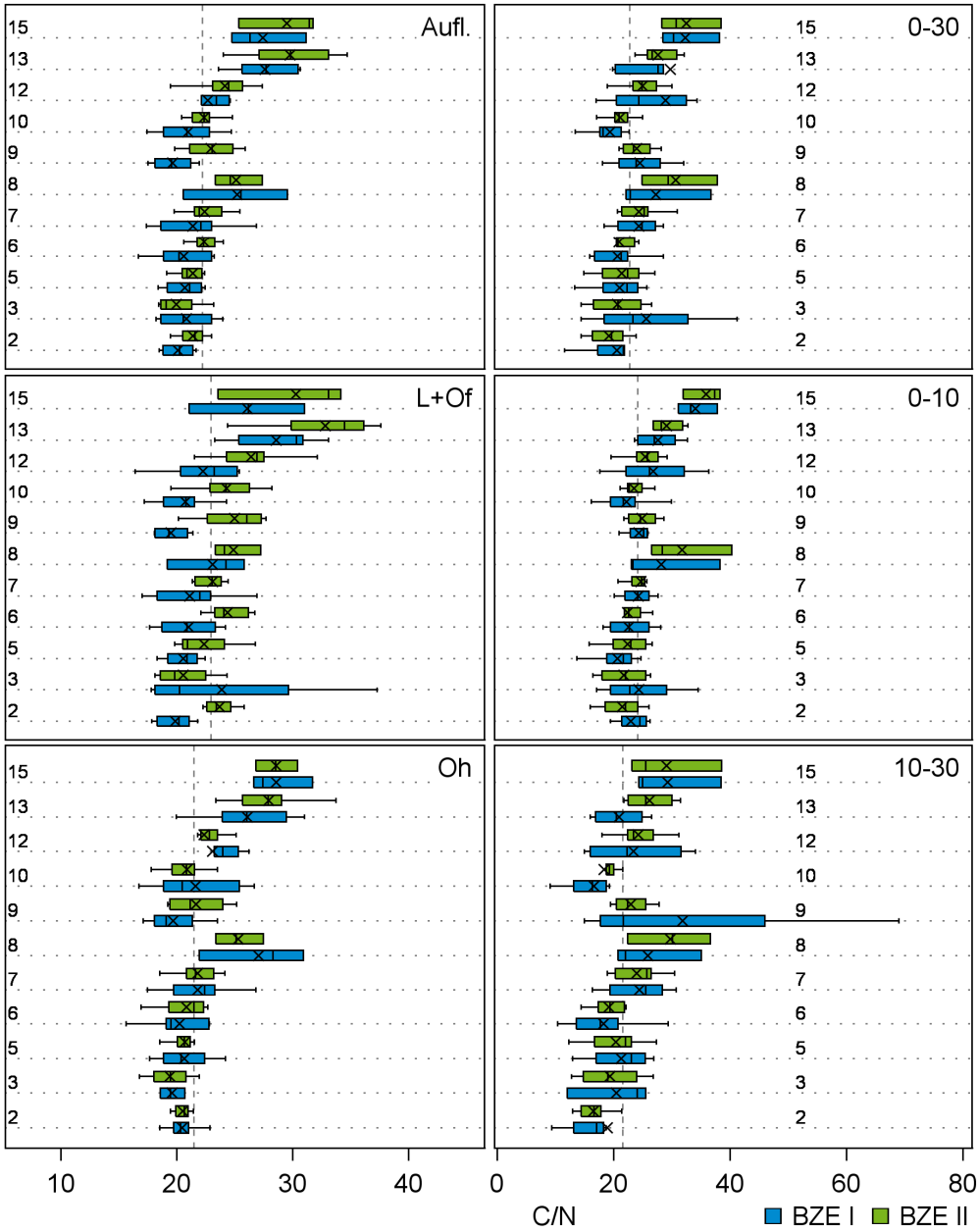

Abb. 42: C/N-Verhältnis gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden.

4.1.7 pH-Wert

Bei den pH(KCl)-Werten der gesamten organischen Auflage (Abb. 43) ergaben sich nur bei den BZE I-Werten Unterschiede zwischen den Bodenformengruppen (ANOVA, $P < 0{,}001$). Hier lagen die pH(KCl)-Werte der Gruppen 5, 7, 8 und 10 (terr. Grundgesteinsverwitterungsböden) zwischen 2,7 ± 0,2 und 2,9 ± 0,3 und waren damit deutlich niedriger als die pH(KCl)-Werte der Gruppen 3 (Staugleye auf Lösslehm) und 13 (pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft) mit Werten von 3,7 ± 0,7 und 3,8 ± 0,5. Bei der BZE II waren hingegen keine Unterschiede zwischen den Bodenformengruppen ausgeprägt. Signifikante Unterschiede gab es in der Entwicklung des pH(KCl)-Wertes (ANOVA, $P < 0{,}001$). In den Gruppen 5 und 10 (Gneis-Braunerdegruppe u. Phyilit- u. Schieferbraunerdegruppe) gab es einen deutlichen Anstieg von 2,9 ± 0,3 auf 3,6 ± 0,6 und von 2,9 ± 0,2 auf 3,5 ± 0,4, in den Gruppen 12 und 13 (terr. pleist. Sandformen) dagegen eine fallende Tendenz von 3,3 ± 0,2 auf 3,2 ± 0,3 und von 3,8 ± 0,5 auf 3,5 ± 0,2. Innerhalb der Auflage zeigte sich in den einzelnen Horizonten ein ähnliches Muster. Im L+Of-Horizont ergaben sich signifikante Unterschiede sowohl zu beiden Inventurzeitpunkten (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$) als auch in der Entwicklung zwischen den Inventuren (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). Insgesamt war hier, außer auf den Bodenformen des Tieflandes (12, 13, 15) und Gruppe 9 (Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit), ein deutlicher Anstieg der pH-Werte zu erkennen. Bei der BZE I hatten die pH(KCl)-Werte eine Spanne von 2,9 ± 0,3 bei Gruppe 8 bis 3,8 ± 0,6 bei Gruppe 3, bei der BZE II dagegen von 3,1 ± 0,2 bei Gruppe 15 bis 4,6 ± 1,0 bei Gruppe 5. Im Oh-Horizont gab es zum Zeitpunkt der BZE I signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen 3 (Lösslehm-Staugleye) und 13 (terr. zieml. arme pleist. Sandformen) gegenüber den Gruppen 5, 7, 8 und 10 (terr. Grundgesteinsverwitterungsböden) (Welch-ANOVA, $P < 0{,}01$). Die pH(KCl)-Werte reichten von 2,6 ± 0,1 bei Gruppe 8 (Grundgesteins-Podsole) bis 4,0 ± 0,9 bei Gruppe 13. Zum Zeitpunkt der BZE II hatten sich die Werte bei einer Spanne von 2,9 ± 0,2 bei Gruppe 8 bis 3,5 ± 0,6 bei Gruppe 3 aneinander angeglichen und unterschieden sich nicht zwischen den Gruppen. Die Entwicklung zwischen den Inventuren verlief unterschiedlich (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}01$), da es auf den Bodenformengruppen des Tieflandes zu einer Abnahme der Werte kam; im Bergland außer auf Gruppe 9 (Sand-Granit-Braunerdegruppe) dagegen zu einer Zunahme. Im Mineralboden (Abb. 43) unterschieden sich zum Zeitpunkt der BZE I die pH(KCl)-Werte signifikant zwischen den Gruppen (ANOVA, $P < 0{,}01$). Unterschiede gab es zwischen der Gruppe 8 (Grundgesteins-Podsole) mit den niedrigsten pH(KCl)-Werten von 2,7 ± 0,1, den Gruppen 12 und 13 (terr. pleist. Sandformen) mit den höchsten pH-Werten von 3,5 ± 0,2 und 3,9 ± 0,2 sowie den anderen Gruppen mit intermediären Werten. Zur BZE II gab es mit Ausnahme von Gruppe 13 (terr. pleist. ziemlich arme Sandformen) generell einen Anstieg der pH(KCl)-Werte. Die Unterschiede in der Entwicklung der pH(KCl)-Werte waren aber nicht signifikant. Zum Zeitpunkt der BZE II lagen die pH(KCl)-Werte von Gruppe 13 mit 4,1 ± 0,3 deutlich über denen aller anderen Gruppen mit Ausnahme von Gruppe 15 (Gleypodsole auf pleist. Sand) (Welch-ANOVA, $P > 0{,}01$). Signifikante Unterschiede gab es darüber hinaus zwischen Gruppe 12 (terr. pleist. mittlere Sandformen) mit einem pH(KCl)-Wert von 3,7 ± 0,1 und den Gruppen 7 (Grundgesteins-Braunpodsole) und 8 (Grundgesteins-Podsole) mit 3,4 ± 0,2 und 3,3 ± 0,4. In den beiden untersuchten Tiefenstufen zeigte sich der gleiche Trend wie für den gesamten Mineralboden. In der Tiefenstufe 0-10 cm

lagen die pH(KCl)-Werte der Gruppe 13 bei beiden Inventuren mit 3,7 ± 0,4 und 3,9 ± 0,4 deutlich über den Werten der anderen Gruppen (ANOVA, $P < 0{,}001$). Die Gruppen 7, 8 und 10 hatten mit Werten zwischen 2,5 ± 0,1 und 3,1 ± 0,3 (BZE I) sowie 3,1 ± 0,3 und 3,3 ± 0,1 (BZE II) die niedrigsten pH(KCl)-Werte zeigen aber eine deutliche Zunahme. Mit Ausnahme von Gruppe 13 stiegen die Werte, zwischen den Inventuren an. Die Unterschiede zwischen den Gruppen in den Änderungen zwischen den Inventuren waren signifikant (Welch-ANOVA, $P < 0{,}01$). Auch in der Tiefenstufe 10-30 cm hatte Gruppe 8 mit 2,9 ± 0,3 und 3,5 ± 0,6 zu beiden Inventurzeitpunkten die niedrigsten und Gruppe 13 mit und 4,1 ± 0,2 und 4,2 ± 0,2 die höchsten pH(KCl)-Werte.

Die pH(H_2O)-Werte spiegelten die Verhältnisse bei den pH(KCl)-Werten wieder. Auch hier war sowohl in der Auflage als auch im Mineralboden ein allgemeiner Anstieg der pH-Werte, insbesondere der Gruppen 5 (Gneis-Braunerdegruppe) und 10 (Phyllith-/Schiefer-Braunerden), zu verzeichnen. In der organischen Auflage waren von diesem Trend die Sand-Granit-Braunerde-Gruppe (Gruppe 9) und die terrestrischen Tieflandssandformen (Gruppe 12; 13) ausgenommen (ANOVA, $P < 0{,}001$). Die höchsten BZE I-Werte erreichten die Gruppen 3 (Lösslehm-Staugleye) und 13 (terr. pleist. ziemlich arme Sandformen) mit 4,5 ± 0,7 und 4,5 ± 0,5, die niedrigsten die Gruppe 8 (Grundgesteins-Podsole) mit 3,5 ± 0,3. Zur BZE II hin glichen sich die Werte so einander an, dass keine signifikanten Unterschiede gefunden wurden. Die Verhältnisse ähnelten sich im L+Of-Horizont und im Oh-Horizont. In beiden Horizonten nahmen die pH-Werte der Gruppen 12 und 13 entgegen einem allgemeinen Trend ab. Eine deutliche Zunahme gab es vor allem in den Gruppen 5 und 10. Im L+Of-Horizont nahmen die Werte in den beiden Gruppen von 3,9 ± 0,5 auf 5,2 ± 0,8 sowie von 3,8 ± 0,2 auf 4,9 ± 0,5 zu. Im Oh-Horizont stiegen die Werte in den Gruppen 5 und 10 von 3,6 ± 0,5 auf 4,2 ± 0,5 sowie von 3,5 ± 0,1 auf 4,1 ± 0,4. Im Mineralboden hatte Gruppe 13 (terr. pleist. ziemlich arme Sandformen) zu beiden Inventurzeitpunkten deutlich höhere Werte als die übrigen Gruppen. Dies galt sowohl für die Tiefenstufe 0-10 cm bei einer Spanne von 3,5 ± 0,1 bis 4,5 ± 0,5 (BZE I) und von 3,9 ± 0,1 bis 4,5 ± 0,4 (BZE II) als auch die Tiefenstufe 10-30 cm bei einer Spanne von 3,8 ± 0,2 bis 4,5 ± 0,3 (BZE I) und von 4,1 ± 0,2 bis 4,6 ± 0,2 (BZE II). Insbesondere in der Tiefenstufe 0-10 cm unterschieden sich die terrestrischen Tieflandssandformen (12; 13) in der Entwicklung der pH-Werte deutlich von den übrigen Gruppen, da hier die pH-Werte zu einer Abnahme tendierten (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$). Eine deutliche Zunahme der pH-Werte war in den Mittelgebirgs-Gruppen 5, 8 und 10 zu beobachten.

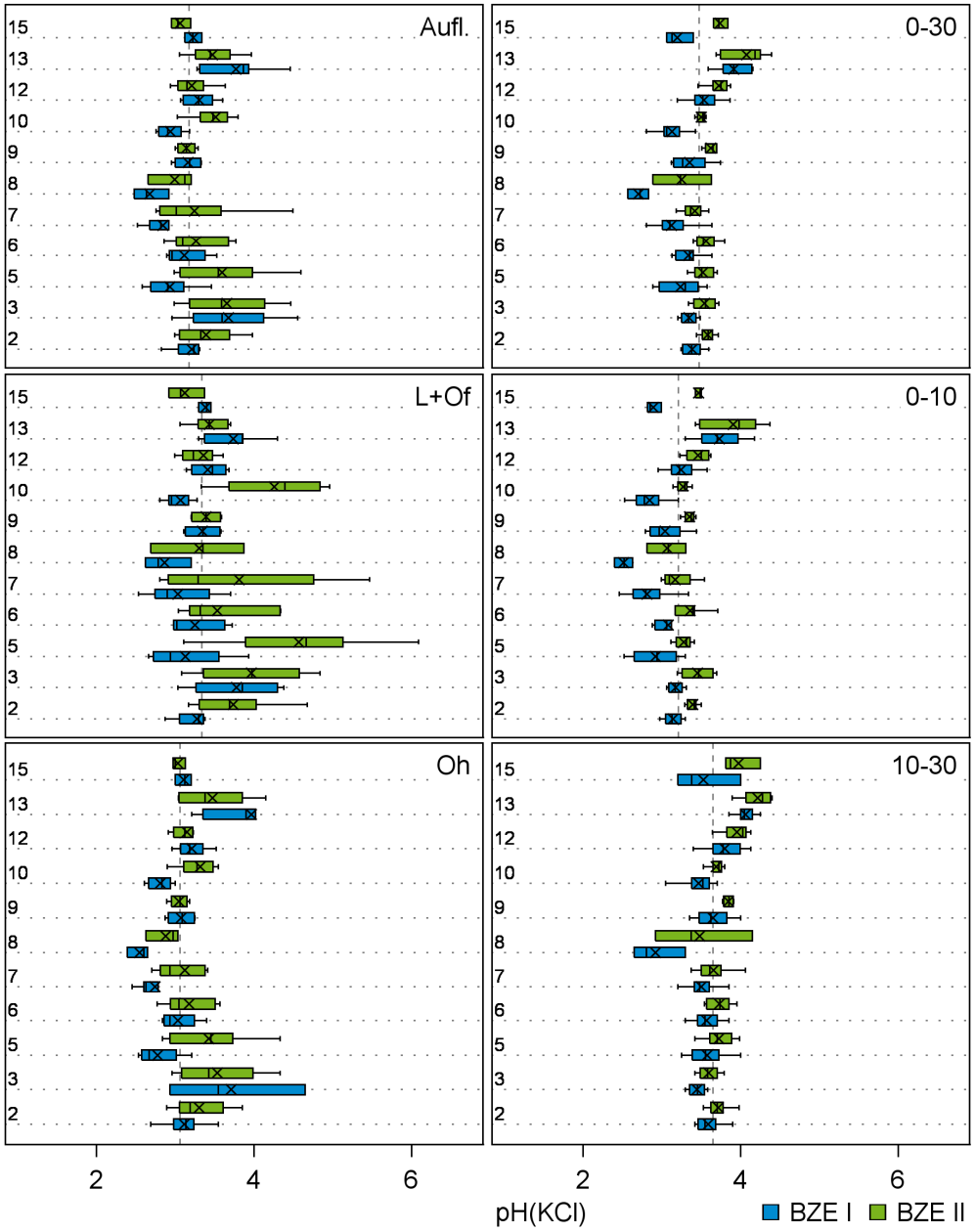

Abb. 43: pH(KCl)-Wert gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden.

4.1.8 Effektive Austauschkapazität und Basensättigung

Die höchste effektive Austauschkapazität des Mineralbodens war in den Bodenformengruppen des Berglandes 5 (Gneis-Braunerdegruppe), 7 (Grundgesteins-Braunpodsole) und 10 (Phyllith-/Schiefer-Braunerden) mit BZE II-Werten von 97,6 ± 20,0 bis 104,1 ± 13,7 $\mu mol_c\ g^{-1}$ zu finden (Abb. 44). Niedrige Werte fanden sich bei den Tieflandsböden in den Gruppen 12, 13 und 15 sowie in 9 (Sand-Granit-Braunerdegruppe) mit BZE II-Werten von 17,2 ± 6,1 bis 48,2 ± 14,1 $\mu mol_c\ g^{-1}$. Die Gruppen 2 (Lösslehm-Braunerdegruppe) und 6 (Granit-Braunerdegruppe) hatten mit 71,2 ± 14,4 und 80,3 ± 14,6 $\mu mol_c\ g^{-1}$ mittlere BZE II-Werte. Die Unterschiede waren zu beiden Inventurzeitpunkten signifikant (Welch-ANOVA, $P < 0{,}001$). Die Verteilung der Austauschkapazität nahm in den beiden untersuchten Tiefenstufen denselben Verlauf, mit niedrigeren Werten in der größeren Tiefe. In der Tiefenstufe 0-10 cm reichte die Spanne (BZE II) von 25,4 ± 8,8 bis 143,4 ± 25,9 $\mu mol_c\ g^{-1}$, in der Tiefenstufe 10-30 cm von 13,3 ± 4,7 bis 92,6 ± 34,8 $\mu mol_c\ g^{-1}$. In beiden Tiefenstufen waren die Unterschiede zwischen den Gruppen zu beiden Inventurzeitpunkten signifikant.

Bei der Basensättigung im Mineralboden ergaben sich zum Zeitpunkt der BZE I signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (Abb. 44). Die höchsten Werte hatte Gruppe 13 (terr. pleist. ziemlich arme Sandformen), die niedrigsten Werte waren bei den Gruppen 5 (Gneis-Braunerdegruppe), 7 (Grundgesteins-Braunpodsole) und 10 (Phyllith-/Schiefer-Braunerden) zu finden. Zum Zeitpunkt der BZE II waren keine signifikanten Unterschiede zu finden. Die Basensättigung entwickelte sich unterschiedlich zwischen den Gruppen (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). So nahm in der Gruppe 5 die Basensättigung um von 6 ± 3 % auf 12 ± 6 % zu, dagegen nahm sie in den Gruppe 12 und 13 (terr. pleist. Sandformen) von 17 ± 9 % auf 10 ± 6 % und von 27 ± 14 % auf 16 ± 12 % ab. Auch in den Gruppen 2 (Lösslehm-Braunerdegruppe), 3 (Lösslehm-Stuagleye), 6 (Granit-Braunerdegruppe), 8 (Grundgesteins-Podsole) und 9 (Sand-Granit-Braunerdegrupppe) tendierte sie dazu abzunehmen. Die Verteilung in den beiden Tiefenstufen 0-10 cm mit einer Spanne (BZE II) von 9 ± 6 % bis 25 ± 21 % und 10-30 cm mit einer Spanne (BZE II) von 5 ± 3 % bis 13 ± 10 % verlief parallel mit niedrigeren Werten in der größeren Tiefe.

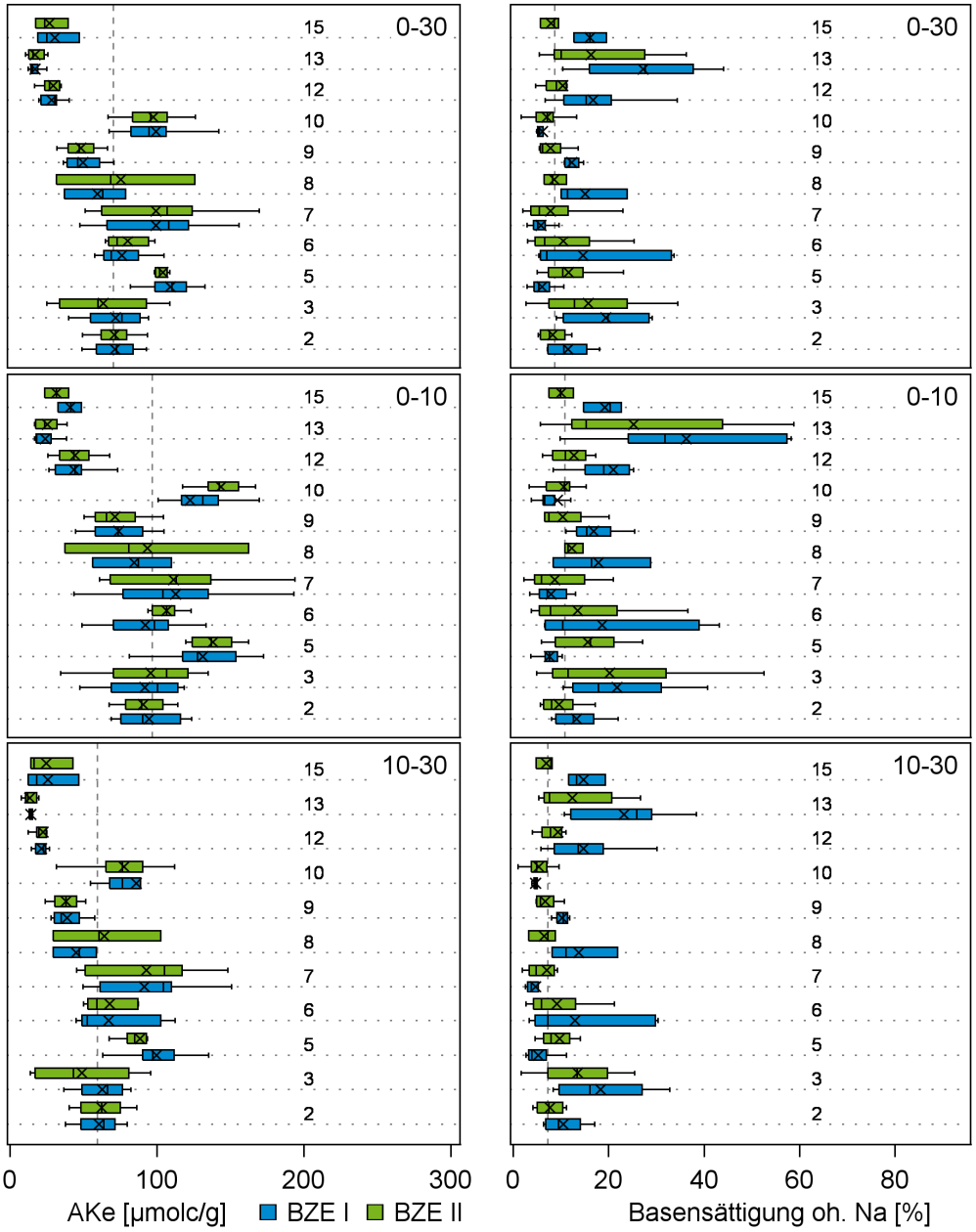

Abb. 44: Austauschkapazität (links) und Basensättigung ohne Natrium (rechts) im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm) gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, mit 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden.

4.1.9 Calciumkonzentration

Bei der Konzentration an extrahierbarem Calcium (Ca) (Abb. 45) gab es in der organischen Auflage zum Zeitpunkt der BZE I keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Zum Zeitpunkt der BZE II gab es dagegen Unterschiede zwischen den Gruppen (Welch-ANOVA, $P < 0{,}01$). Hier waren die Calciumkonzentrationen der Gruppen 5 (Gneis-Braunerdegruppe) und 10 (Phyllith-/Schiefer-Braunerden) mit Werten von 9,0 ± 5,7 und 7,6 ± 4,2 mg g^{-1} gegenüber den Tieflands-Gruppen 12, 13 und 15 mit Werten von 1,8 ± 0,3 bis 3,0 ± 1,4 mg g^{-1} erhöht. Entsprechend änderten sich die Calciumkonzentration zwischen den Inventurzeitpunkten auf unterschiedliche Weise (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). In den Gruppen 5 und 10 war die Tendenz zur Zunahme zu erkennen, während in den Gruppen 13 und 15 eine abnehmende Tendenz zu verzeichnen war. Die Verteilung der Ca-Konzentrationen glich sich im L+Of-Horizont und im Oh-Horizont. In beiden Horizonten fanden sich nur zum Zeitpunkt der BZE II signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (Welch-ANOVA, $P < 0{,}01$, $P < 0{,}001$). Im L+Of-Horizont hatte die Gruppe 5 die höchsten Werte mit 17,4 ± 10,0 mg g^{-1} und die Gruppen 12 und 15 mit 3,3 ± 1,2 und 2,6 ± 0,8 mg g^{-1} die niedrigsten Konzentrationen. Im Oh-Horizont reichte die Spanne von 1,2 ± 0,1 mg g^{-1} bei Gruppe 15 bis 5,0 ± 2,6 mg g^{-1} bei Gruppe 5. Im Mineralboden fanden sich bei der Konzentration an austauschbarem Ca keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen (Abb. 45). Hier reichten die Werte von < 0,1 mg g^{-1} bei Gruppe 15 bis 0,2 ± 0,3 mg g^{-1} bei Gruppe 3, in der Tiefenstufe 0-10 cm von 0,1 ± 0,1 mg g^{-1} bei den Gruppen 12, 13 und 15 bis 0,4 ± 0,6 mg g^{-1} bei Gruppe 3 und in der Tiefenstufe 10-30 cm von < 0,1 mg g^{-1} bei den Gruppen 13 und 15 bis 0,2 ± 0,2 mg g^{-1} bei Gruppe 3.

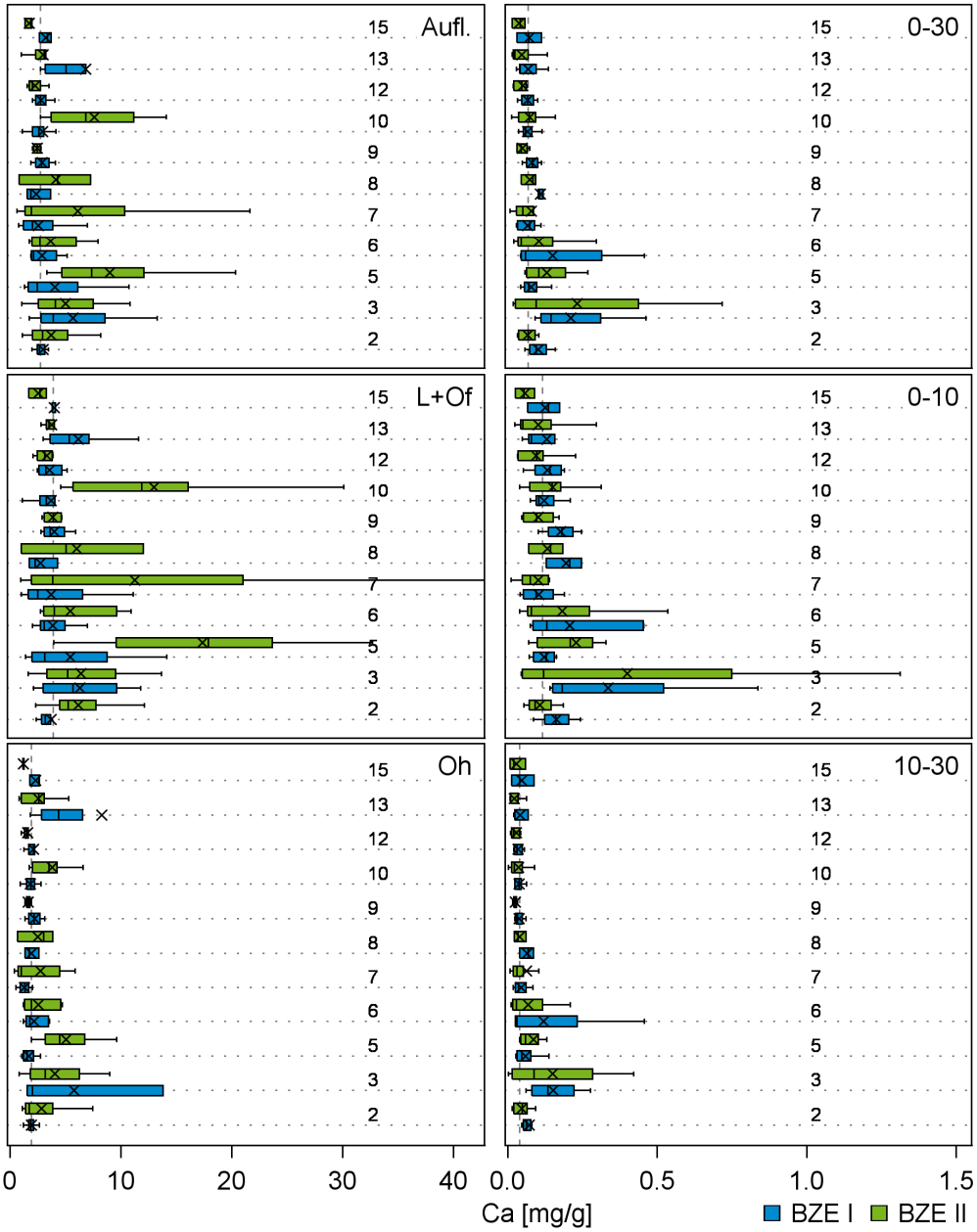

Abb. 45: Calciumkonzentration gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite extrahierbares Calcium der Auflage, rechte Seite austauschbares Calcium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden.

4.1.10 Calciumvorrat

Signifikante Unterschiede in den Vorräten an extrahierbaren Ca gab es in der organischen Auflage zu keinem Inventurzeitpunkt (Abb. 46). Allerdings gab es signifikante Unterschiede in den Änderungen der Ca-Vorräte zwischen den Inventuren (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$). Die Ca-Vorräte nahmen in den Gruppen 5 (Gneis-Braunerdegruppe) und 10 (Phyllith-/Schiefer-Braunerden) von 386 ± 327 auf 712 ± 459 kg ha^{-1} und von 206 ± 101 auf 556 ± 408 kg ha^{-1} zu, während in den terrestrischen pleistozänen Sand-Gruppen 12 und 13 eine Abnahme von 267 ± 79 auf 180 ± 57 kg ha^{-1} und von 538 ± 371 auf 267 ± 249 kg ha^{-1} zu verzeichnen war. Im L+Of-Horizont unterschieden sich die Ca-Vorräte zum Zeitpunkt der BZE II signifikant (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$). Die höchsten Vorräte kamen in Gruppe 3 (Löss-Staugleye) mit 262 ± 321 kg ha^{-1}, die niedrigsten in den terrestrischen pleistozänen Sand-Gruppen 12 und 13 mit 96 ± 39 und 88 ± 61 kg ha^{-1} vor. Im Oh-Horizont waren zwischen den Gruppen zu keinem Inventurzeitpunkt signifikante Unterschiede nachzuweisen. Die BZE II-Werte reichten von 115 ± 82 bis 244 ± 335 kg ha^{-1}. Beim Vorrat an austauschbarem Ca im Mineralboden (Abb. 46) konnten bei der BZE I signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen nachgewiesen werden (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). Es gab hingegen keine Unterschiede zwischen den Gruppen bei der BZE II. Die höchsten Ca-Vorräte waren bei der BZE I auf Böden der Gruppe 3 mit 658 ± 353 kg ha^{-1} zu finden. Die niedrigsten Vorräte gab es bei der BZE I in der Gruppe 10 mit 116 ± 45 kg ha^{-1}. Bei der BZE II nahmen die Vorräte eine Spanne von 126 ± 85 bis 654 ± 816 kg ha^{-1} ein. Unterschiede ergaben sich bei den Änderungen der Ca-Vorräte zwischen den beiden Inventuren nicht. Die Ca-Vorräte zeigten in den beiden untersuchten Tiefenstufen 0-10 cm und 10-30 cm ein ähnliches Muster. Bei beiden Tiefenstufen gab es nur zur BZE I signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}01$) aufgrund hoher Werte in Gruppe 3.

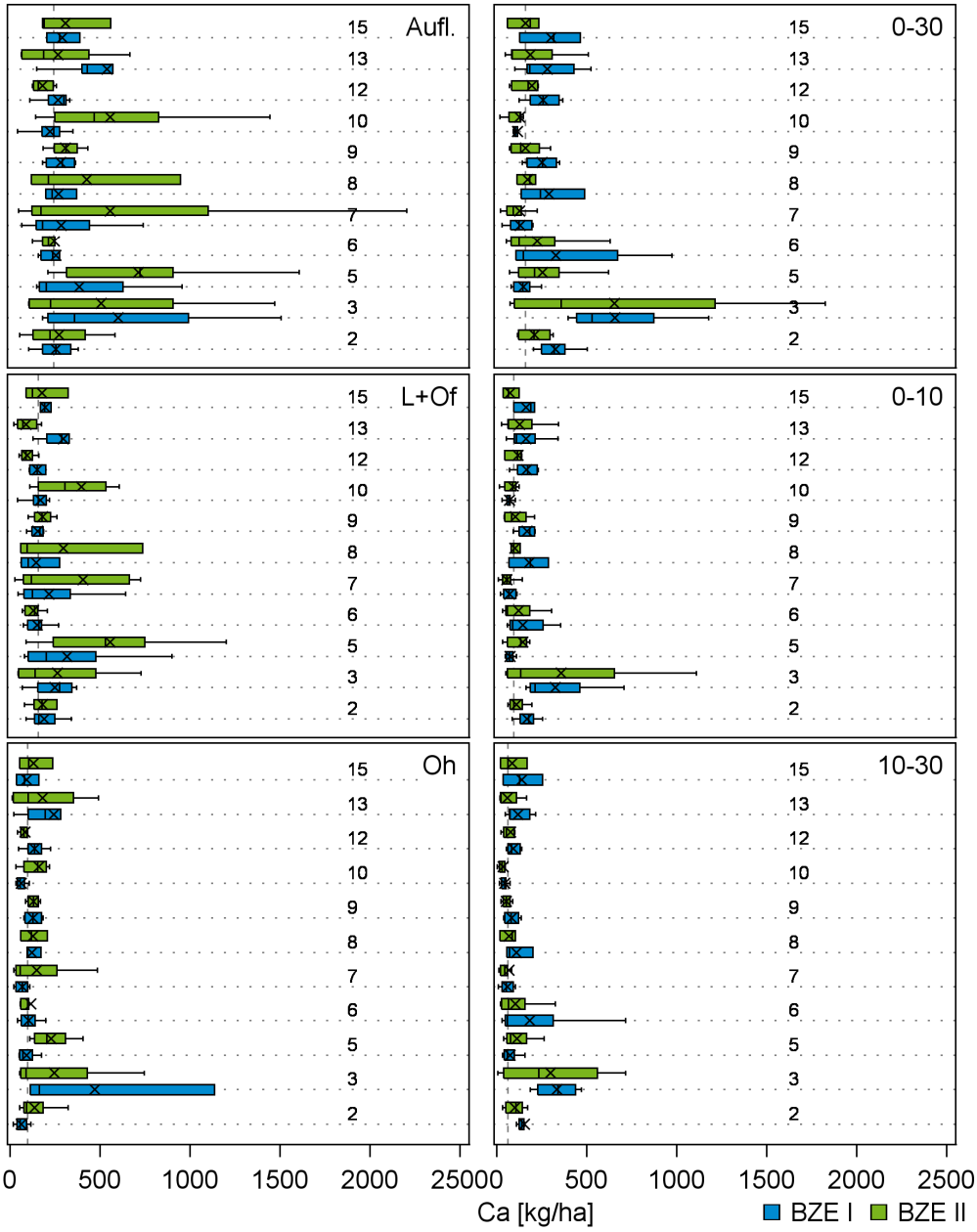

Abb. 46: Calciumvorrat gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite extrahierbares Calcium der Auflage, rechte Seite austauschbares Calcium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden.

4.1.11 Magnesiumkonzentration

Bei der Konzentration an extrahierbarem Magnesium (Mg) der organischen Auflage (Abb. 47) gab es zum Zeitpunkt der BZE I keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Zum Zeitpunkt der BZE II gab es dagegen auch bei der Mg-Konzentration Unterschiede zwischen den Gruppen (Welch-ANOVA, $P < 0{,}001$). Hier waren die Mg-Konzentrationen der Gruppen 5 (Granit-Braunerdegruppe) und 10 (Phyllith-/Schiefer-Braunerden) mit Werten von 3,9 ± 2,4 und 3,1 ± 2,2 mg g^{-1} gegenüber den Tieflands-Gruppen 12, 13 und 15 mit Werten von 0,6 ± 0,2 bis 0,9 ± 0,3 mg g^{-1} erhöht. Entsprechend änderten sich die Mg-Werte zwischen den Inventurzeitpunkten auf unterschiedliche Weise (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). In den Gruppen 5 (Granit-Braunerdegruppe), 7 Grundgesteins-Braunpodsole) und 10 (Phyllith-/Schiefer-Braunerden) war die Tendenz zur Zunahme zu erkennen, während in den Gruppen 13 (terr. zieml. arme pleist. Sandformen) und 15 (pleist. Sand-Gleypodsole) eine abnehmende Tendenz zu verzeichnen war. Die Verteilungsmuster der beiden Auflagehorizonte glichen sich, wobei im L+Of-Horizont in den Bodenformengruppen 5 (Granit-Braunerdegruppe), 7 (Grundgesteins-Braunpodsole) und 10 (Phyllith-/Schiefer-Braunerden) eine stärkere Änderung zwischen den Inventuren stattfand. Im L+Of-Horizont reichten die Werte von 0,6 ± 0,3 mg g^{-1} bei der Gruppe 12 (terr. mittlere pleist. Sandformen) bis 6,9 ± 4,5 mg g^{-1} und 4,4 ± 4,3 mg g^{-1} bei den Gruppen 5 und 10. Im Oh-Horizont nahmen die Werte eine Spanne von 0,6 ± 0,3 mg g^{-1} bis 2,7 ± 1,1 mg g^{-1} ein. Eine der Auflage entsprechende Verteilung zeigte die Konzentration an austauschbarem Mg im Mineralboden (Abb. 47). Während es zur BZE I keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen gab, waren bei der BZE II die Gehalte der Tieflands-Gruppen 12, 13 und 15 sowie 9 (Sand-Granit-Braunerdegruppe) mit Werten von < 0,01 mg g^{-1} deutlich niedriger als in den Grundgesteins-Braunerde und -Braunstaugley-Gruppen 5, 6, 7 und 10 mit Werten zwischen 0,03 ± 0,03 und 0,07 ± 0,06 mg g^{-1} (ANOVA, $P < 0{,}001$). Die Entwicklung zwischen den Inventuren verlief aufgrund der deutlichen Zunahme der Werte in den Gruppen 5, 7 und 10 unterschiedlich. In der Tiefenstufe 0-10 cm traten deutlichere Unterschiede zwischen den Gruppen auf (ANOVA, $P < 0{,}001$) als in der darunterliegenden Tiefenstufe. Die Werte reichten von < 0,01 bis 1,3 ± 0,9 mg g^{-1}. In der Tiefenstufe 10-30 cm nahmen die Werte eine Spanne von < 0,01 bis 0,05 ± 0,05 mg g^{-1} ein.

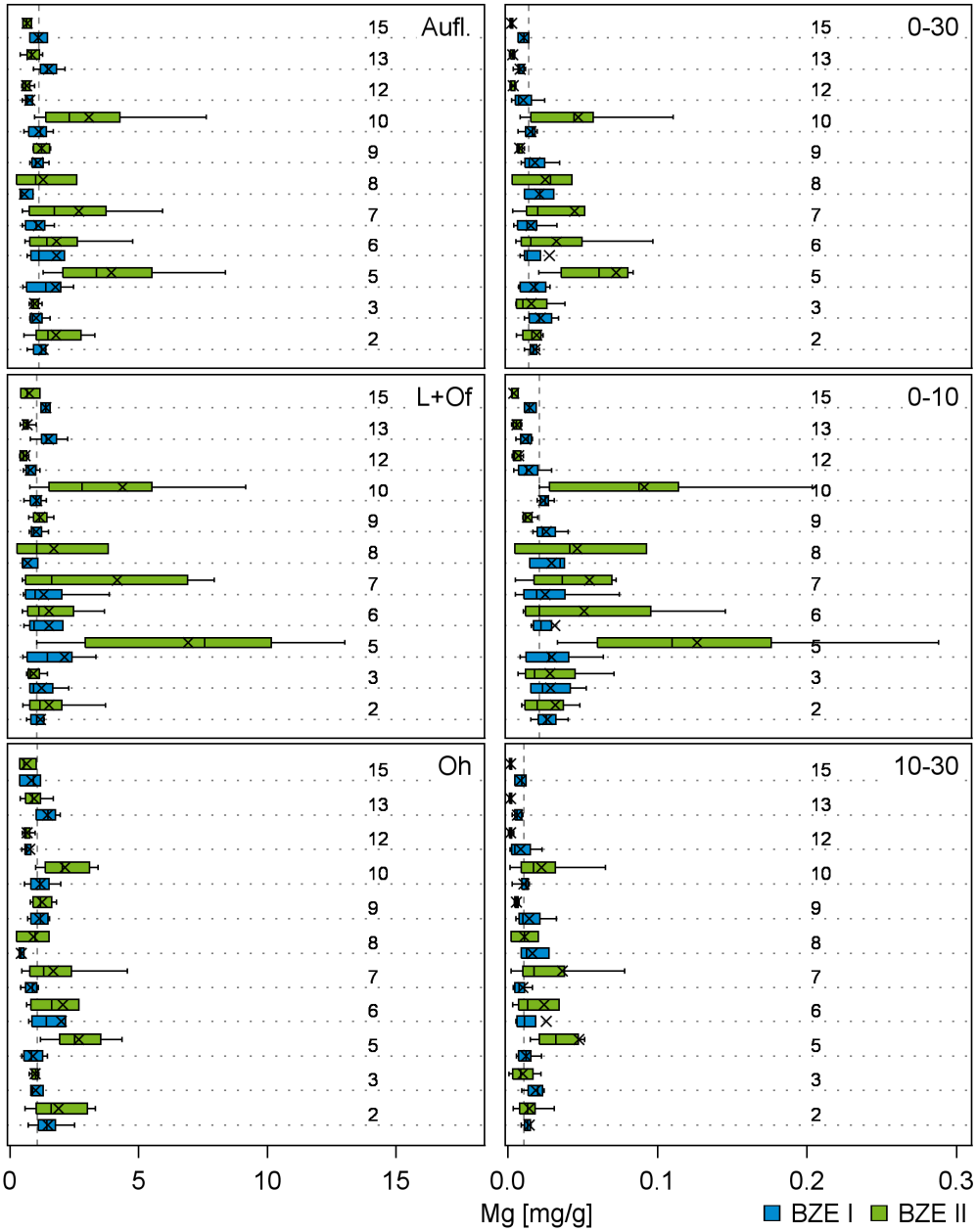

Abb. 47: Magnesiumkonzentration gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite extrahierbares Magnesium der Auflage, rechte Seite austauschbares Magnesium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden.

4.1.12 Magnesiumvorrat

Bei den Vorräten an extrahierbarem Mg konnten zum Zeitpunkte der BZE II in der organischen Auflage signifikante Unterschiede festgestellt werden (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$). Die Auflagevorräte reichten von 54 ± 25 kg ha^{-1} bei der Gruppe 12 (terr. pleist. mittlere Sandformen) bis 313 ± 195 kg ha^{-1} bei der Gruppen 5 (Gneis-Braunerdegruppe). Signifikante Unterschiede zeigten sich dabei nur im L+Of-Horizont (ANOVA, $P < 0{,}001$). Hier reichten die Werte von 16 ± 12 kg ha^{-1} bei Gruppe 13 (terr. pleist. zieml. arme Sandformen) bis 141 ± 175 kg ha^{-1} bei Gruppe 10 (Phyllit-/Schiefer-Braunerden). Im Oh-Horizont ergaben sich bei einer Spanne von 37 ± 20 bis 125 ± 50 kg ha^{-1} keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Beim Vorrat an austauschbarem Mg zeigten sich im Mineralboden bei der BZE II Unterschiede zwischen den Gruppen (ANOVA, $P < 0{,}001$). Niedrige Mg-Vorräte fanden sich in den terrestrischen Tieflands-Gruppen 12 und 13 mit 13 ± 9 und 12 ± 5 kg ha^{-1}, hohe dagegen in den Gruppen 2 (Lösslehm-Braunerdegruppe), 5 (Gneis-Braunerdegruppe), 7 (Grundgesteins-Braunpodsole) und 10 (Phyllith-/Schiefer-Braunerden), wo die Werte zwischen 65 ± 55 und 139 ± 102 kg ha^{-1} lagen. Auch bei den Änderungen des Mg-Vorrates zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). In den Gruppen 5, 7 und 10 zeigten die Vorräte einen positiven Trend, in den Tieflands-Gruppen 12, 13 und 15 dagegen eine abnehmende Tendenz. In der Tiefenstufe 0-10 cm reichten die Werte von 7 ± 4 bis 79 ± 52 kg ha^{-1}. In der Tiefenstufe 10-30 cm nahmen die Werte eine Spanne von 5 ± 2 bis 60 ± 54 kg ha^{-1} ein.

4.1.13 Kaliumkonzentration

Bei den Konzentrationen an extrahierbarem Kalium (K) (Abb. 48) in der organischen Auflage gab es zu beiden Inventurzeitpunkten signifikante Unterschiede zwischen den Bodenformengruppen (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}01$, bzw. ANOVA, $P < 0{,}001$). Niedrige K-Konzentrationen fanden sich mit Werten von 0,56 ± 0,07 bis 0,81 ± 0,28 mg g^{-1} (BZE II) in den Auflagen der Grundgesteins-Podsolgruppe 8 und in den Tieflands-Gruppen 12, 13 und 15. Hohe K-Konzentrationen gab es mit Werten von 1,42 ± 0,55 bis 1,83 ± 0,68 mg g^{-1} in den Auflagen der Gruppen 2 (Lösslehm-Braunerdegruppe), 5 (Gneis-Braunerdegruppe), 7 (Grundgesteins-Braunpodsole) und 10 (Phyllith-/Schiefer-Braunerden). Die Änderungen der K-Konzentrationen der organischen Auflage zwischen den beiden Inventurzeitpunkten waren innerhalb der Bodenformengruppen nicht signifikant verschieden. Die K-Konzentrationen im L+Of-Horizont und im Oh-Horizont waren ähnlich hoch, wobei im L+Of-Horizont nur zum Zeitpunkt der BZE II signifikante Unterschiede gefunden werden konnten (ANOVA, $P < 0{,}001$). Die Werte nahmen eine Spanne (BZE II) von 0,66 ± 0,21 bis 1,55 ± 0,44 mg g^{-1} ein. Im Oh-Horizont fanden sich dagegen zu beiden Inventurzeitpunkten signifikante Unterschiede (ANOVA, $P < 0{,}01$, bzw. Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). Die BZE II-Werte reichten von 0,51 ± 0,06 bis 2,01 ± 0,89 mg g^{-1}. Auch im Mineralboden gab es bei der Konzentration an austauschbaren K bei beiden Inventuren signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$; bzw. ANOVA, $P < 0{,}001$). Niedrige K-Gehalte waren in den Tieflands-Gruppen 12, 13 und 15 zu finden, bei denen die BZE II-Mittelwerte von 0,01 ± 0,01 bis

0,02 ± 0,01 mg g^{-1} reichten (Abb. 48). Hohe Gehalte fanden sich dagegen in den Lösslehm-Gruppen 2 und 3 sowie in den Gruppen 5 (Gneis-Braunerdegruppe), 6 (Granit-Braunerdegruppe), 7 (Grundgesteins-Braunpodsole) und 10 (Phyllith-/Schiefer-Braunerden) mit Mittelwerten von 0,04 ± 0,01 bis 0,05 ± 0,02 mg g^{-1}. Bei den Änderungen gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Die Unterschiede zwischen den Bodenformengruppen hatten in den beiden untersuchten Tiefenstufen Bestand. In der Tiefenstufe 0-10 cm reichten die BZE II-Werte von 0,01 ± 0,01 bis 0,06 ± 0,01 mg g^{-1}. In der Tiefenstufe 10-30 cm nahmen die Werte eine Spanne von 0,01 ± 0,01 bis 0,05 ± 0,03 mg g^{-1} ein. Hier hielt allerdings nur die Gruppe 2 ihre gegenüber den Gruppen 12, 13 und 15 signifikant höheren Werte bei.

4.1.14 Kaliumvorrat

In der organischen Auflage fanden sich zum Zeitpunkt der BZE II signifikante Unterschiede am Vorrat an extrahierbaren K (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$). Niedrige K-Vorräte waren in den Auflagen der terrestrischen pleistozänen Tieflands-Gruppen 12 und 13 mit 64 ± 19 und 52 ± 26 kg ha^{-1} festzustellen, hohe Werte fanden sich in der Gruppe 9 (Sand-Granit-Braunerdegruppe) mit 177 ± 78 kg ha^{-1} (Abb. 49). Die Unterschiede fanden sich sowohl im L+Of-Horizont bei einer Spanne von 17 ± 8 bis 67 ± 35 kg ha^{-1} als auch im Oh-Horizont bei einer Spanne von 35 ± 22 bis 110 ± 51 kg ha^{-1}, wobei im L+Of-Horizont niedrige Werte auch in den Gruppen 2 (Lösslehm-Braunerdegruppe), 6 (Granit-Braunerde-Gruppe) und 8 (Grundgesteins-Podsole) auftraten, im Oh-Horizont traten zusätzlich zu Gruppe 12 und 13 auch in Gruppe 8 (Grundgesteins-Podsole) niedrige Werte auf.

Auch beim Vorrat an austauschbarem K im Mineralboden (Abb. 49) gab es bei beiden Inventuren signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$; bzw. ANOVA, $P < 0{,}001$). Hier waren mit 166 ± 57 kg ha^{-1} die höchsten Vorräte (BZE II) bei Gruppe 2 (Lösslehm-Braunerdegruppe) zu finden. Der niedrigste Gruppenmittelwert lag mit 44 ± 5 kg ha^{-1} bei Gruppe 15 (Sand-Gleypodsole). Bei den Änderungen gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. In der Tiefenstufe 0-10 cm ergaben sich deutliche Unterschiede der Vorräte der Lösslehm-Gruppen 2 und 3 mit 57 ± 13 und 63 ± 6 kg ha^{-1} gegenüber den Gruppen 7 (Grundgesteins-Braunpodsole), 13 (terr. zieml. arme pleist. Sandformen) und 15 (Sand-Gleypodsole) mit Werten zwischen 18 ± 5 und 29 ± 13 kg ha^{-1}. In der Tiefenstufe 10-30 cm lagen die K-Vorräte der Gruppe 2 mit 110 ± 51 kg ha^{-1} deutlich über den Vorräten der übrigen Gruppen mit Werten zwischen 26 ± 4 und 69 ± 43 kg ha^{-1}.

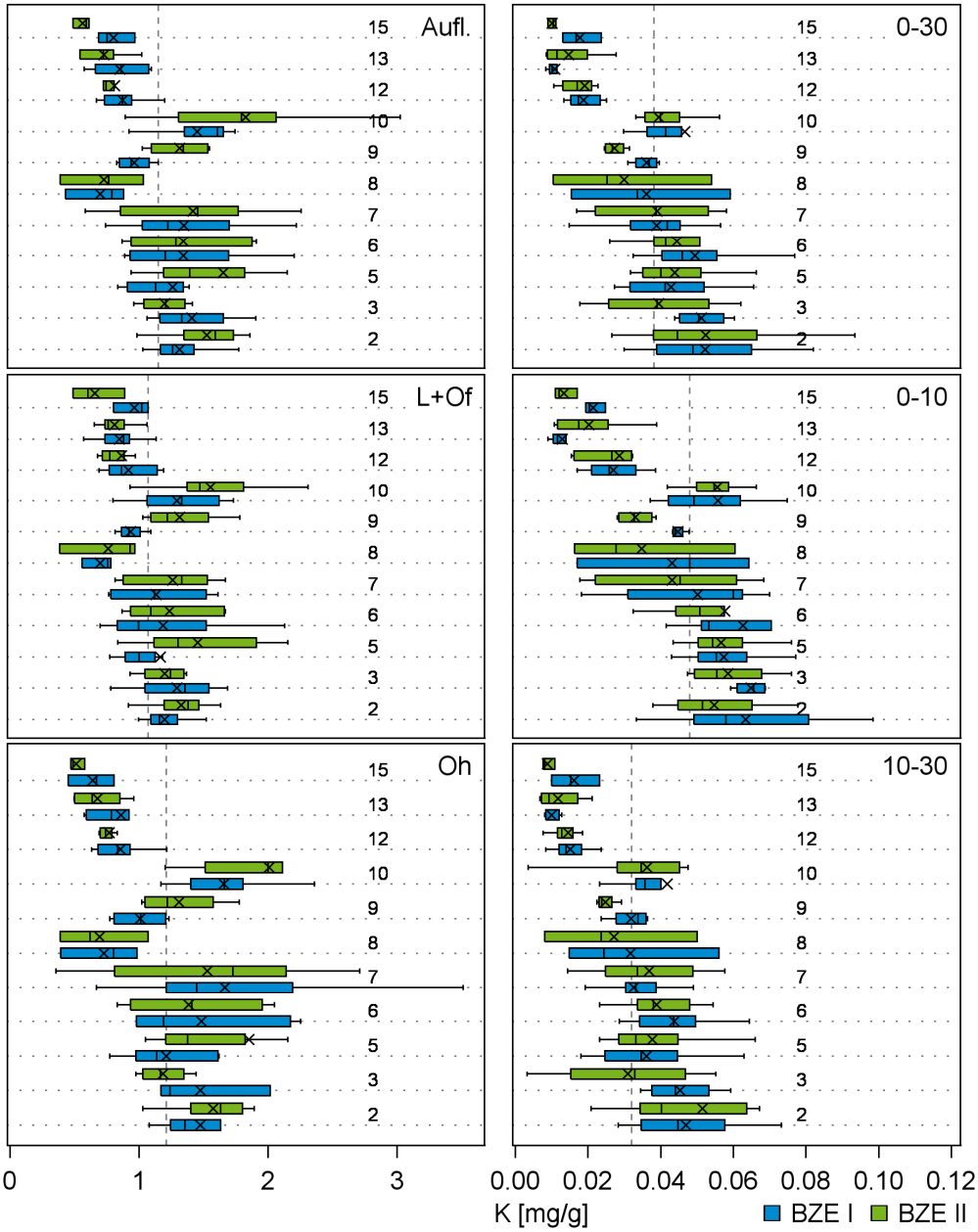

Abb. 48: Kaliumkonzentration gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite extrahierbares Kalium der Auflage, rechte Seite austauschbares Kalium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden.

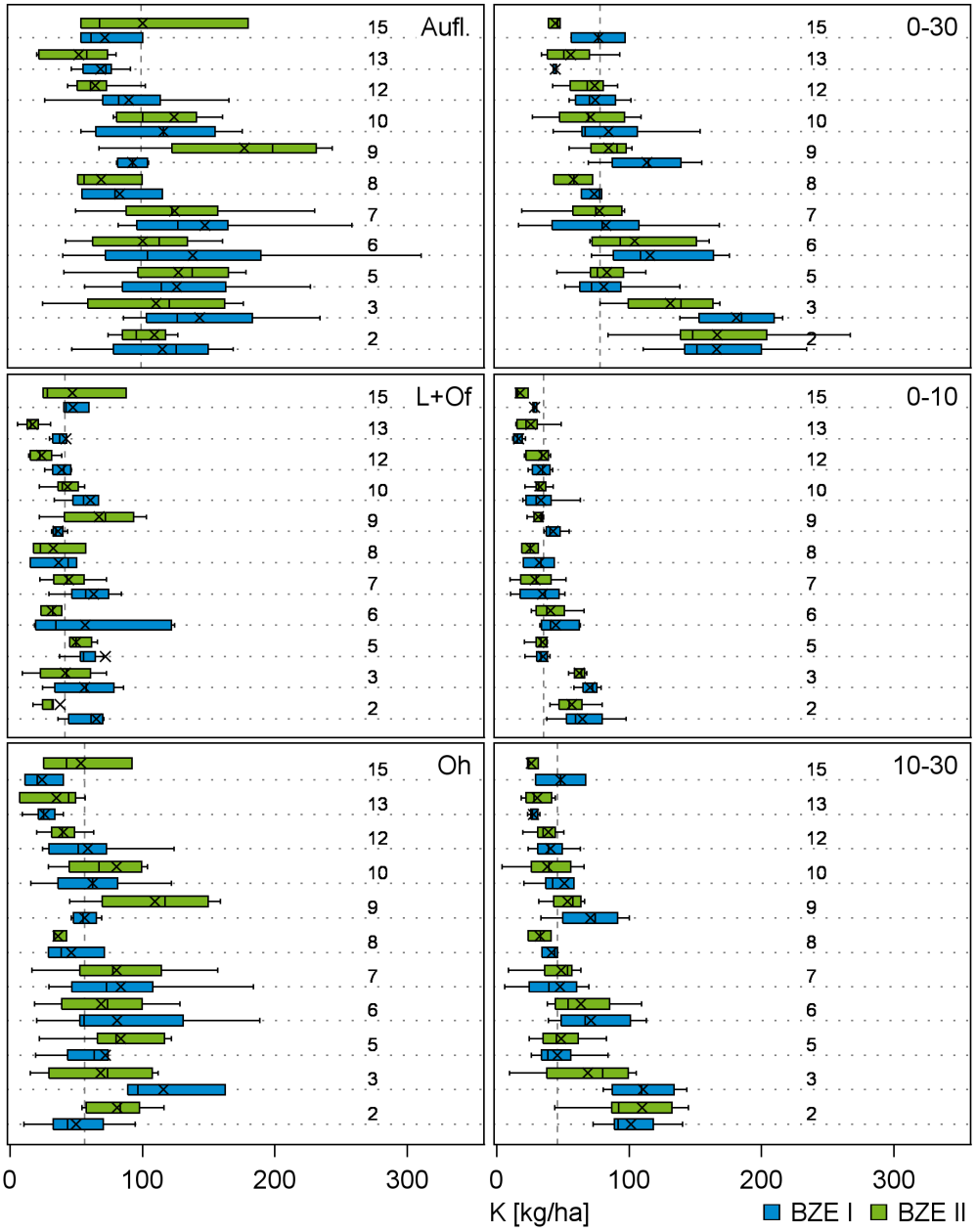

Abb. 49: Kaliumvorrat gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, linke Seite extrahierbares Kalium der Auflage, rechte Seite austauschbares Kalium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden.

4.1.15 Phosphorkonzentration

In der Auflage unterschieden sich die Gehalte an extrahierbaren Phosphor (P) (Abb. 50) zu beiden Inventurzeitpunkten signifikant zwischen den Bodenformengruppen (ANOVA, $P < 0{,}001$). Hohe Gehalte gab es mit BZE II-Mittelwerten von 0,89 ± 0,06 bis 1,02 ± 0,26 mg g^{-1} in der Auflage der Lösslehm-Gruppen 2 und 3 sowie der Gruppen 5 (Gneis-Braunerdegruppe), 6 (Granit-Braunerdegruppe), 7 (Grundgesteins-Braunpodsole) und 10 (Phyllith-/Schiefer-Braunerden) gegenüber den Tieflands-Gruppen 12, 13, 15 mit BZE II-Mittelwerten von 0,48 ± 0,11 bis 0,72 ± 0,11 mg g^{-1}. Allgemein war ein leicht abnehmender Trend zwischen den Inventuren zu beobachten. Die Änderungen zwischen den Inventuren unterschieden sich zwischen den Gruppen signifikant (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$). Vor allem in den Bodenformen des Tieflandes kam es zu einer deutlichen Abnahme der P-Konzentrationen der Auflage. Die P-Gehalte zwischen den Inventuren waren im L+Of-Horizont nicht unterschiedlich zwischen den Gruppen. Bei der BZE II nahmen sie eine Spanne von 0,58 ± 0,07 bis 1,03 ± 0,09 mg g^{-1} ein. Im Oh-Horizont gab es bei einer Spanne der BZE II-Werte von 0,42 ± 0,13 bis 1,07 ± 0,37 mg g^{-1} sowohl zu den Inventuren als auch bei den Änderungen zwischen den Inventuren signifikante Unterschiede unter den Gruppen.

4.1.16 Phosphorvorrat

Die Vorräte an extrahierbarem P (Abb. 50) unterschieden sich in der organischen Auflage zum Zeitpunkt der BZE II aufgrund der mit 35 ± 18 kg ha^{-1} niedrigen Werte in Gruppe 13 (terr. pleist. ziemlich arme Sandformen) signifikant (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$). Die höchsten Werte traten in Gruppe 9 (Sand-Granit-Braunerdegruppe) mit 98 ± 27 kg ha^{-1} auf. Die Unterschiede waren im Wesentlichen durch die Verhältnisse im L+Of-Horizont begründet, wo die BZE II-Werte der Gruppe 13 mit 12 ± 7 kg ha^{-1} signifikant niedriger waren als die Werte der Grundgesteins-Gruppen 5, 6, 7, 8, 9, 10 sowie 15 (Sand-Gleypodsole) mit Gehalten von 26 ± 8 bis 37 ± 13 kg ha^{-1} (ANOVA, $P < 0{,}001$). Im Oh-Horizont unterschieden sich die BZE II-Vorräte bei einer Spanne von 23 ± 15 bis 61 ± 15 kg ha^{-1} nicht.

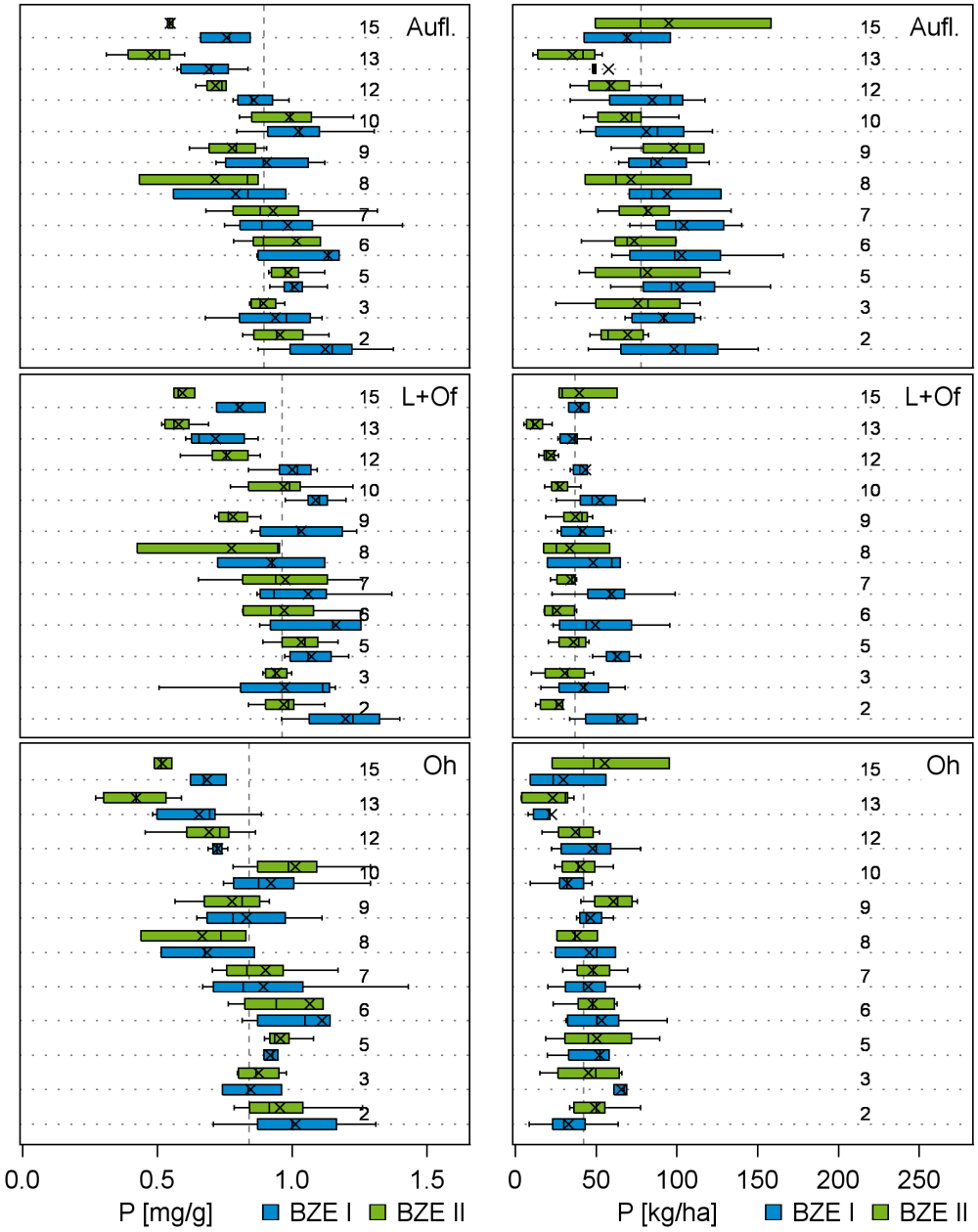

Abb. 50: Phosphorkonzentration (links) und -vorrat (rechts) der Auflage gruppiert nach Bodenformengruppe und Inventur, mit Auflage = gesamte Auflage, 2 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Lösslehm, 3 = Staugleye auf Lösslehm, 5 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis, 6 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit u.a., 7 = Braunpodsole auf Grundgestein, 8 = Podsole auf Grundgestein, 9 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit, 10 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer, 12 = terr. pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft, 13 = terr. pleistozäne Sandformen ziemlich armer Nährkraft, 15 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden.

4.1.17 Fazit zum Einfluss der Bodenform auf die Auflagemächtigkeit

Bei den Auswertungen zum Einfluss der Bodenformengruppen auf die Bodenchemie lassen sich im Wesentlichen zwei Kollektive gegenüberstellen: Böden auf pleistozänen Sanden im Tiefland und Bodenformen der mittleren und höheren Berglagen mit Ausnahme der Podsole (8), Braunerden und Braunstaugleye auf Sand-Granit (9) und Humusstaugleye (11).

Die pleistozänen Sande können in drei Gruppen eingeteilt werden. Zum einen in Böden mittlerer Nährkraft (12), Gleypodsole auf pleistozänen Sanden (15) und Böden mit armer Nährkraft (13). Diese Böden zeichnen sich im Vergleich zu den Böden der mittleren und höheren Berglagen durch ein weiteres C/N-Verhältnis aus.

Alle Bodenformengruppen der pleistozänen Sande haben niedrige Mg-, K- und N-Gehalte. Die Basensättigung zwischen BZE I und BZE II nahm ab, am deutlichsten auf den pleistozänen Sanden mittlerer Nährkraft. Insgesamt sind die pH-Werte bei den Bodenformen der pleistozänen Sande vergleichsweise hoch. Unter den Bodenformen der mittleren und höheren Berglagen zeichnen sich Braunerden und Braunstaugleye auf Gneis (5) und Braunerden auf Phyllit und Schiefer (10) durch ein enges C/N-Verhältnis aus und verfügen über hohe C- und N-Gehalte. Daneben ist auch bei Braunerden und Braunstaugleyen auf Granit (6) das C/N-Verhältnis eng. Vor allem auf Braunerden und Braunstaugleyen auf Gneis und auf Phyllit und Schiefer aber auch bei Grundgesteins-Braunpodsolen (7) zeichnet sich eine Zunahme von Ca und Mg ab. Bei den Braunerden und Braunstaugleyen auf Gneis und den Grundgesteins-Braunpodsolen geschah dies bei niedrigem Ausgangsniveau. Dementsprechend nimmt die Basensättigung bei Braunerden und Braunstaugleyen auf Gneis zu. Die Bodenformengruppen 5, 6, 7und 10 sind ausreichend mit K versorgt. Deutlich ärmer als die übrigen Bodenformen der mittleren und höheren Berglagen ist die Gruppe der Podsole, die sich durch ein weites C/N-Verhältnis und niedrige pH(KCl)-Werte auszeichnet.

Braunerden und Braunstaugleye auf Lösslehm (2) verfügen im Allgemeinen über hohe Elementvorräte und zeichnen sich ebenso wie Staugleye auf Lösslehm (3) durch ein enges C/N-Verhältnis und hohe K-gehalte aus.

In der organischen Auflage gibt es unter den Vorräten kaum Unterschiede. Bei den Gehalten zeichnen sich vor allem Unterschiede zwischen den Bodenformen der pleistozänen Sande (12; 13; 15) zu den übrigen Bodenformen ab. Ausschlaggebend für die Entwicklung der Bodenformen der mittleren und höheren Berglagen, welche während der BZE I deutlich niedrigere pH-Werte aufwiesen, sind auch die dort durchgeführten Bodenschutzkalkungen. Die Ca-Gehalte nehmen ebenso wie der pH-Wert in der organischen Auflage bei Braunerden u. Braunstaugleyen auf Gneis (5) und bei Braunerden auf Phyllit und Schiefer (10) zu. Beide Bodenformengruppen haben zum Zeitpunkt der BZE II deutlich höhere Mg- und Ca-Gehalte als die Bodenformen der pleistozänen Sande (12; 13; 15). Niedrige P- und K-Gehalte in der organischen Auflage finden sich in Bodenformen der pleistozänen Sande (12; 13; 15). Im Gegensatz dazu verfügen Böden aus Löss

(2; 3) sowie Braunerden und Braunstaugleye auf Gneis (5), Granit (6) oder Phyllit und Schiefer (10) und Grundgesteins-Braunpodsole (7) über deutlich höhere P- und K-Gehalte.

4.2 Einfluss der Kalkung auf das Gesamtkollektiv

Da nicht alle Böden in Sachsen gekalkt werden, wurden die nachfolgenden Untersuchungen und Darstellungen des Variantenvergleiches gekalkt/ungekalkt auf jene Bodenformen begrenzt, die potenziell gekalkt werden. Dazu gehören Lokalbodenformen, die in eine der folgenden Gruppen zugeordnet werden (Tab. 45). Braunstaugleye auf Lösslehm (2), Braunerde und Braunstaugleye auf Gneis (5), Braunerde und Braunstaugleye auf Granit u.a. (6), Braunpodsole auf Grundgestein (7), Braunerde u. Braunstaugleye auf Sand-Granit (9), Braunerden auf Phyllit und Schiefer (10).

4.2.1 Auflagemächtigkeit und Humusvorräte

Die Mächtigkeit der gesamten Auflage nahm sowohl in den gekalkten als auch ungekalkten Kollektiven der untersuchten Bodenformengruppen um etwa 2 cm ab (Abb. 51). Die Abnahme war auf den ungekalkten Standorten höher. Signifikante Unterschiede in der Entwicklung zwischen den Inventuren gab es aber nicht (Wilcoxon, $P > 0{,}1$). Die Abnahme der Auflagemächtigkeit beruhte für beide Varianten auf einer signifikanten Abnahme der Mächtigkeit des L+Of-Horizonts (t-Test, $P < 0{,}001$). Es bestanden dabei keine signifikante Unterschiede zwischen den beiden Behandlungsvarianten (t-Test, $P > 0{,}05$). Keine Änderungen in der Auflagemächtigkeit ergaben sich im Oh-Horizont.

Die Vorräte der Auflage nahmen sowohl auf gekalkten als auch auf ungekalkten Standorten ab (Abb. 51). Auch hierbei konnten zwischen den beiden Varianten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden (Wilcoxon, $P > 0{,}1$). Die Abnahme des Humusvorrates betraf vor allem den L+Of-Horizont. Hier nahmen die Vorräte der ungekalkten Standorte um 15,63 ± 4,01 t ha^{-1} ab, auf den gekalkten Standorten waren es 20,48 ± 4,25 t ha^{-1}. Die Abnahme war signifikant (t-Test, $P < 0{,}001$), Unterschiede zwischen den beiden Varianten bestanden aber nicht (t-Test, $P > 0{,}1$). Beim Vorrat des Oh-Horizonts war dagegen eine leichte Zunahme zu verzeichnen, Unterschiede zwischen den gekalkten und ungekalkten Standorten konnten nicht festgestellt werden (t-Test, $P > 0{,}1$).

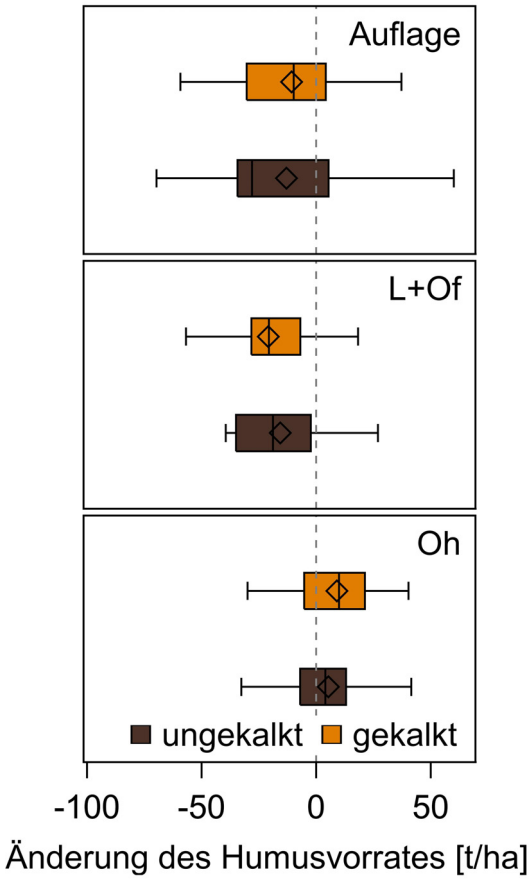

Abb. 51: Entwicklung des Humusvorrates zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte, mit Auflage = gesamte Auflage.

4.2.2 Kohlenstoffkonzentration

Die C-Konzentration (Abb. 52) nahm in der Auflage der gekalkten Punkte um 3,2 ± 0,6 % ab (t-Test, $P < 0{,}001$). Bei den ungekalkten Punkten waren keine Änderungen festzustellen (t-Test, $P > 0{,}1$). Dieser Unterschied zwischen beiden Varianten war signifikant (t-Test, $P < 0{,}01$; Abb. 52). Im L+Of-Horizont ergab sich ein signifikant gegenläufiger Trend mit einer abnehmenden C-Konzentration auf den gekalkten Flächen und einer steigenden Konzentration auf den ungekalkten Flächen (Wilcoxon, $P < 0{,}05$). Im Oh-Horizont nahm die C-Konzentration auf den gekalkten Flächen um 1,89 ± 0,7 % ab (t-Test, $P < 0{,}05$). Bei den ungekalkten Punkten war kein signifikanter Unterschied zwischen den Inventuren festzustellen. Die Unterschiede zwischen gekalkten und nicht gekalkten Flächen in der Entwicklung der C-Konzentration des Oh-Horizonts waren signifikant.

Im Mineralboden stieg die C-Konzentration (Abb. 52) sowohl auf den gekalkten mit 0,3 ± 0,1 %, wie auch auf den ungekalkten Flächen mit 0,5 ± 0,2 % (t-Test, $P < 0{,}05$, bzw. Wilcoxon, $P < 0{,}01$) an. Die Unterschiede zwischen den gekalkten und ungekalkten Punkten waren aber nicht

signifikant (Wilcoxon, P > 0,1). Bei getrennter Betrachtung der Tiefenstufen ergab sich, dass in der Tiefenstufe 0-10 cm weder auf den gekalkten noch auf den ungekalkten Flächen signifikante Änderungen der C-Konzentration zu verzeichnen waren. Ein signifikanter Anstieg fand dagegen in der Tiefenstufe 10-30 cm statt, mit einer Zunahme von 0,5 ± 0,2 % auf den gekalkten und 0,3 ± 0,1 % auf den ungekalkten Flächen. Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten waren nicht signifikant (Wilcoxon, P > 0,1).

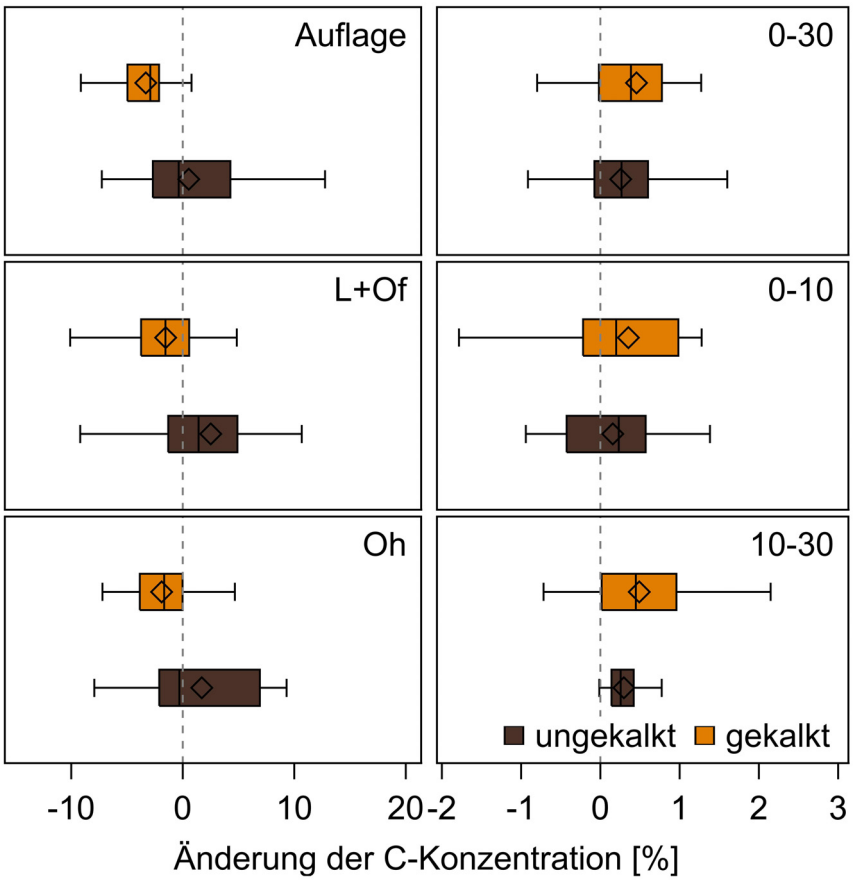

Abb. 52: Entwicklung des Kohlenstoffkonzentration zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte in der Auflage und im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage.

4.2.3 Kohlenstoffvorrat

Die C-Vorräte in der Auflage nahmen auf den gekalkten und ungekalkten Flächen ab, entsprechend der Abnahme der Humusvorräte. Unterschiede zwischen den beiden Varianten waren nicht festzustellen (t-Test, *P* > 0,1). Die Abnahme der C-Vorräte der Auflage betraf vor allem den L+Of-Horizont, wo die Vorräte bei der BZE II auf den gekalkten Flächen 9,25 ± 1,81 t ha^{-1} und auf den ungekalkten Flächen 5,73 ± 1,52 t ha^{-1} kleiner waren als bei der BZE I. Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten waren nicht signifikant (t-Test, *P* > 0,1).

Im Oh-Horizont war dagegen für beide Varianten ein geringfügiger, nicht signifikanter Anstieg des Vorrats zu erkennen. Auch hier ergaben sich keine Unterschiede zwischen den Varianten (t-Test, $P > 0{,}1$). Die C-Vorräte des Mineralbodens nahmen sowohl auf den gekalkten als auch auf den ungekalkten Flächen um 6,97 ± 2,32 t ha^{-1}, bzw. 5,83 ± 2,27 t ha^{-1} zu. Unterschiede zwischen beiden Varianten ergaben sich nicht (t-Test, $P > 0{,}1$). Diese Zunahme war hauptsächlich in der Tiefenstufe 10-30 cm lokalisiert, wo die Vorräte um 4,81 ± 1,36 t ha^{-1} in der gekalkten und 4,99 ± 1,54 t ha^{-1} in der ungekalkten Stichprobe zunahmen. In der Tiefenstufe 0-10 cm waren dagegen keine signifikanten Änderungen zu verzeichnen.

4.2.4 Stickstoffkonzentration

In der Auflage nahm die N-Konzentration in beiden Varianten ab. Die Abnahme betrug auf den gekalkten Flächen 0,20 ± 0,03 %, auf den ungekalkten Flächen waren es 0,13 ± 0,05 % (Abb. 53). Es gab dabei keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten (t-Test, $P > 0{,}1$). Auch im L+Of-Horizont gab es trotz einer in beiden Behandlungsvarianten deutlich ausgeprägten Abnahme von 0,25 ± 0,04 % auf den gekalkten und 0,21 ± 0,06 % auf den ungekalkten Flächen keine signifikanten Unterschiede (t-Test, $P > 0{,}1$). Im Oh-Horizont ergaben sich weder innerhalb der beiden Varianten noch zwischen ihnen signifikante Unterschiede in der N-Konzentration. Im Mineralboden nahm die N-Konzentration auf den gekalkten Flächen um 0,02 ± 0,01 % und auf den ungekalkten Flächen um 0,01 ± 0,01 % zu (Abb. 53). Die Unterschiede zwischen beiden Varainten waren nicht signifikant (t-Test, $P > 0{,}1$). Dabei waren die Änderungen vor allem auf die Tiefenstufe 10-30 cm beschränkt, in der Tiefenstufe 0-10 cm konnten keine signifikanten Unterschiede der N-Konzentration festgestellt werden.

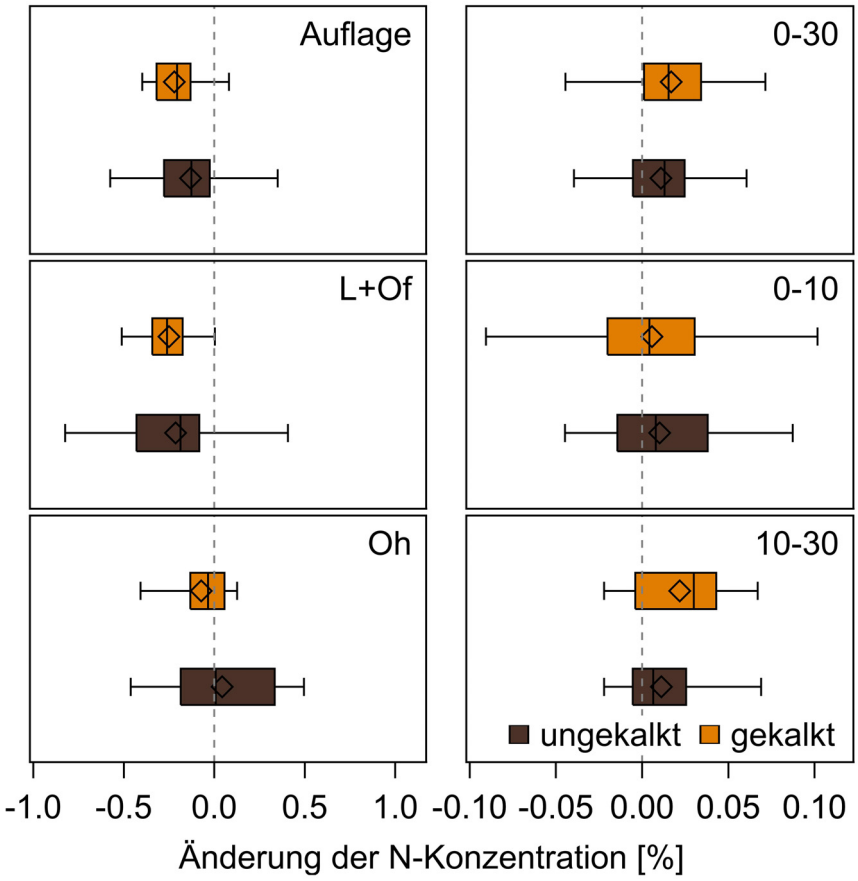

Abb. 53: Entwicklung der Stickstoffkonzentration zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte in der Auflage und im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage.

4.2.5 Stickstoffvorrat

Auch bei den N-Vorräten konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den gekalkten und ungekalkten Flächen gemessen werden. In der Auflage nahmen die Vorräte zwischen den Inventuren um 0,27 ± 0,11 t ha^{-1} auf den gekalkten und 0,34 ± 0,09 t ha^{-1} auf den ungekalkten Flächen ab. Dieses basiert auf einer Abnahme der N-Vorräte im L+Of-Horizont von 0,49 ± 0,08 t ha^{-1} auf den gekalkten Flächen und 0,38 ± 0,06 t ha^{-1} auf den ungekalkten Flächen. Im Oh-Horizont gab es dagegen keinen signifikanten Unterschied zwischen den Inventuren. Im Mineralboden stieg der N-Vorrat um 0,31 ± 0,1 t ha^{-1} auf den gekalkten und um 0,29 ± 0,12 t ha^{-1} auf den ungekalkten Flächen. Dabei ergaben sich in der Tiefenstufe 0-10 cm keine signifikanten Unterschiede zwischen den Inventuren. Die Vorratsänderungen beruhten im Wesentlichen auf einem Anstieg der Vorräte in der Tiefenstufe 10-30 cm von 0,28 ± 0,08 t ha^{-1} auf den gekalkten und von 0,20 ± 0,08 t ha^{-1} auf den ungekalkten Flächen.

4.2.6 C/N-Verhältnis

Bei der Entwicklung des C/N-Verhältnisses der Auflage (Abb. 54) ließen sich signifikante Unterschiede zwischen den gekalkten und ungekalkten Flächen erkennen (t-Test, $P < 0{,}01$). Das C/N-Verhältnis weitete sich auf den ungekalkten Flächen um 2,0 ± 0,3 (t-Test, $P < 0{,}001$). Auf den gekalkten Flächen war dagegen keine signifikante Änderung zu erkennen (t-Test,$P > 0{,}1$). Im L+Of-Horizont weitete sich das C/N-Verhältnis für beide Varianten mit 1,9 ± 0,5 auf den gekalkten und 4,0 ± 0,5 auf den ungekalkten Flächen signifikant. Dabei war aber die Änderung auf den ungekalkten Flächen signifikant höher (Wilcoxon, $P < 0{,}05$). Im Oh-Horizont waren dagegen keine signifikanten Änderungen zu erkennen.

Im Mineralboden konnten weder zwischen den Inventuren noch zwischen den gekalkten und ungekalkten Flächen signifikante Unterschiede im C/N-Verhältnisses festgestellt werden (Abb. 54). Dies betraf sowohl die Tiefenstufe 0-10 cm als auch die Tiefenstufe 10-30 cm.

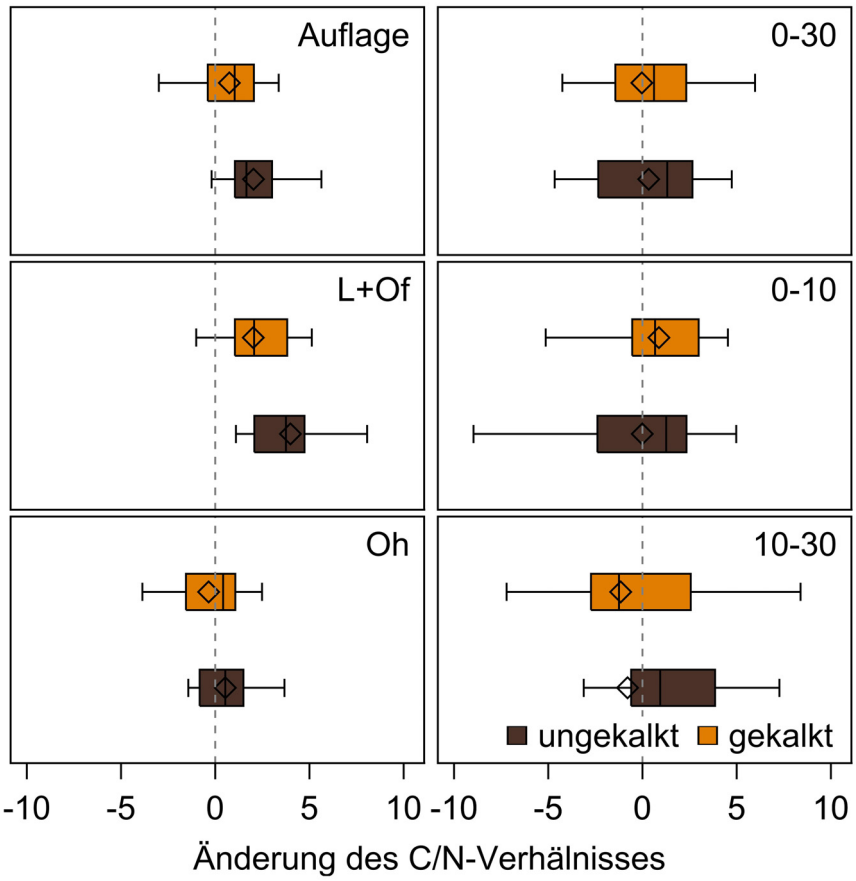

Abb. 54: Entwicklung des C/N-Verhältnisses zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte in der Auflage und im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage.

4.2.7 pH-Wert

Es zeigte sich, dass die Kalkung von Waldböden deutliche Auswirkungen auf den pH-Wert der Böden hatte (Abb. 55). So stieg der pH(KCl)-Wert der organischen Auflage auf gekalkten Böden um 0,7 ± 0,1 an, während auf nicht gekalkten Böden keine signifikanten Änderungen feststellbar waren. Die Unterschiede zwischen den beiden normalverteilten Varianten waren signifikant (t-Test, $P < 0{,}001$). Im L+Of-Horizont kam es in beiden Fällen zu einem Anstieg des pH(KCl)-Wertes, allerdings war dieser auf den gekalkten Standorten mit 1,4 ± 0,2 gegenüber 0,2 ± 0,1 weitaus höher (t-Test, $P < 0{,}001$). Der Anstieg des pH(KCl)-Wertes fiel auf gekalkten Böden im Oh-Horizont mit 0,7 ± 0,1 geringer aus als im L+Of-Horizont, war aber dennoch signifikant höher (t-Test, $P < 0{,}001$) als auf ungekalkten Böden, wo keine Änderung festzustellen war. Im Mineralboden nahm der pH(KCl)-Wert sowohl auf den ungekalkten mit 0,2 ± 0,1 als auch auf den gekalkten Standorten mit 0,4 ± 0,1 zu (Abb. 55). Allerdings haben die pH(KCl)-Werte auf den gekalkten Standorten im Mineralboden stärker zugenommen (t-Test, $P < 0{,}05$). In der Tiefenstufe 0-10 cm hat der pH(KCl)-Wert auf den ungekalkten Standorten um 0,3 ± 0,1 zugenommen. Auf den gekalkten Standorten stieg der pH(KCl)-Wert um 0,4 ± 0,1. Die Änderung des pH(KCl)-Wert war damit signifikant höher (t-Test, $P < 0{,}05$). In der Tiefenstufe 10-30 cm kam es ebenfalls in beiden Varianten zu einem Anstieg des pH-Wertes von jeweils 0,2 ± 0,1, allerdings waren hier die Unterschiede zwischen den Varianten nicht signifikant.

Die pH(H2O)-Werte entwickelten sich genauso wie die pH(KCl)-Werte. Auch hierbei kam es in der organischen Auflage und im Mineralboden der gekalkten Standorte zu einem Anstieg der pH-Werte. Auf den ungekalkten Standorten stieg der pH-Werte im Mineralboden an, in der Auflage dagegen nur im L+Of-Horizont, wobei das Ausmaß des Anstiegs sowohl im Mineralboden als auch im L+Of-Horizont geringer war als auf den gekalkten Standorten.

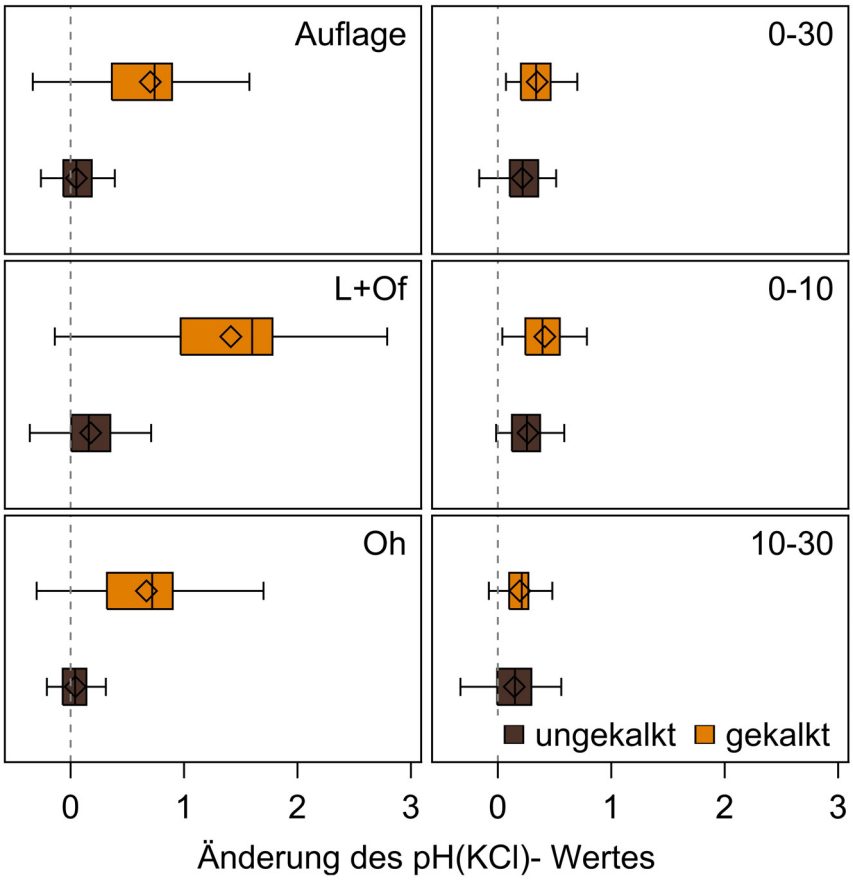

Abb. 55: Entwicklung des pH(KCl)-Wertes zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte in der Auflage und im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage.

4.2.8 Basensättigung

Auf den ungekalkten Flächen kam es zu einer Abnahme der Basensättigung des Mineralbodens von 4,2 ± 0,9 % (Abb. 56). Auf den gekalkten Flächen war dagegen eine Zunahme der Basensättigung um 4,4 ± 1,1 % zu verzeichnen. Die Unterschiede zwischen den Varianten waren signifikant (Wilcoxon-Test, $P < 0{,}001$). Die Unterschiede waren in der Tiefenstufe 0-10 cm größer als in der Tiefenstufe 10-30 cm. In der Tiefenstufe 0-10 cm nahm die Basensättigung auf den ungekalkten Standorten um 6,2 ± 1,2 % ab, auf den gekalkten Standorten dagegen um 6,1 ± 1,3 % zu. Die Unterschiede waren signifikant (Wilcoxon, $P < 0{,}001$). In der Tiefenstufe 10-30 cm kam es zu einer Abnahme von 3,3 ± 0,9 % auf ungekalkten Standorten. Die Basensättigung der gekalkten Standorte nahm um 3,5 ± 1,3 % zu. Auch hier waren die Unterschiede zwischen beiden Varianten signifikant (Wilcoxon, $P < 0{,}001$).

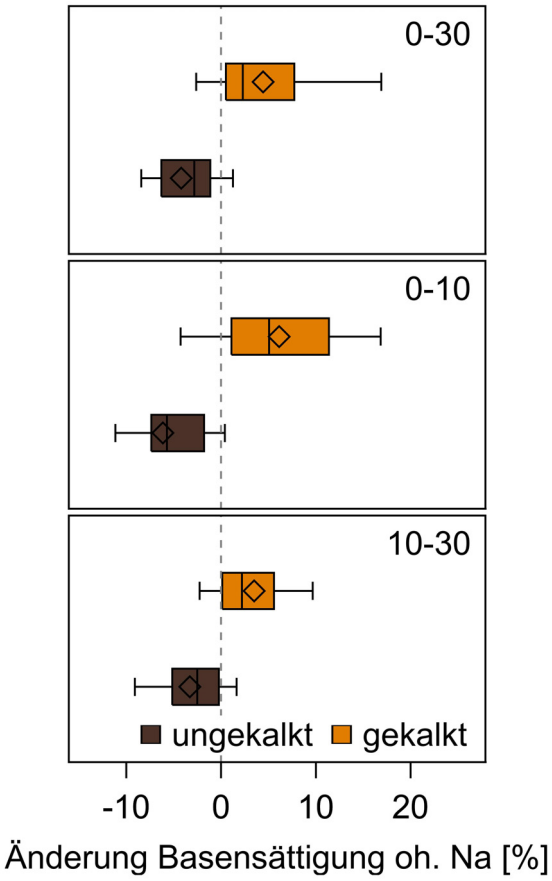

Abb. 56: Entwicklung der Basensättigung ohne Natrium zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm).

4.2.9 Calciumkonzentration

Die Konzentration an extrahierbarem Ca änderte sich in der Auflage ungekalkter Standorte nicht (Abb. 57). Auf gekalkten Standorten nahm sie dagegen mit 5,9 ± 1,0 mg g^{-1} deutlich zu. Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten waren signifikant (t-Test, $P < 0{,}001$). Die Unterschiede waren sowohl im L+Of-Horizont als auch im Oh-Horizont zu finden, dabei aber im L+Of-Horizont mit einer Zunahme auf gekalkten Standorten von 11,8 ± 2,1 mg g^{-1} stärker ausgeprägt (t-Test, $P < 0{,}001$) als mit einer Zunahme von 3,0 ± 0,6 mg g^{-1} im Oh-Horizont (t-Test, $P < 0{,}001$). Auch bei der Konzentration an austauschbarem Ca im Mineralboden gab es zwischen beiden Behandlungsvarianten signifikante Unterschiede (Wilcoxon, $P < 0{,}001$). Während die Ca-Konzentration auf den ungekalkten Standorten um 0,4 ± 0,1 mg g^{-1} abnahm, stieg sie auf den gekalkten Standorten um 0,4 ± 0,1 mg g^{-1} an (Abb. 57). Die Differenzen zwischen beiden Varianten waren in der Tiefenstufe 0-10 cm größer als in der Tiefenstufe 10-30 cm. In der Tiefenstufe 0-10 cm nahm die Ca-Konzentration auf den ungekalkten Standorten um 0,6 ± 0,1 mg g^{-1} ab und auf den gekalkten Standorten um 0,7 ± 0,2 mg g^{-1} zu. In der Tiefenstufe

10-30 cm sank die Konzentration um 0,4 ± 0,1 mg g^{-1}, auf den gekalkten Flächen war dagegen keine signifikante Änderung zu verzeichnen. Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten waren dennoch signifikant (Wilcoxon, $P < 0{,}001$).

4.2.10 Calciumvorrat

Ein zu den Ergebnissen der Ca-Konzentration analoges Ergebnis erbrachte die Untersuchung des Ca-Vorrates. Zwischen den Varianten ergaben sich signifikante Unterschiede sowohl bei den Vorräten an extrahierbaren Ca in der Auflage als auch an austauschbarem Ca im Mineralboden. In der Auflage ergaben sich auf den ungekalkten Standorten keine signifikanten Änderungen zwischen den Inventuren. Auf den gekalkten Standorten stiegen die Vorräte dagegen insgesamt um 450 ± 104 kg ha^{-1}. Im Mineralboden der ungekalkten Standorte nahm der Gesamtvorrat an austauschbarem Ca um 109 ± 20 kg ha^{-1} ab. Auf den gekalkten Standorten stieg der Vorrat um 66 ± 29 kg ha^{-1}.

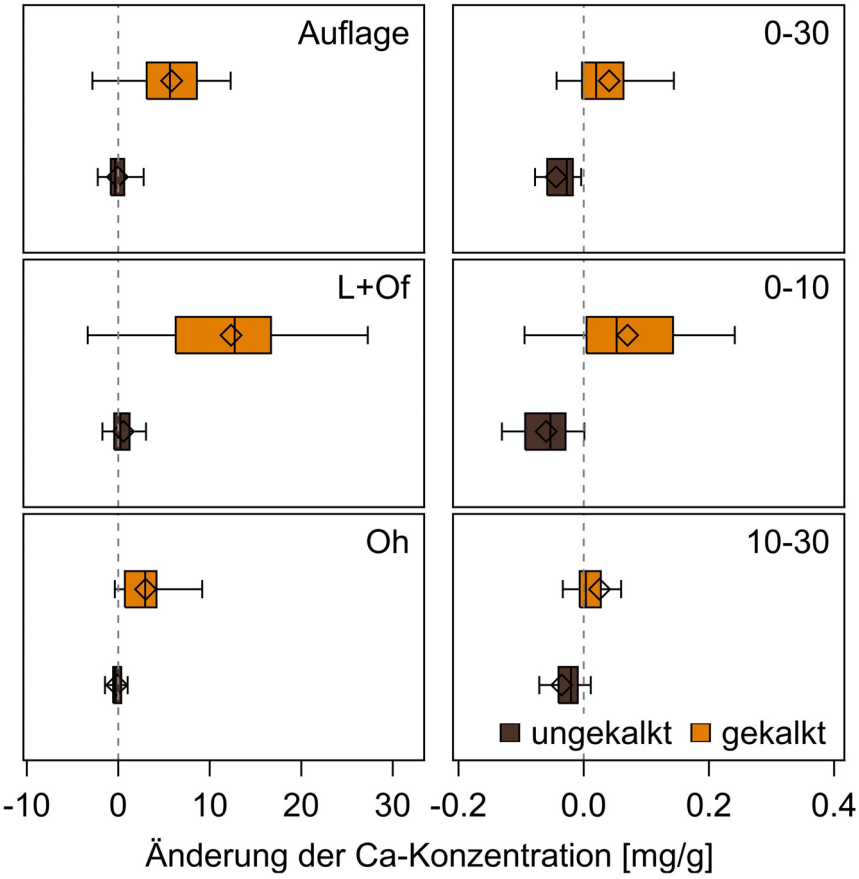

Abb. 57. Entwicklung des Calciumkonzentration zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte in der Auflage und im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage.

4.2.11 Magnesiumkonzentration

In der Auflage der ungekalkten Flächen gab es keine signifikante Änderung der Konzentration an extrahierbaren Mg (Abb. 58). Auf den gekalkten Flächen stieg dagegen die Konzentration um 2,5 ± 0,5 mg g^{-1} an. Die Unterschiede waren signifikant (Wilcoxon, $P < 0{,}001$). Innerhalb der Auflage war auf den gekalkten Flächen im L+Of-Horizont ein Anstieg der Mg-Konzentration um 4,7 ± 1,0 mg g^{-1} zu beobachten, im Oh-Horizont waren es 1,5 ± 0,2 mg g^{-1}. In beiden Horizonten waren die Unterschiede zu den ungekalkten Flächen signifikant. Die Konzentration an austauschbarem Mg zeigte im Mineralboden der ungekalkten Flächen ebenfalls keine signifikanten Änderungen und auf den gekalkten Flächen einen signifikanten Anstieg von 0,05 ± 0,01 mg g^{-1} (Abb. 58). Beide Varianten unterschieden sich damit signifikant (Wilcoxon-Test, $P < 0{,}001$). Die Änderung auf den gekalkten Flächen fiel in der Tiefenstufe 0-10 cm mit 0,08 ± 0,01 mg g^{-1} stärker aus als in der Tiefenstufe 10-30 cm mit 0,03 ± 0,01 mg g^{-1}.

4.2.12 Magnesiumvorrat

Während es am Vorrat des extrahierbaren Mg in der Auflage ungekalkter Standorte keine signifikanten Änderungen gab, nahm er an gekalkten Standorten um 195 ± 48 kg ha^{-1} zu. Die Differenz zwischen beiden Behandlungsvarianten war signifikant (Wilcoxon, $P < 0{,}001$). Die Zunahme war dabei im L+Of-Horizont mit 122 ± 48 kg ha^{-1} höher als im Oh-Horizont mit 84 ± 13 kg ha^{-1}. Auch im Mineralboden kam es auf den gekalkten Flächen zu einer Zunahme an austauschbarem Mg von 85 ± 15 kg ha^{-1}. Auf den ungekalkten Flächen waren dagegen insgesamt keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten waren signifikant (Wilcoxon, $P < 0{,}001$). Die Zunahme an Mg war auf gekalkten Flächen in der Tiefenstufe 0-10 cm mit 48 ± 8 kg ha^{-1} ausgeprägter als in der Tiefenstufe 10-30 cm mit 37 ± 10 kg ha^{-1}. In der unteren Tiefenstufe kam es im Gegensatz zur oberen auf ungekalkten Flächen zu einer Abnahme von 6 ± 4 kg ha^{-1}.

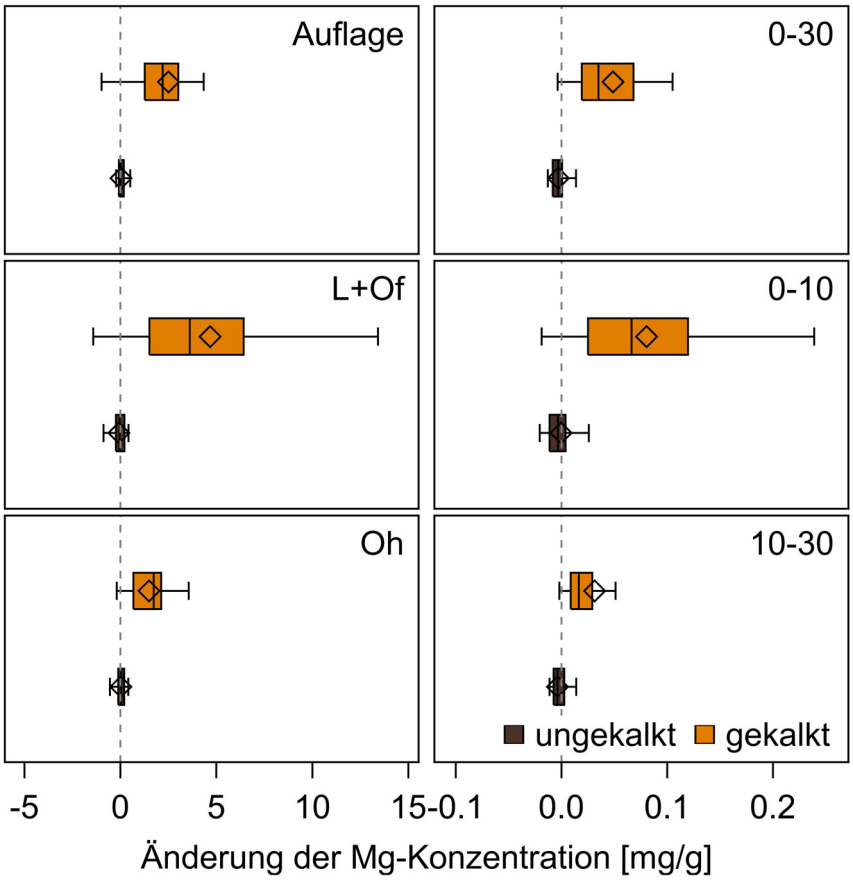

Abb. 58: Entwicklung des Magnesiumkonzentration zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte in der Auflage und im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage.

4.2.13 Kaliumkonzentration

Die Konzentration an extrahierbarem K nahm in der Auflage gekalkter Standorte mit 0,28 ± 0,11 mg g^{-1} stärker zu (Abb. 59). Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten waren aber nicht signifikant (Wilcoxon, $P > 0{,}05$). Die Zunahme der Konzentration war im L+Of-Horizont mit 0,13 ± 0,05 mg g^{-1} auf ungekalkten und 0,22 ± 0,09 mg g^{-1} auf gekalkten Flächen stärker als im Oh-Horizont. Dort war keine signifikante Änderung festzustellen (Wilcoxon, $P > 0{,}05$). Bei der Konzentration an austauschbarem K im Mineralboden gab es weder zwischen den Behandlungsvarianten noch zwischen den Inventuren signifikante Unterschiede.

4.2.14 Kaliumvorrat

Der Vorrat an extrahierbarem K in der Auflage unterschied sich nicht signifikant zwischen den Behandlungsvarianten und Inventuren. Im Mineralboden nahm der Vorrat an austauschbarem K um 12 ± 6 kg ha^{-1} auf ungekalkten Flächen ab, während auf gekalkten Flächen keine signifikante Änderung festzustellen war (Wilcoxon-Test, $P > 0{,}1$). Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten waren allerdings nicht signifikant (Wilcoxon, $P > 0{,}1$).

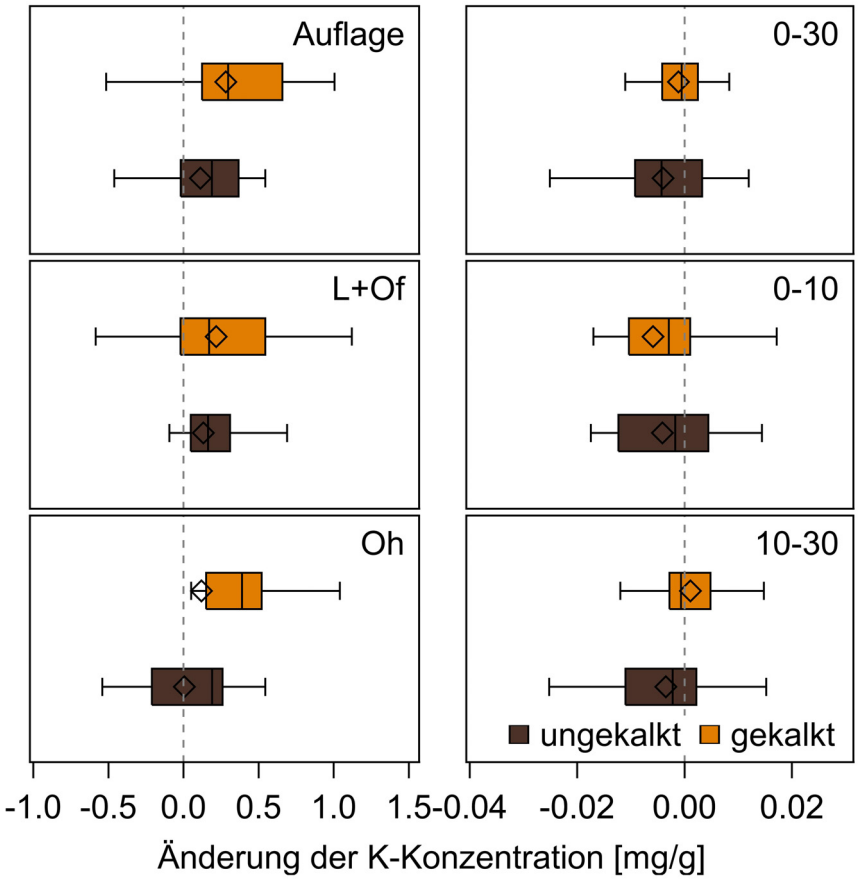

Abb. 59: Entwicklung des Kaliumkonzentration zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte in der Auflage und im Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage.

4.2.15 Phosphorkonzentration

Die Konzentration an extrahierbarem P (Abb. 60) nahm in der gesamten Auflage ungekalkter Böden mit 0,11 ± 0,02 mg g^{-1} signifikant ab (t-Test, $P < 0{,}001$). Bei den gekalkten Böden traten keine signifikanten Änderungen auf (t-Test, $P > 0{,}05$). Die Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten waren auch nicht signifikant (t-Test, $P > 0{,}05$). Bei gesonderter Betrachtung des L+Of-Horizonts traten deutlichere Unterschiede hervor. Hier nahm die

P-Konzentration sowohl der ungekalkten mit 0,20 ± 0,03 mg g^{-1} als auch der gekalkten Flächen mit 0,08 ± 0,02 mg g^{-1} ab. Die Abnahme war auf den ungekalkten Flächen signifikant höher (t-Test, $P < 0{,}01$). Im Oh-Horizont ergaben sich dagegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Inventuren und Behandlungsvarianten.

4.2.16 Phosphorvorrat

Der Vorrat an extrahierbarem P (Abb. 60) nahm in der gesamten Auflage der ungekalkten Flächen um 23 ± 6 kg ha^{-1} ab (t-Test, $P < 0{,}001$). Auf den gekalkten Flächen war keine signifikante Abnahme festzustellen (t-Test, $P > 0{,}1$). Auch die Differenz zwischen den Varianten war nicht signifikant (t-Test, $P > 0{,}1$). Die Analyse des L+Of-Horizonts zeigt, dass dort sowohl auf den ungekalkten mit 25 ± 4 kg ha^{-1} als auch auf den gekalkten Flächen mit 10 ± 7 kg ha^{-1} eine Abnahme zu verzeichnen war. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ergaben sich nicht (t-Test, $P > 0{,}1$). Im Oh-Horizont kam es dagegen auf den gekalkten Flächen zu einer Zunahme der P-Vorräte von 9 ± 4 kg ha^{-1} (t-Test, $P < 0{,}05$).

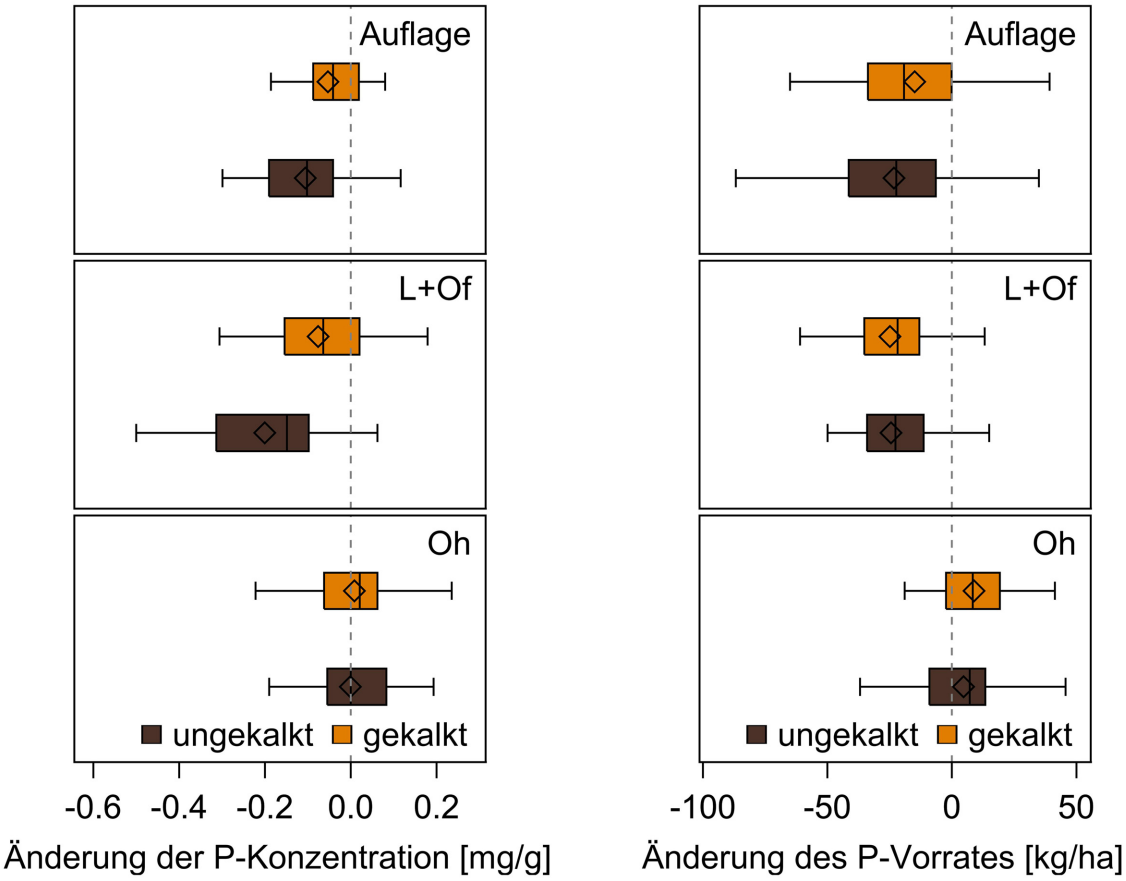

Abb. 60: Entwicklung der Phosphorkonzentration (links) und des Phosphorvorrats (rechts) zwischen der 1. und 2. Inventur für gekalkte und ungekalkte Standorte, mit Auflage = gesamte Auflage.

4.2.17 Fazit zum Einfluss der Kalkung auf das Gesamtkollektiv

Der Vergleich der gekalkten und ungekalkten Flächen ergab eine deutliche Wirkung der Kalkungsmaßnahmen auf den Säure-Basen-Zustand der Böden. Die pH-Werte stiegen auf gekalkten Flächen sowohl in der Auflage als auch im Mineralboden an. Auf den ungekalkten Flächen war dagegen nur im Mineralboden ein allerdings deutlich geringerer Anstieg festzustellen. Die Basensättigung erhöhte sich auf den gekalkten Flächen, auf den ungekalkten Flächen kam es dagegen zu einer Abnahme. Die Unterschiede waren sowohl beim pH-Wert als auch bei der Basensättigung in der Tiefenstufe 0-10 cm ausgeprägter als in der Tiefenstufe 10-30 cm. Die Unterschiede in der Basensättigung beruhen vor allem auf das durch die Kalkung eingebrachte Ca und Mg.

So kam es im Mineralboden der gekalkten Flächen bei der austauschbar gebundenen Fraktion beider Elemente zu einer Zunahme der Konzentrationen. Auf den ungekalkten Flächen nahm die Ca-Konzentration dagegen ab, die Mg-Konzentration änderte sich nicht. Die Unterschiede zwischen den beiden Behandlungsvarianten waren jeweils in der Tiefenstufe 0-10 cm ausgeprägter als in der darunter liegenden Tiefenstufe. In der Auflage der gekalkten Standorte nahm die Konzentration an extrahierbarem Ca und Mg jeweils zu. Auf den ungekalkten Flächen änderten sich die Konzentrationen nicht. Auch bei der Entwicklung der Konzentrationen an extrahierbarem K und P wichen die gekalkten und ungekalkten Standorte voneinander ab. Im L+Of-Horizont gekalkter Standorte nahm die K-Konzentration stärker zu als auf ungekalkten Standorten. Die P-Konzentration nahm dagegen im L+Of-Horizont auf den ungekalkten Standorten stärker ab als auf den gekalkten.

Bei den Humusvorräten ergaben sich keine deutlichen Unterschiede zwischen den gekalkten und ungekalkten Standorten. In beiden Varianten nahm sowohl der Vorrat als auch die Mächtigkeit der organischen Auflage ab. Die Abnahme war auf gekalkten Flächen zwar höher, die Unterschiede zu den ungekalkten Flächen waren aber nicht signifikant. Der Abbau der organischen Substanz war in beiden Gruppen hauptsächlich auf den L+Of-Horizont begrenzt. Eine qualitative Änderung im Humus wurde durch eine Abnahme der C-Konzentration in der Auflage der gekalkten Flächen angezeigt. Die Unterschiede in der C-Konzentration zwischen den beiden Gruppen waren dabei vor allem im L+Of-Horizont ausgeprägt, wo es zu einem gegenläufigen Trend kam. Im Mineralboden nahm die C-Konzentration in beiden Gruppen zu. Ein deutlicher Einfluss der Kalkung auf die Entwicklung der C-Vorräte war nicht zu erkennen. Bei beiden Behandlungsvarianten kam es in der organischen Auflage zu einer Abnahme und im Mineralboden zu einer Zunahme des C-Vorrates. Ebenso waren bei den N-Konzentrationen und -Vorräten für beide Varianten eine Abnahme in der Auflage und eine Zunahme im Mineralboden zu beobachten. Unterschiede in der Qualität der organischen Auflage wurden aber auch durch eine unterschiedliche Entwicklung des C/N-Verhältnisses angezeigt. Das C/N-Verhältnis weitete sich im L+Of-Horizont der ungekalkten Flächen. Auf den gekalkten Flächen ergaben sich zwischen den Inventuren keine signifikanten Unterschiede.

4.3 Einfluss der Kalkung stratifiziert nach Bodenformen

Da in Sachsen nur bestimmte Bodenformen gekalkt werden, fand eine weitere Unterteilung nach Bodenformen statt. Selbst nach Zusammenfassung der Bodenformen zu ähnlichen Gruppen (nach Gemballa mündl.) war die Anzahl der Standorte in den Straten z.T. zu gering für eine Auswertung. Nur die Gruppen 7 (Grundgesteins-Braunpodsole) und 10 (Phyllit-/Schiefer-Braunerden) weisen eine ausreichend hohe Anzahl an Standorten auf. Die Trends des Gesamtkollektivs finden sich auch in diesen Gruppen wieder. Die Auswirkung der Kalkung auf die Basensättigung, pH-Wert, Ca- und Mg-Vorräte zeigt sich deutlich (Anhang: Abb. I-96 bis Abb. I-106).

4.4 Einfluss der Bestockungsform auf die Bodenchemie

Die Bestockung wurde in 8 Bestandestypen untergliedert (Tab. 46). Bei der Auswertung wurden nur die Bestandestypen berücksichtigt, die mindestens dreimal vertreten waren. Die Bestandestypen Buchenbestand (4) und Eichenbestand (5) waren nicht ausreichend vertreten und konnten bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden.

Tab. 46: Einteilung der Bestockung in Bestandestypen.

Code	Bestandestypen
1	Fichten(rein)bestand (≥ 70 % Fichte)
2	Kiefern(rein)bestand (≥ 70 % Kiefer)
3	sonstige Nadelbaumarten (≥ 70 % sonstiges Nadelholz)
4	Buchen(rein)bestand (≥ 70 % Buche)
5	Eichen(rein)bestand (≥ 70 % Eiche)
6	Laubholzreiche Nadelmischbestände (> 30 % Laubholz)
7	Nadelholzreiche Laubholzmischbestände (> 30 % Nadelholz)
8	sonstige Laubbaumarten (≥ 70 % sonstiges Laubholz)

4.4.1 Auflagemächtigkeit und Humusvorrat der organischen Auflage

Die Vorräte der organischen Auflage reichten von 56,7 ± 63,7 t ha^{-1} beim Bestandestyp der sonstigen Laubbaumarten (8) bis 120,2 ± 27,7 t ha^{-1} bei den sonstigen Nadelholzarten (3). Weder für die Auflagemächtigkeit noch für die Humusvorräte konnten signifikante Unterschiede zwischen den Bestandestypen festgestellt werden.

Unterschiede in den Humusvorräten der organischen Auflage traten nur im L+Of-Horizont auf. Dort waren während der BZE I die Vorräte der Fichtenbestände (1) höher als die Vorräte der sonstigen Laubbaumarten (8). Bei der BZE II traten bei Werten von 24,7 ± 21,6 t ha^{-1} (sonstige Laubbaumarten) bis 34,3 ± 11,4 t ha^{-1} (Fichtenbestände) keine signifikanten Unterschiede auf.

Signifikante Unterschiede in der Entwicklung der Humusvorräte im L+Of-Horizont ergaben sich aufgrund eines hohen Abbaus der Vorräte unter Fichtenbeständen von 57,2 ± 15,0 t ha^{-1} auf 34,3 ± 11,4 t ha^{-1}. Im Oh-Horizont reichte die Spanne der BZE II-Werte über die untersuchten Bestandestypen von 44,9 ± 44,3 t ha^{-1} bis 75,5 ± 16,4 t ha^{-1}.

4.4.2 Kohlenstoffkonzentration

In der Auflage wiesen Fichtenbestände (1) mit 37,8 ± 4,4 % höhere C-Konzentrationen (Abb. 61) auf als Kiefernbestände (2) mit 30,7 ± 5,6 %, sowie die Bestandestypen der laubholzreichen Nadelwälder (6) mit 32,3 ± 4,9 % und sonstigen Laubbaumarten (8) mit 31,2 ± 6,8 %, wobei die Unterschiede bei der BZE II ausgeprägter waren (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$, bzw. ANOVA, $P < 0{,}001$). In der Auflage der Kiefernbestände ist eine deutliche Senkung der C-Konzentration zwischen den Inventuren festzustellen. Unterschiede der Änderungsraten zwischen den Gruppen waren aber nicht signifikant (Welch-ANOVA, $P > 0{,}1$). Die Unterschiede werden dabei hauptsächlich durch die Verhältnisse im Oh-Horizont bestimmt. Hier reichte die Spanne (BZE II) von 23,9 ± 3,9 % bei den sonstigen Laubbaumarten bis 34,6 ± 4,8 % bei den Fichtenbeständen. Im L+Of-Horizont lagen die C-Konzentrationen dichter beieinander. Auffällig war vor allem, dass im Gegensatz zum Oh-Horizont, die Kiefernbestände mit 41,1 ± 5,0 % (BZE II) dicht bei den Fichtenbeständen mit 43,2 ± 4,7 % lagen. Beide unterschieden sich signifikant von den sonstigen Laubbaumarten, die mit 34,5 ± 4,5 % den niedrigsten C-Gehalt im L+Of-Horizont aufwiesen. Im Mineralboden (Abb. 61) hatten die Böden unter Kiefernbeständen mit 1,5 ± 0,7 % (BZE II) die niedrigsten C-Gehalte (ANOVA, $P < 0{,}001$). Unter den Fichtenbeständen und bei den sonstigen Laubbaumarten traten die höchsten C-Konzentrationen mit BZE II-Werten von 3,3 ± 1,4 % und 3,1 ± 2,0 % auf. Somit fand sich bei den sonstigen Laubbaumarten der geringste Kontrast zwischen den C-Konzentrationen der Auflage und denen des Mineralbodens. Die Konzentrationsunterschiede innerhalb der Tiefenstufe 0-10 cm waren mit Werten von 2,4 ± 1,3 % bis 5,1 ± 1,7 % ausgeprägter als in der Tiefenstufe 10-30 cm, wo die BZE II-Gehalte von 1,0 ± 0,6 % bis 2,3 ± 1,2 % reichten.

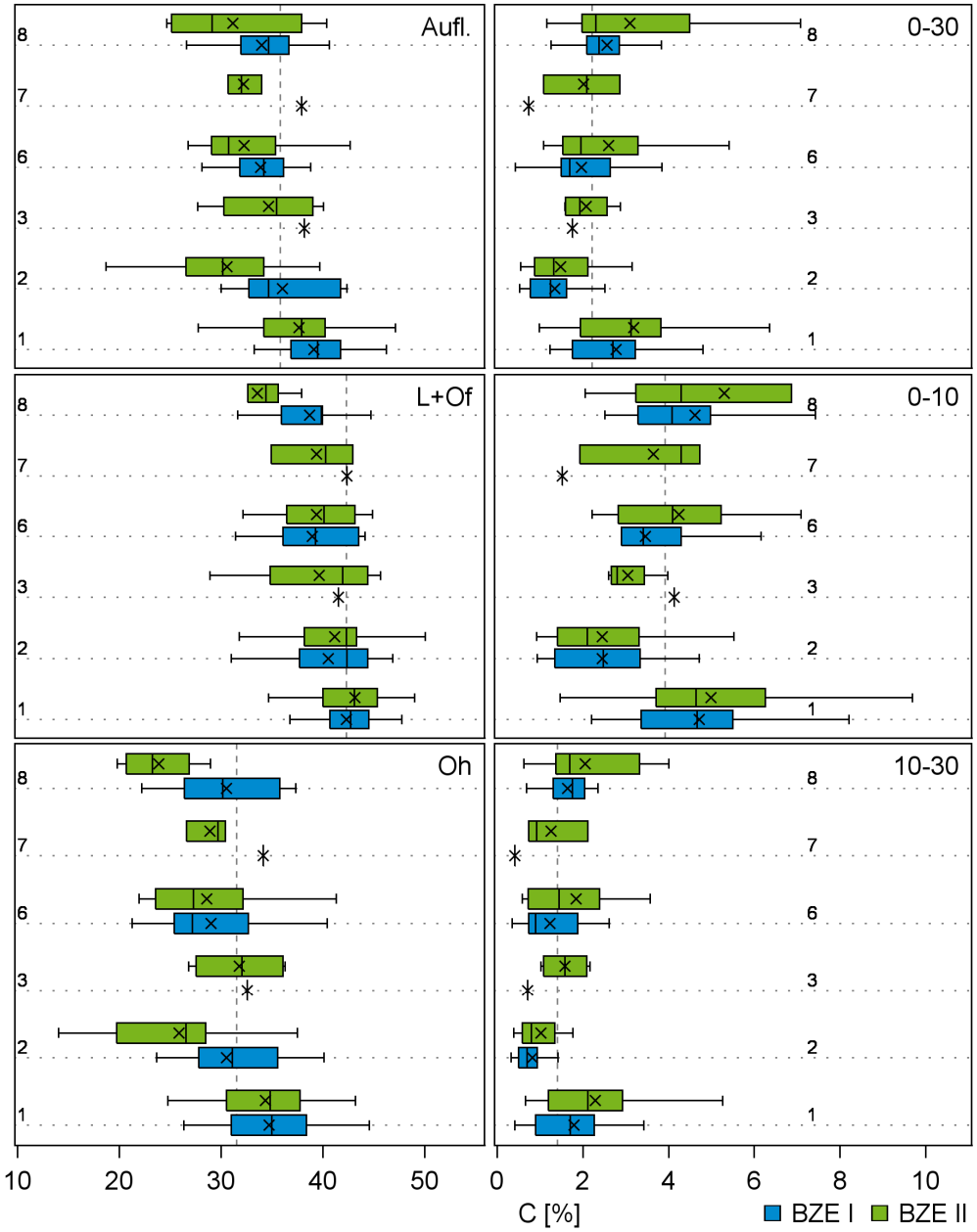

Abb. 61: Kohlenstoffkonzentration gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände.

4.4.3 Kohlenstoffvorrat

Für die gesamte Auflage (Abb. 62) ergaben sich bei C-Vorräten von 15,8 ± 16,6 t ha^{-1} bis 40,6 ± 4,7 t ha^{-1} keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bestandestypen. Bei gesonderter Betrachtung des L+Of-Horizonts wurde ersichtlich, dass während der BZE I Unterschiede zwischen den Fichtenbeständen (1) mit 24,3 ± 6,8 t ha^{-1} zu den Kiefernbeständen (2) und den Laubbaumarten (8) mit 18,5 ± 4,6 t ha^{-1} und 12,4 ± 5,2 t ha^{-1} bestanden (ANOVA, $P < 0{,}001$). Bei der BZE II war dies nicht mehr der Fall. Grund dafür war eine deutliche Abnahme des C-Vorrates unter Fichtenbeständen auf 15,0 ± 5,7 t ha^{-1}. Die Entwicklung der Vorräte unterschied sich signifikant zwischen den Bestandestypen (ANOVA, $P < 0{,}05$). Im Oh-Horizont wurden bei Werten von 10,5 ± 10,0 t ha^{-1} bis 23,5 ± 3,4 t ha^{-1} ebenso wie im Mineralboden bei Werten von 55,6 ± 23,2 t ha^{-1} bis 76,0 ± 40,5 t ha^{-1} keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bestandestypen gefunden (Abb. 62). Allerdings zeigte sich der Trend, dass die sonstigen Laubbaumarten in der Auflage niedrige C-Vorräte aufwiesen, im Mineralboden dagegen hohe. Bei Einzeluntersuchung der Tiefenstufen 0-10 cm und 10-30 cm ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bestandestypen.

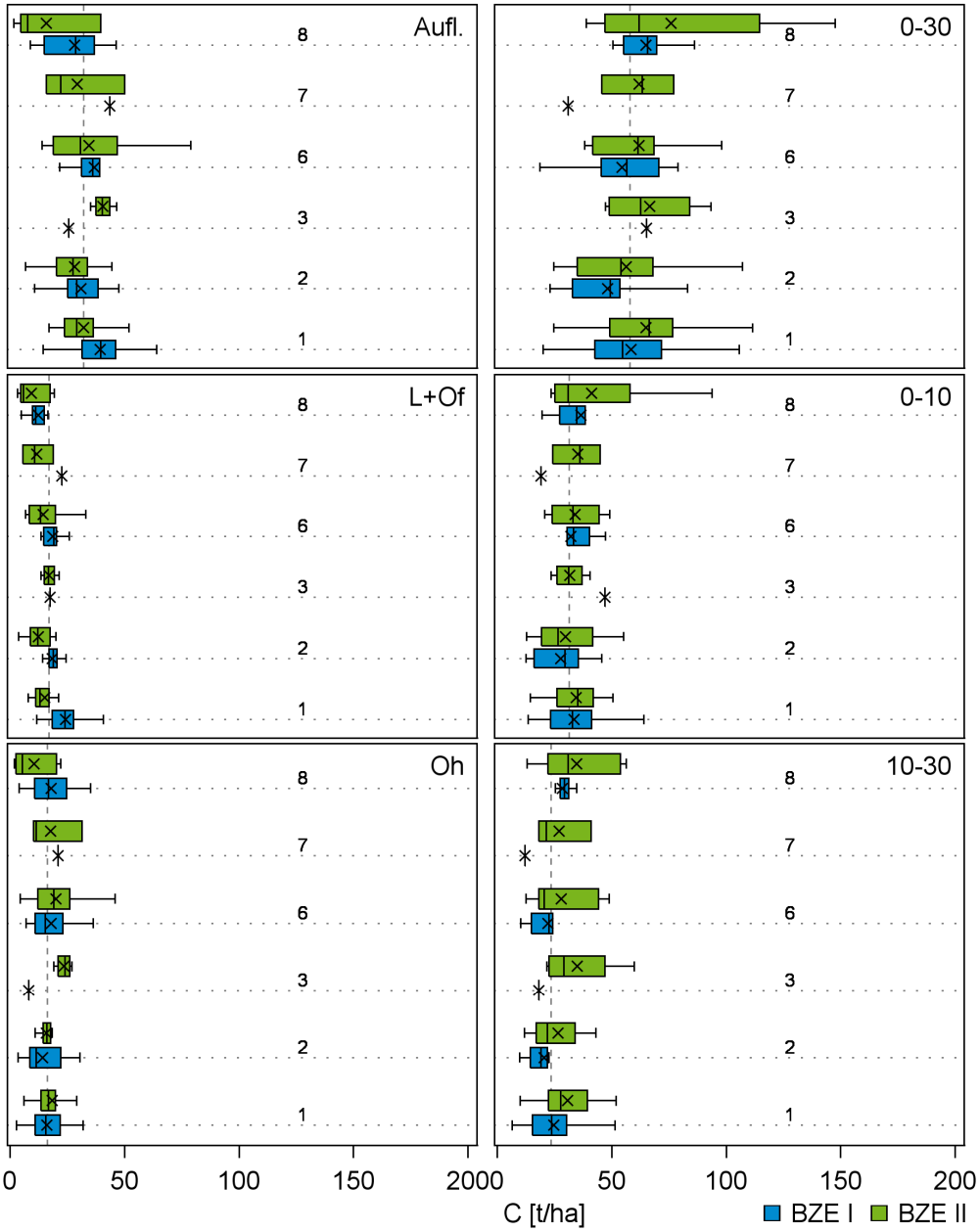

Abb. 62: Kohlenstoffvorräte gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände.

4.4.4 Stickstoffkonzentration

Die N-Konzentration in der organischen Auflage (Abb. 63) war in Fichtenbeständen (1) mit 1,71 ± 0,17 % deutlich höher als in Kiefernbeständen (2), laubholzreichen Nadelbeständen (6) oder sonstigen Laubbaumarten (8) mit BZE II-Werten von 1,16 ± 0,31 % bis 1,59 ± 0,25 % (Welch-ANOVA , $P < 0{,}001$). Dieses Muster trat über die gesamte Spanne der Bestandestypen sowohl im L+Of-Horizont mit BZE II-Werten von 1,39 ± 0,25 % bis 1,87 ± 0,21 % als auch im Oh-Horizont mit BZE II-Werten von 1,05 ± 0,35 % bis 1,61 ± 0,19 % auf. Im Mineralboden (Abb. 63) wiesen dagegen die sonstigen Laubbaumarten und die Fichtenbestände mit BZE II-Werten von 0,17 ± 0,14 % und 0,15 ± 0,05 % die höchsten N-Gehalte auf (ANOVA, $P < 0{,}001$). Die niedrigsten N-Gehalte hatten auch hier die Kiefernbestände mit 0,06 ± 0,03 %. Dieses Muster galt für beide Tiefenstufen. Die Wertespannen reichten dabei in der Tiefenstufe 0-10 cm von 0,09 ± 0,05 % bis 0,22 ± 0,07 % und in der Tiefenstufe 10-30 cm von 0,04 ± 0,02 % bis 0,11 ± 0,05 %.

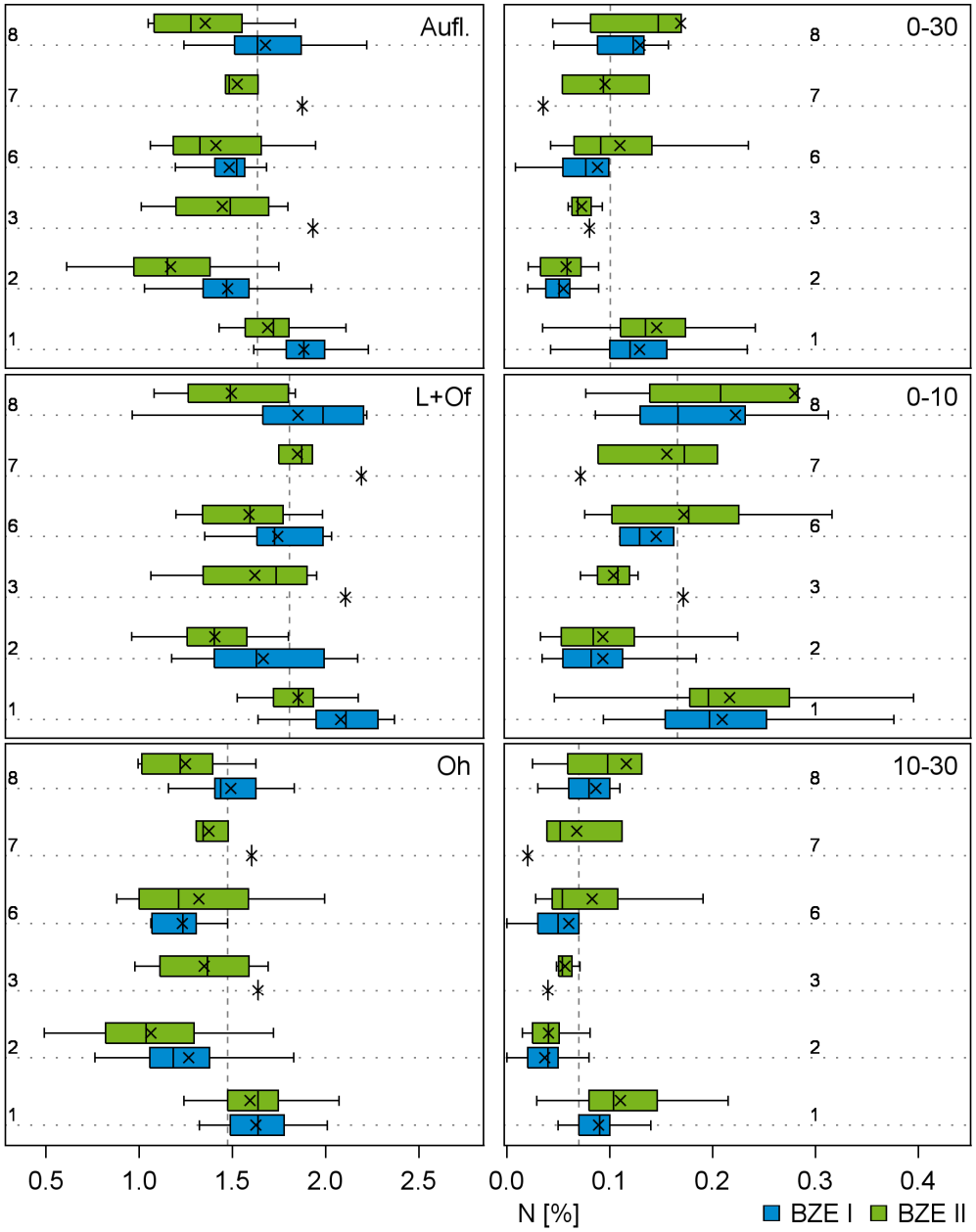

Abb. 63: Stickstoffkonzentration gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände.

4.4.5 Stickstoffvorrat

Die N-Vorräte der Auflage (Abb. 64) unterschieden sich signifikant. Fichtenbestände (1) hatten mit 1,5 ± 0,6 t ha^{-1} (BZE II) die höchsten Vorräte, Kiefernbestände (2) und die sonstigen Laubbaumarten (8) mit 1,1 ± 0,3 t ha^{-1} und 0,8 ± 0,9 t ha^{-1} die niedrigsten Vorräte. Die Unterschiede waren im L+Of-Horizont mit einer Spanne bei der BZE II von 0,4 ± 0,2 t ha^{-1} bis 0,6 ± 0,2 t ha^{-1} ausgeprägter als im Oh-Horizont, wo Vorratswerte im Bereich von 0,6 ± 0,5 t ha^{-1} bis 1,0 ± 0,2 t ha^{-1} vorkamen. Weiterhin traten im L+Of-Horizont auch Unterschiede in der Entwicklung der Vorräte zwischen den Inventuren mit einer deutlichen Abnahme der N-Vorräte unter Fichtenbeständen auf (ANOVA, $P < 0{,}01$). Im Mineralboden (Abb. 64) wiesen Fichtenbestände mit 3,1 ± 1,0 t ha^{-1} ebenso wie die sonstigen Laubbaumarten mit 4,1 ± 2,8 t ha^{-1} höhere N-Vorräte auf als Kiefernbestände mit 2,1 ± 0,8 t ha^{-1} (ANOVA, $P < 0{,}001$). Dieses Muster trat sowohl in der Tiefenstufe 0-10 cm bei BZE II-Werten von 1,1 ± 0,5 t ha^{-1} bis 2,1 ± 1,7 t ha^{-1} als auch in der Tiefenstufe 10-30 cm mit Werten von 1,0 ± 0,4 t ha^{-1} bis 1,9 ± 1,2 t ha^{-1} auf.

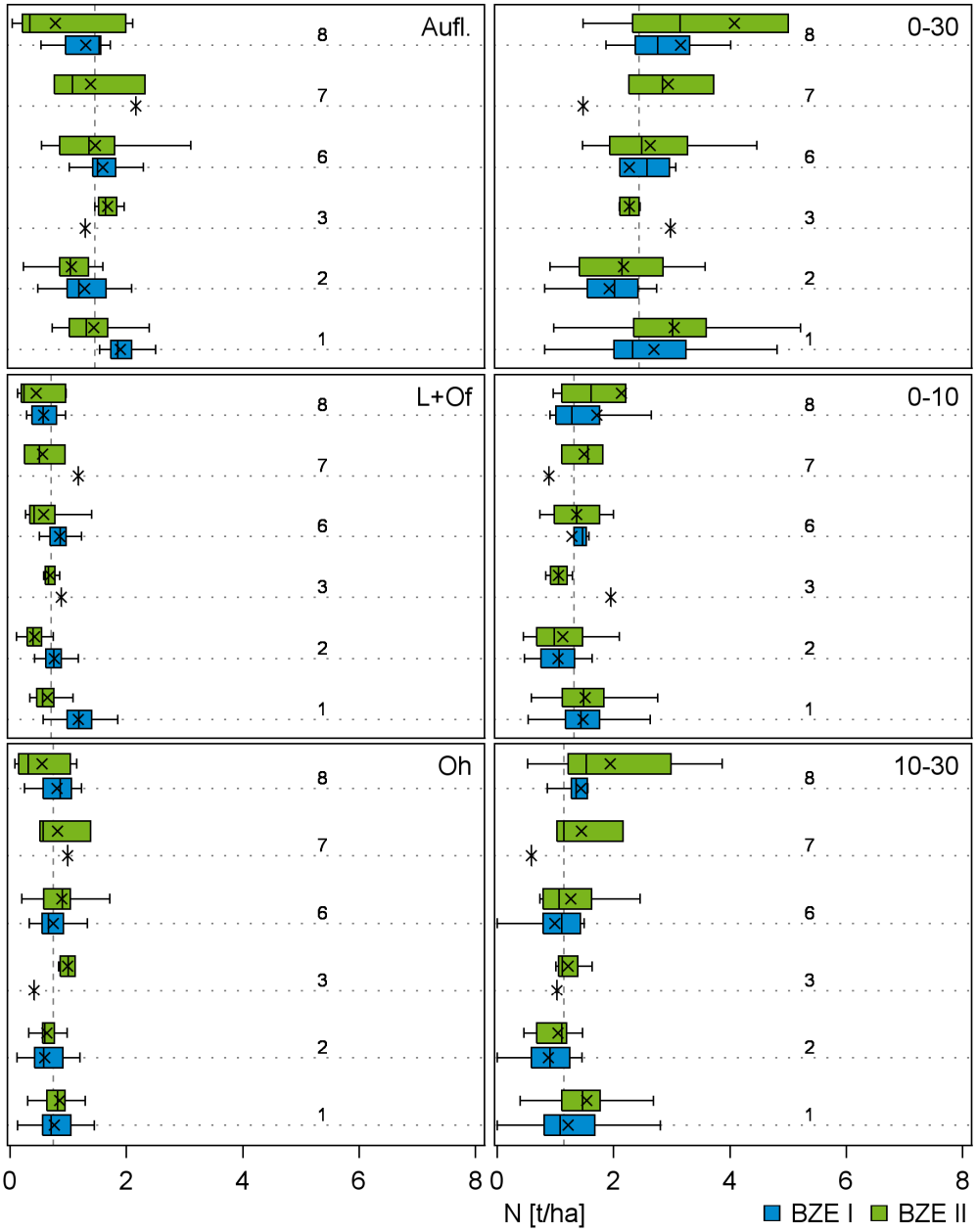

Abb. 64: Stickstoffvorräte gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände.

4.4.6 C/N-Verhältnis

In der Auflage von Kiefernbeständen (2) war das C/N-Verhältnis (Abb. 65) mit 27,2 ± 3,9 (BZE II) weiter als das der Fichtenbestände (1), der laubholzreichen Nadelbestände (6) und der sonstigen Laubbaumarten (8) mit BZE II-Werten von 22,2 ± 1,9, 23,1 ± 1,9 und 23,6 ± 6,3. Die Unterschiede zwischen den Bestandestypen waren in beiden Inventuren signifikant (Welch-ANOVA, $P < 0{,}05$, bzw. Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). Im L+Of-Horizont war das C/N-Verhältnis der Kiefernbestände mit BZE II-Werten von 30,1 ± 4.5 noch deutlich weiterer als bei den übrigen Bestandestypen mit C/N-Werten von bis 21,3 ± 1,3 und 25,1 ± 6,5 (Welch-ANOVA, $P < 0{,}001$). Hier kam es zu einer deutlichen Aufweitung des C/N-Verhältnisses zwischen den Inventuren, wobei die Änderung bei den sonstigen Laubbaumarten deutlich geringer ausfiel als bei den Kieferbeständen (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$). Auch im Oh-Horizont war das C/N-Verhältnis von Kiefernbeständen mit 25,3 ± 3,7 (BZE II) weiter als das der Fichtenbestände, der laubholzreichen Nadelbestände und der sonstigen Laubbaumarten mit BZE II-Werten von 21,5 ± 1,7, 21,9 ± 2,2 und 19,4 ± 2,5 (ANOVA, $P < 0{,}001$). Im Mineralboden zeigte die Verteilung der C/N-Werte die gleichen Muster wie in der Auflage, mit weiten Werten von 26,2 ± 5,0 unter den Kiefernbeständen und relativ engen Werten von 21,8 ± 3,8 unter den Fichtenbeständen (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}01$). Dies war auch bei getrennter Betrachtung der Tiefenstufen 0-10 cm mit Werten von 21,3 ± 5,3 bis 27,5 ± 4.7 und 10-30 cm mit Werten von 18,5 ± 0,7 bis 24.8 ± 5,6 der Fall.

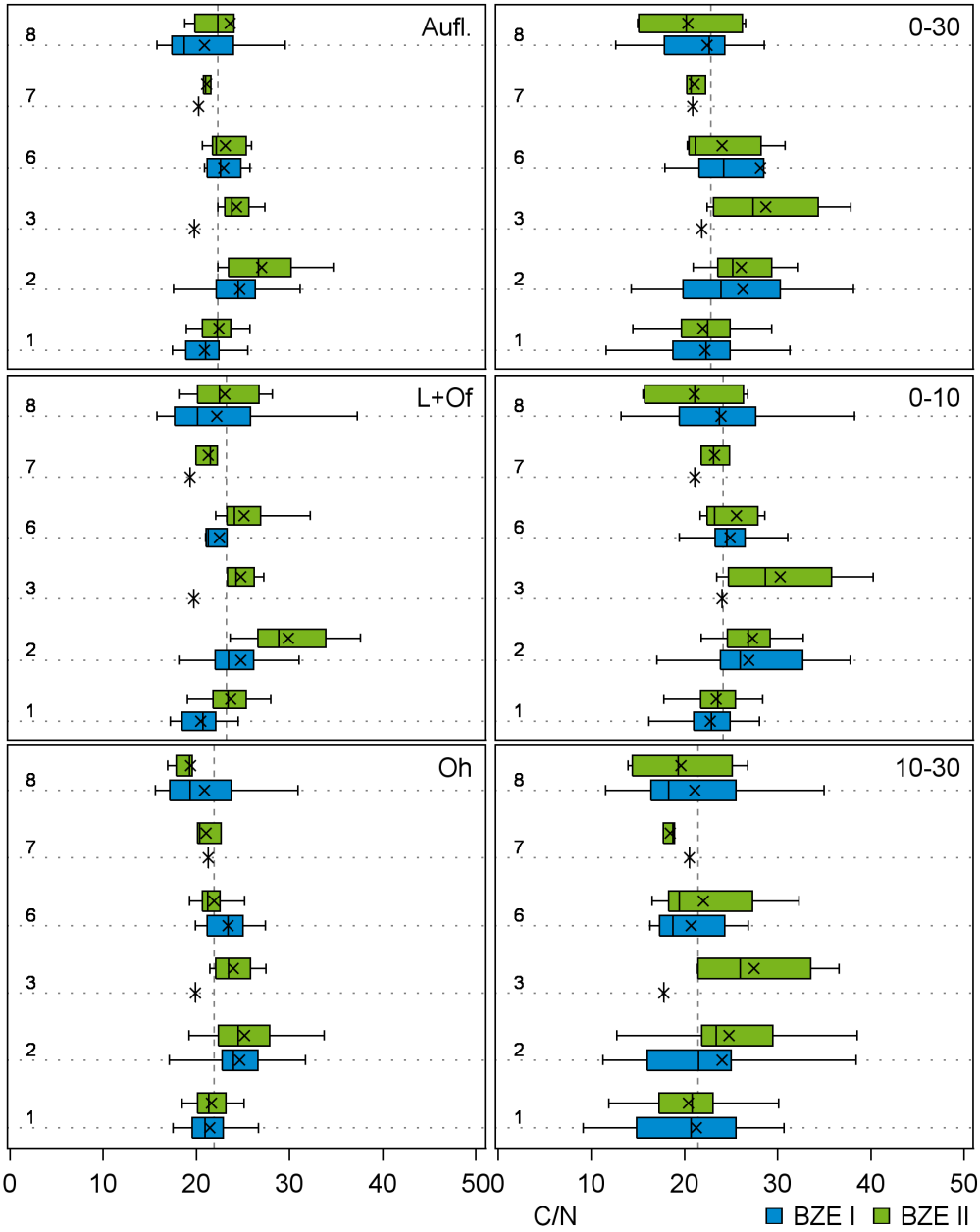

Abb. 65: C/N-Verhältnis gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände.

4.4.7 pH-Wert

Die pH(KCl)-Werte der Auflage (Abb. 66) in den untersuchten Bestandestypen waren zum Zeitpunkt der BZE I signifikant unterschiedlich (Welch-ANOVA, $P < 0{,}001$). Unterschiede gab es zwischen Fichten- (1) und Kiefernbeständen (2) sowie Fichtenbeständen (1) und den sonstigen Laubbaumarten (8). Bei der BZE I hatten die Fichtenbestände die niedrigsten pH(KCl)-Werte. Die höchsten pH(KCl)-Werte traten bei Kiefernbeständen auf. Bei der BZE II gab es keine signifikanten Unterschiede, da die pH(KCl)-Werte, insbesondere die der Fichtenbestände, von 2,9 ± 0,3 auf 3,4 ± 0,5 zugenommen haben. In den Kiefernbeständen gab es dagegen eine geringfügige Abnahme von 3,4 ± 0,4 auf 3,3 ± 0,3. Die Unterschiede in der Entwicklung zwischen den Inventuren sind signifikant (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). Die L+Of-Horizonte sowie die Oh-Horizont zeigten den gleichen Trend. Auffällig war im L+Of-Horizont ein mit Ausnahme der Kiefernbestände stärkerer Anstieg zwischen den Inventuren und eine Zunahme der Streuung innerhalb der Bestandestypen bei der BZE II. Die Unterschiede zwischen den Bestandestypen waren zu beiden Zeitpunkten signifikant (Welch-ANOVA, $P < 0{,}01$, bzw. Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). Die Kiefernwälder wiesen bei der BZE I mit 3,5 ± 0,3 die höchsten pH(KCl)-Werte auf, zum Zeitpunkt der BZE II waren es mit 3,3 ± 0,2 die niedrigsten. Die höchsten pH-Werte wurden während der BZE II mit 4.6 ± 0,9 bei den sonstigen Laubbaumarten gemessen. Auch bei den Fichtenbeständen gab es einen deutlichen Anstieg von 3,1 ± 0,4 auf 3,9 ± 0,9. Die Unterschiede in der Entwicklung des pH(KCl)-Wertes waren signifikant (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). Im Oh-Horizont gab es Unterschiede zwischen Bestandestypen bei den BZE I-Werten und in der Entwicklung der pH(KCl)-Werte zwischen den Inventuren. Diese basieren vor allem auf den Werten und deren Veränderung in den Fichten- und Kiefernbeständen mit einem Anstieg von 2,8 ± 0,2 auf 3,2 ± 0,5, bzw. einer Abnahme von 3,4 ± 0,6 auf 3,2 ± 0,3. Im Mineralboden (Abb. 66) waren die Unterschiede zwischen den Bestandestypen bei der BZE I signifikant (Welch-ANOVA, $P < 0{,}01$). Die Fichtenbestände hatten mit 3,2 ± 0,3 geringere pH(KCl)-Werte als die Kiefernbestände mit 3,6 ± 0,3. Bei der BZE II sind die Unterschiede noch deutlicher (Abb. 66, Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). Die Kiefernbestände wiesen mit 3,8 ± 0,3 deutlich höhere pH(KCl)-Werte im Mineralboden auf als die anderen Bestockungstypen mit Ausnahme der sonstigen Laubwälder. Insgesamt haben die pH(KCl)-Werte zugenommen (Abb. 66). Einen Unterschied in der Entwicklung der pH(KCl)-Werte gab es nicht (ANOVA, $P > 0{,}05$). Die Unterschiede zwischen den Bestandestypen waren sowohl in der Tiefenstufe 0-10 cm als auch in der Tiefenstufe 10-30 cm zu beiden Inventurzeitpunkten zu finden, mit niedrigsten Werten bei den sonstigen Nadelbaumarten (3) und Höchstwerten bei den sonstigen Laubbäumen (8). Die pH-Werte der BZE II lagen in der Tiefenstufe 0-10 cm zwischen 3,1 ± 0,3 und 3,9 ± 0,7. In der Tiefenstufe 10-30 cm lagen die BZE II-Werte zwischen 3,5 ± 0,4 und 4.1 ± 0,5.

Die Verteilung der pH(H_2O)-Werte zeigte ein gleiches Muster wie die der pH(KCl)-Werte mit Höchstwerten bei den sonstigen Laubbaumarten. Insgesamt waren die Werte etwas höher. In der Auflage reichten die BZE II-Werte von 3,8 ± 0,4 bis 4.9 ± 1,0. Im L+Of-Horizont nahmen die pH(H_2O)-Werte eine Spanne von 4.0 ± 0,2 bis 5,2 ± 0,8, im Oh-Horizont von 3,8 ± 0,3 bis 4.2 ± 0,5 ein. Im Mineralboden war der Kontrast der pH(H_2O)-Wert der sonstigen Laubbaumarten mit

4.7 ± 0,7 zu den übrigen Bestandestypen mit Werten zwischen 4.0 ± 0,1 und 4.3 ± 0,3 schärfer. In der Tiefenstufe 0-10 cm hatten die BZE II-Werte eine Spannweite von 3,9 ± 0,1 bis 4.7 ± 0,8, in der Tiefenstufe 10-30 cm von 4.0 ± 0,2 bis 4.7 ± 0,7.

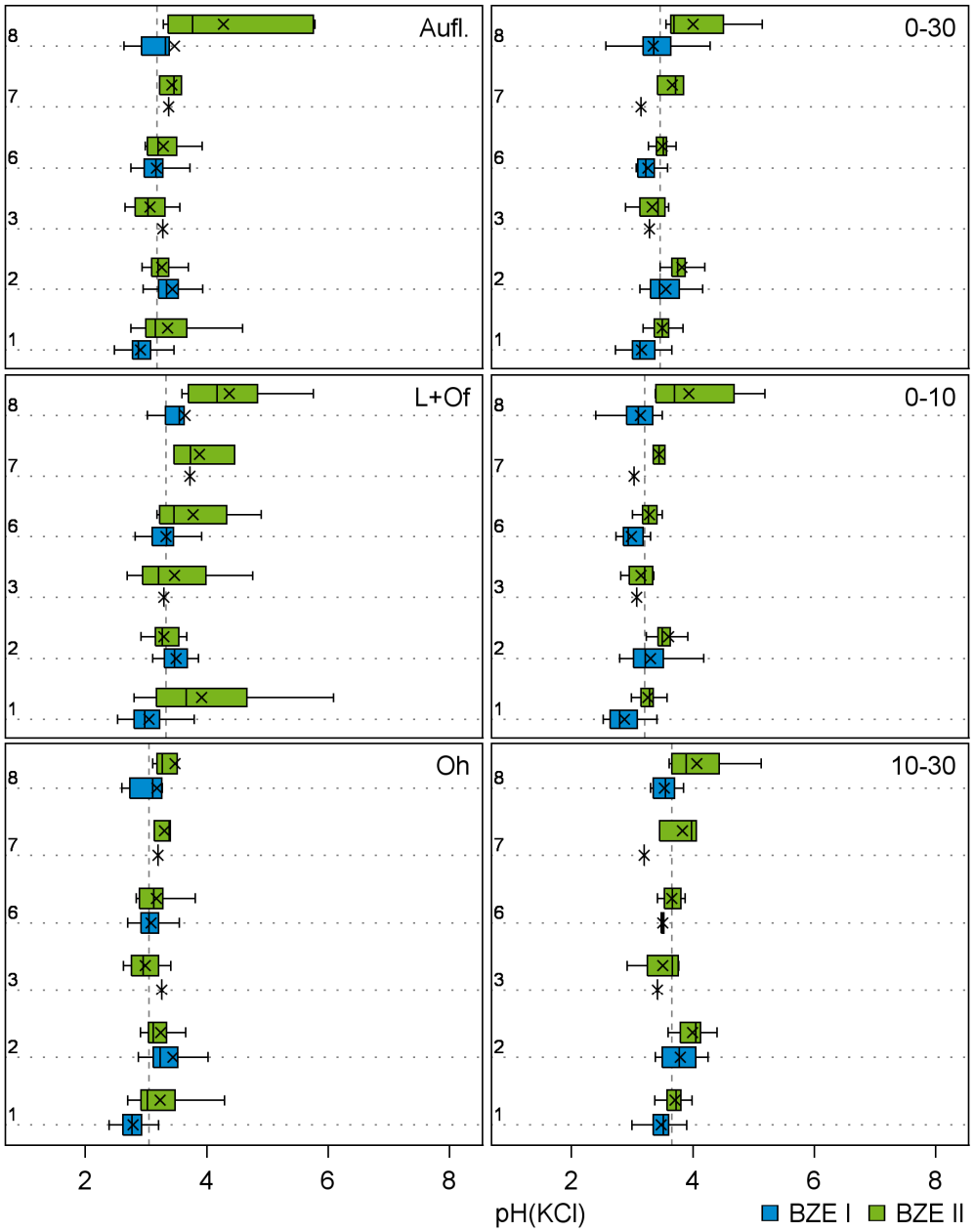

Abb. 66: pH(KCl)-Wert gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite Auflage, rechte Seite Mineralboden (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände.

4.4.8 Austauschkapazität und Basensättigung

Die höchste Austauschkapazität weisen Mineralböden unter Fichtenbeständen (1) mit 95,5 ± 27,0 $\mu mol_c\ g^{-1}$ und unter sonstigen Laubbaumarten (8) mit 105,9 ± 81,4 $\mu mol_c\ g^{-1}$ auf (Abb. 67). Die niedrigste findet sich in Böden unter Kiefernbeständen (2) mit 26,5 ± 15,0 $\mu mol_c\ g^{-1}$. Die Unterschiede sind signifikant (ANOVA, $P < 0{,}001$). Das Verteilungsmuster der Tiefenstufen 0-10 cm und der Tiefenstufe 10-30 cm gleicht dem des Gesamtbodens.

Die Basensättigung im Mineralboden (Abb. 67) der BZE I weist Unterschiede zwischen den Bestandestypen auf (Welch-ANOVA, $P < 0{,}001$). Die Kiefernbestände (2) mit 25,6 ± 11,2 % und sonstige Laubbaumarten (8) mit 27,4 ± 27,3 % haben gegenüber den Fichtenbeständen (1) mit 9,9 ± 3,7 % höhere Werte (Abb. 67). Bei der BZE II sind diese Unterschiede nicht mehr signifikant (Welch-ANOVA, $P > 0{,}1$), obwohl mit 39,3 ± 40,4 % die Basensättigung bei den sonstigen Laubbaumarten sehr viel höher ist als die der übrigen Bestandestypen mit Werten von 9,2 ± 5,4 % bis 13,8 ± 8,2 %. Die Unterschiede der Änderungsraten zwischen den Gruppen waren signifikant (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). Unter Kiefernbeständen gab es eine deutliche Abnahme der Basensättigung auf 13,8 ± 8,2 % (Abb. 67). In den beiden Tiefenstufen 0-10 cm und 10-30 cm findet sich der gleiche Trend wie bei 0-30 cm mit Werten zwischen 10,1 ± 5,0 % (nadelbaumreiche Mischwälder (6), BZE II) und 44.6 ± 39,1 % (sonstigen Laubbaumarten (8), BZE II) bei der Tiefenstufe 0-10 cm und Werten von 7,3 ± 3,1 % (nadelbaumreiche Mischwälder (6), BZE II) bis 36,9 ± 41,3 % (sonstigen Laubbaumarten (8), BZE II) bei der Tiefenstufe 10-30 cm. In beiden Tiefenstufen war der Trend zwischen den Inventuren gleich, mit einer Abnahme der Basensättigung unter Kiefernbestände (2) und einer Zunahme unter Fichtenbeständen (1).

Die gegenüber Fichtenbeständen höhere Basensättigung unter Kieferbeständen relativiert sich angesichts der deutlich niedrigeren Austauschkapazität der Böden unter den Kieferbeständen. Dagegen verschärft sich unter Berücksichtigung der hohen Austauschkapazität die niedrige Basensättigung unter den Fichtenbeständen.

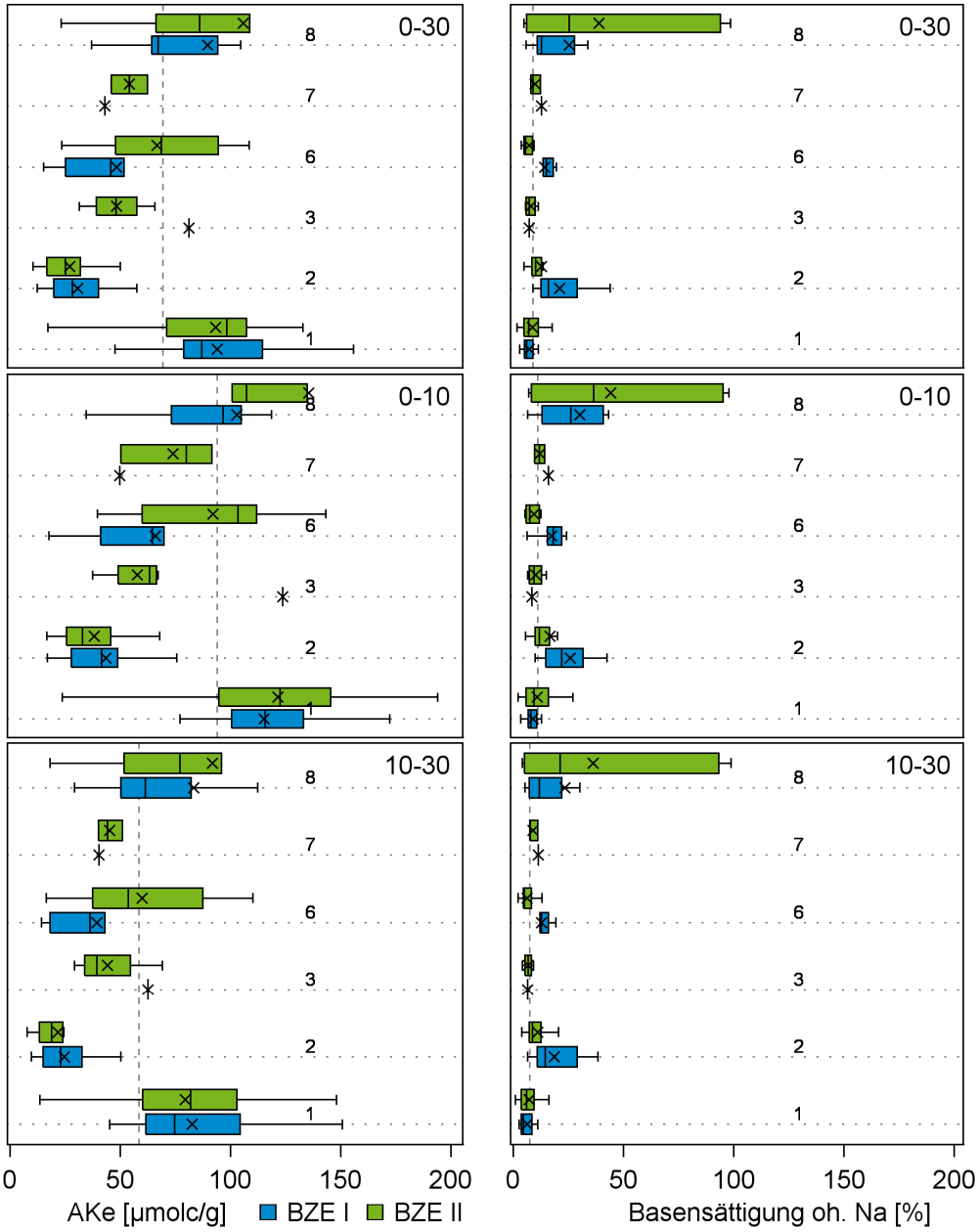

Abb. 67: Austauschkapazität (links) und Basensättigung ohne Natrium (rechts) des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm) gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder.

4.4.9 Calciumkonzentration

Die Konzentration an extrahierbarem Ca nahm in der Auflage zwischen den Inventuren stark zu (Abb. 68). Eine Ausnahme stellten die Kiefernbestände (2) dar, wo die Werte von 4.19 ± 3,37 mg g^{-1} auf 2,45 ± 1,02 mg g^{-1} abnahmen und sich damit signifikant von den sonstigen Laubbaumarten mit 10,47 ± 8,91 mg g^{-1} (BZE II) unterschieden (Welch-ANOVA, $P < 0{,}05$). Der Anstieg der Konzentration ist am auffälligsten bei den L+Of-Horizonten der Fichtenbestände (1) von 3,96 ± 3,34 mg g^{-1} auf 10,90 ± 10,17 mg g^{-1} und bei den sonstigen Laubbaumarten (8) von 7,51 ± 5,33 mg g^{-1} auf 11,90 ± 8,29 mg g^{-1}. Bei den Kiefernbeständen (2) kam es dagegen zu einer Abnahme der Ca-Konzentration von 4.40 ± 2,16 mg g^{-1} auf 3,42 ± 0,99 mg g^{-1}. Die Unterschiede zwischen den Bestandestypen in der Entwicklung der Ca-Konzentration zwischen den Inventuren waren ebenso signifikant (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$) wie zu den Inventurzeitpunkten (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$, bzw. Welch-ANOVA, $P < 0{,}01$). Im Oh-Horizont gab es keine große Zunahme zwischen den Inventuren aber dennoch signifikante Unterschiede im Trend (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). So nahmen die Konzentrationen in Kiefernbeständen von 4.29 ± 6,09 mg g^{-1} auf 1,90 ± 1,07 mg g^{-1} ab und in Fichtenbeständen von 1,65 ± 0,57 mg g^{-1} auf 3,40 ± 1,77 mg g^{-1} zu. Bei der Konzentration an austauschbarem Ca im Mineralboden (Abb. 68) gab es trotz deutlich höherer Werte bei den sonstigen Laubbaumarten keine signifikanten Unterschiede. Die BZE II-Werte reichten von 0,05 ± 0,03 mg g^{-1} bis 0,94 ± 1,47 mg g^{-1}. In der Tiefenstufe 0-10 cm hatten die BZE II-Werte eine Spanne von 0,09 ± 0,08 mg g^{-1} bis 1,35 ± 2,00 mg g^{-1}, in der Tiefenstufe 10-30 cm von 0,03 ± 0,03 mg g^{-1} bis 0,74 ± 1,18 mg g^{-1}.

4.4.10 Calciumvorrat

Die Vorräte an extrahierbarem Ca (Abb. 69) unterschieden sich in der organischen Auflage trotz hoher Werte bei den sonstigen Laubbaumarten (8) nicht. Allerdings gab es bei einer Abnahme in Kiefernbeständen (2) von 343 ± 237 kg ha^{-1} auf 230 ± 139 kg ha^{-1} und einer Zunahme in Fichtenbeständen (1) von 300 ± 239 kg ha^{-1} auf 523 ± 509 kg ha^{-1} signifikante Unterschiede in der Entwicklung (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$). Dies war sowohl im L+Of-Horizont bei BZE II-Werten von 105 ± 50 kg ha^{-1} bis 241 ± 236 kg ha^{-1} und im Oh-Horizont bei BZE II-Werten von 125 ± 113 kg ha^{-1} bis 205 ± 307 kg ha^{-1} der Fall. Im Oh-Horizont ergaben sich zusätzlich signifikante Unterschiede zum Zeitpunkt der BZE I (Welch-ANOVA, $P < 0{,}05$). Im Mineralboden gab es beim Vorrat an austauschbarem Ca (Abb. 69) mit niedrigsten Werten von 179 ± 115 kg ha^{-1} in Fichtenbeständen signifikante Unterschiede zum Zeitpunkt der BZE I (Welch-ANOVA, $P < 0{,}05$). Zum Zeitpunkt der BZE II ergaben sich trotz deutlich höherer Werte bei den sonstigen Laubbaumarten keine signifikanten Unterschiede. Die Differenzen zwischen den Bestandestypen beschränkten sich auf die obere Tiefenstufe 0-10 cm, wo die Werte der Fichtenbestände mit 94 ± 50 kg ha^{-1} (BZE I) deutlich unter denen der Kiefernbestände mit 178 ± 84 kg ha^{-1} und den sonstigen Laubbaumarten mit 508 ± 886 kg ha^{-1} lagen (Welch-ANOVA, $P < 0{,}01$). In der Tiefenstufe 10-30 cm gab es wegen der hohen Streuung keine signifikanten Unterschiede. Die BZE II-Werte hatten hier eine Spanne von 153 ± 62 kg ha^{-1} bis 1196 ± 1017 kg ha^{-1}.

Abb. 68: Calciumkonzentration gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite extrahierbares Calcium der Auflage, rechte Seite austauschbares Calcium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelmischbestände, 7 = nadelholzreiche Laubmischbestände, 8 = sonstige Laubbaumbestände.

Abb. 69: Calciumvorräte gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite extrahierbares Calcium der Auflage, rechte Seite austauschbares Calcium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände.

4.4.11 Magnesiumkonzentration

Die Mg-Konzentrationen stiegen zwischen den Inventuren stark an. Das war sowohl beim extrahierbaren Mg der organischen Auflage als auch beim austauschbaren Mg im Mineralboden der Fall (Abb. 70). Auffällig war allerdings entgegen dem allgemeinen Trend, eine Abnahme der Konzentration unter Kieferbeständen (2). In der organischen Auflage von Kiefernbeständen sank die Konzentration an extrahierbarem Mg von 1,06 ± 0,45 mg g^{-1} auf 0,73 ± 0,23 mg g^{-1}. Im Vergleich mit den anderen Bestandestypen waren dies die zum Zeitpunkt der BZE II die niedrigsten Werte (Welch-ANOVA, $P < 0{,}001$). Die höchsten BZE II-Werte hatten die Fichtenbestände (1) und die sonstigen Laubbäume (8) mit 2,65 ± 2,27 mg g^{-1} und 2,45 ± 1,95 mg g^{-1}. Die Unterschiede zwischen den Bestandestypen in der Entwicklung waren signifikant (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). Die Verteilung der Werte im L+Of-Horizont und im Oh-Horizont ähnelten sich, wobei im Oh-Horizont die Differenzen bei einer Spanne (BZE II) von 0,80 ± 0,30 mg g^{-1} bis 1,94 ± 1,12 mg g^{-1} weniger stark ausgebildet waren. Im L+Of-Horizont reichten die BZE II-Werte von 0,59 ± 0,16 mg g^{-1} bis 3,90 ± 4.40 mg g^{-1}. Die Verteilung der Konzentrationen an austauschbaren Mg im Mineralboden glich der der Auflage mit niedrigen Konzentrationen unter Kieferbeständen mit BZE II-Werten von < 0,01 mg g^{-1} und hohen Konzentrationen unter Fichtenbeständen mit 0,05 ± 0,05 mg g^{-1}, sowie bei den sonstigen Laubbaumarten 0,14 ± 0,24 mg g^{-1} (Welch-ANOVA, $P < 0{,}001$). In dem letztgenannten Bestandestyp trieben Ausreißer den Mittelwert stark nach oben. Die Unterschiede in der Entwicklung zwischen den Bestandestypen waren signifikant (Kruskal-Wallis-Test, $P < 0{,}001$). In der Tiefenstufe 0-10 cm reichten die Werte an austauschbarem Mg von < 0,01 mg g^{-1} bis 0,15 ± 0,23 mg g^{-1}, in der Tiefenstufe 10-30 cm von < 0,01 mg g^{-1} bis 0,13 ± 0,24 mg g^{-1}.

4.4.12 Magnesiumvorrat

Die Vorräte an extrahierbaren Mg in der organischen Auflage der untersuchten Bestandestypen (Abb. 71) unterscheiden sich zum Zeitpunkt der BZE I nicht signifikant (Kruskal-Wallis, $P > 0{,}1$). Im Gegensatz dazu sind bei der BZE II die Unterschiede signifikant (ANOVA, $P < 0{,}01$). Insbesondere die Fichtenbestände (1) wiesen mit 225,9 ± 213,7 kg ha^{-1} höhere Werte auf als die Kiefernbestände (2) mit 69,8 ± 33,4 kg ha^{-1}. Im L+Of-Horizont waren die Unterschiede bei den BZE II-Werten von 18,8 ± 9,7 kg ha^{-1} unter Kieferbeständen bis 139,1 ± 174.4 kg ha^{-1} unter Fichtenbeständen ausgeprägter (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}01$). Im Gegensatz zum L+Of-Horizont waren im Oh-Horizont die Differenzen mit BZE II-Werten von 51,0 ± 28,0 kg ha^{-1} bei Kieferbeständen bis 98,7 ± 59,0 kg ha^{-1} bei Fichtenbeständen nicht so groß. Die Unterschiede waren dennoch signifikant (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}05$). Auch bei den Vorräten an austauschbarem Mg im Mineralboden gab es nur zum Zeitpunkt der BZE II signifikante Unterschiede zwischen den Bestandestypen. Im Unterschied zu den übrigen Bestandestypen nahmen die Mg-Vorräte unter Kiefernbeständen (2) ab. Die Spanne (BZE II) reichte hier von 12 ± 6 kg ha^{-1} in Kiefernbeständen bis 91 ± 77 kg ha^{-1} bei den sonstigen Laubbaumarten (8). Dieser Trend zeigte sich sowohl in der Tiefenstufe 0-10 cm als auch in der Tiefenstufe 10-30 cm.

Abb. 70: Magnesiumkonzentration gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite extrahierbares Magnesium der Auflage, rechte Seite austauschbares Magnesium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelmischbestände, 7 = nadelholzreiche Laubmischbestände, 8 = sonstige Laubbaumbestände.

Abb. 71: Magnesiumvorräte gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite extrahierbares Magnesium der Auflage, rechte Seite austauschbares Magnesium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände.

4.4.13 Kaliumkonzentration

In der organischen Auflage unterschied sich in den Kiefern- (2) und Fichtenbeständen (1) zu beiden Inventurzeitpunkten die Konzentration an extrahierbarem K (Abb. 72). Zur BZE II hin kam es zu einem Anstieg der K-Konzentration bei den laubbaumreichen Nadelmischbeständen (6) und den sonstigen Laubbaumarten (8) von 0,99 ± 0,45 und 1,20 ± 0,54 mg g^{-1} auf 1,54 ± 0,80 und 1,78 ± 0,59 mg g^{-1}, während die Konzentration in der Auflage der Kiefernbestände von 0,93 ± 0,18 auf 0,74 ± 0,17 mg g^{-1} sank. Die Unterschiede in der Entwicklung der K-Vorräte waren signifikant (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}01$). Auch bei getrennter Betrachtung der Auflagehorizonte L+Of und Oh fanden sich signifikante Unterschiede, welche bei der BZE II ausgeprägter waren. Im L+Of-Horizont waren die K-Konzentrationen der Kiefernbestände (2) und der sonstigen Nadelbaumarten (3) mit BZE II-Werten von 0,78 ± 0,18 und 0,83 ± 0,32 mg g^{-1} niedriger als die der übrigen Bestandestypen mit Werten von 1,31 ± 0,34 bis 1,86 ± 0,56 mg g^{-1}. Die K-Konzentration bei den sonstigen Laubbaumarten stieg zwischen den Inventuren deutlich an. Auch im Oh-Horizont war dies bei BZE II-Werten von 0,71 ± 0,17 bis 1,64 ± 1,03 mg g^{-1} der Fall. Im Mineralboden lagen zu beiden Inventurzeitpunkten die Werte der austauschbaren K-Ionen bei den sonstigen Laubbaumarten und den Fichtenbeständen deutlich über denen der Kiefernbestände. Die Spanne (BZE II) reichte von 0,02 ± 0,01 bis 0,09 ± 0,07 mg g^{-1} (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). Dasselbe Muster ergab sich auch bei getrennter Betrachtung der beiden Tiefenstufen 0-10 cm und 10-30 cm. In der Tiefenstufe 0-10 cm reichten die Werte von 0,02 ± 0,01 bis 0,13 ± 0,12 mg g^{-1}. In der Tiefenstufe 10-30 cm nahmen die Werte eine Spanne von 0,01 ± 0,01 bis 0,06 ± 0,04 mg g^{-1} ein.

4.4.14 Kaliumvorrat

Die K-Vorräte der organischen Auflage (Abb. 73) unterschieden sich zu beiden Inventurzeitpunkten signifikant zwischen den Bestandestypen (ANOVA, $P < 0{,}05$, bzw. Welch-ANOVA, $P < 0{,}001$). Die Vorräte der Kiefernbestände (2) lagen mit 65,8 ± 19,2 kg ha^{-1} deutlich unter denen der übrigen Bestandestypen mit BZE II-Werten von 112,8 ± 52,6 bis 143,3 ± 61,3 kg ha^{-1} mit Ausnahme der sonstigen Laubbaumarten (8) mit 85,6 ± 89,5 kg ha^{-1}. Dabei glichen sich die Verteilungsmuster im L+Of-Horizont mit BZE II-Werten von 23,7 ± 10,1 bis 46,7 ± 24.5 kg ha^{-1} und im Oh-Horizont mit BZE II-Werten von 42,1 ± 13,2 bis 96,7 ± 45,8 kg ha^{-1}. Während es zum Zeitpunkt der BZE I im Mineralboden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bestandestypen gab, waren zum Zeitpunkt der BZE II die K-Vorräte der sonstigen Laubbaumarten mit 218,0 ± 172,0 kg ha^{-1} höher als die der übrigen Bestandestypen mit Werten von 63,8 ± 23,7 bis 94.3 ± 51,6 kg ha^{-1} (Kruskal-Wallis, $P < 0{,}001$). Relativ hohe BZE II-Werte erreichten auch noch die nadelholzreichen Laubbaumbestände (7) mit 147.9 ± 12,6 kg ha^{-1}. Die Verteilungsmuster der Tiefenstufen 0-10 cm mit BZE II-Werten von 27.6 ± 11,0 bis 105,4 ± 94.0 kg ha^{-1} und 10-30 cm mit BZE II-Werten von 36,1 ± 14.0 bis 112,6 ± 84.2 kg ha^{-1} glichen sich.

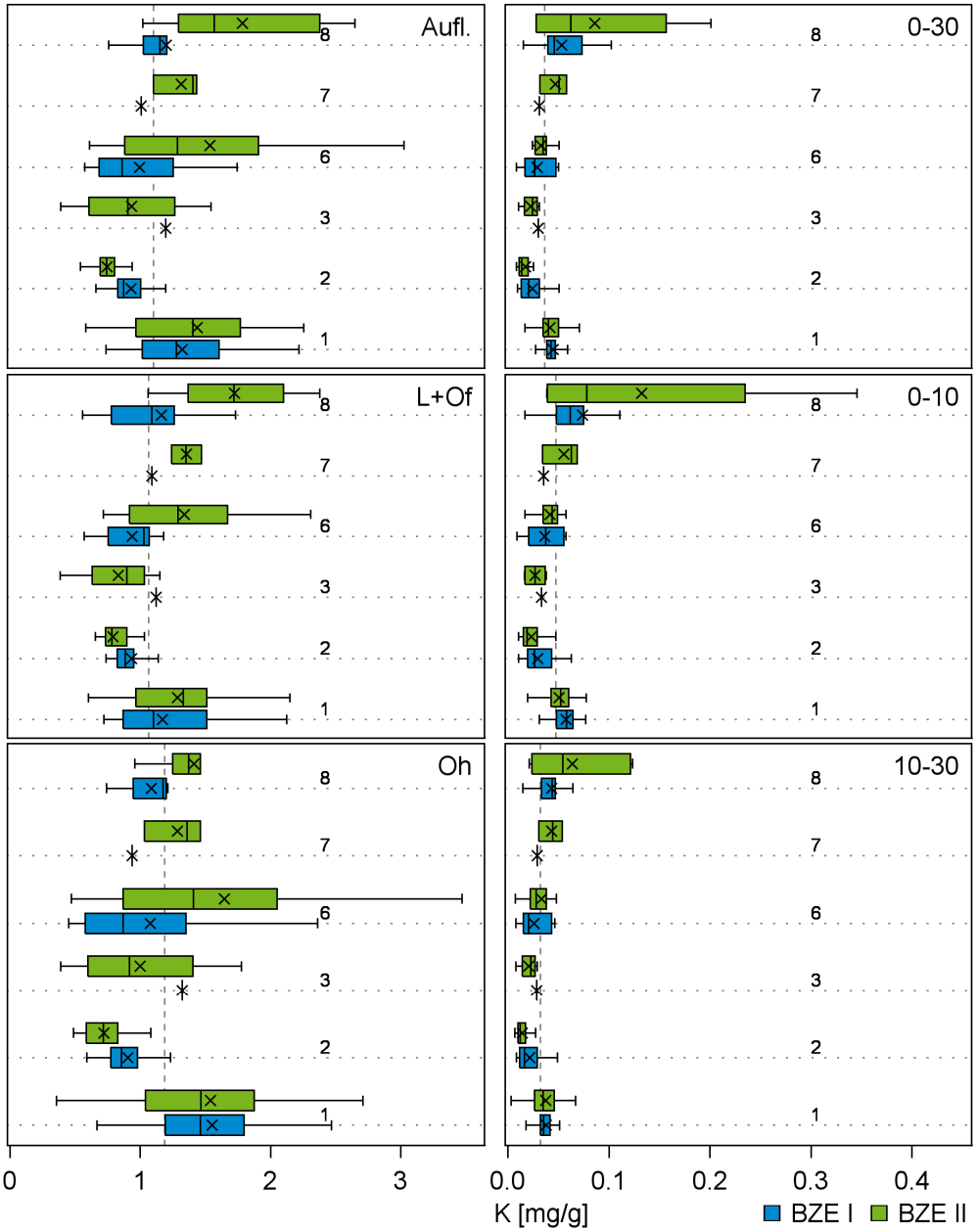

Abb. 72: Kaliumkonzentration gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite extrahierbares Kalium der Auflage, rechte Seite austauschbares Kalium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelmischbestände, 7 = nadelholzreiche Laubmischbestände, 8 = sonstige Laubbaumbestände.

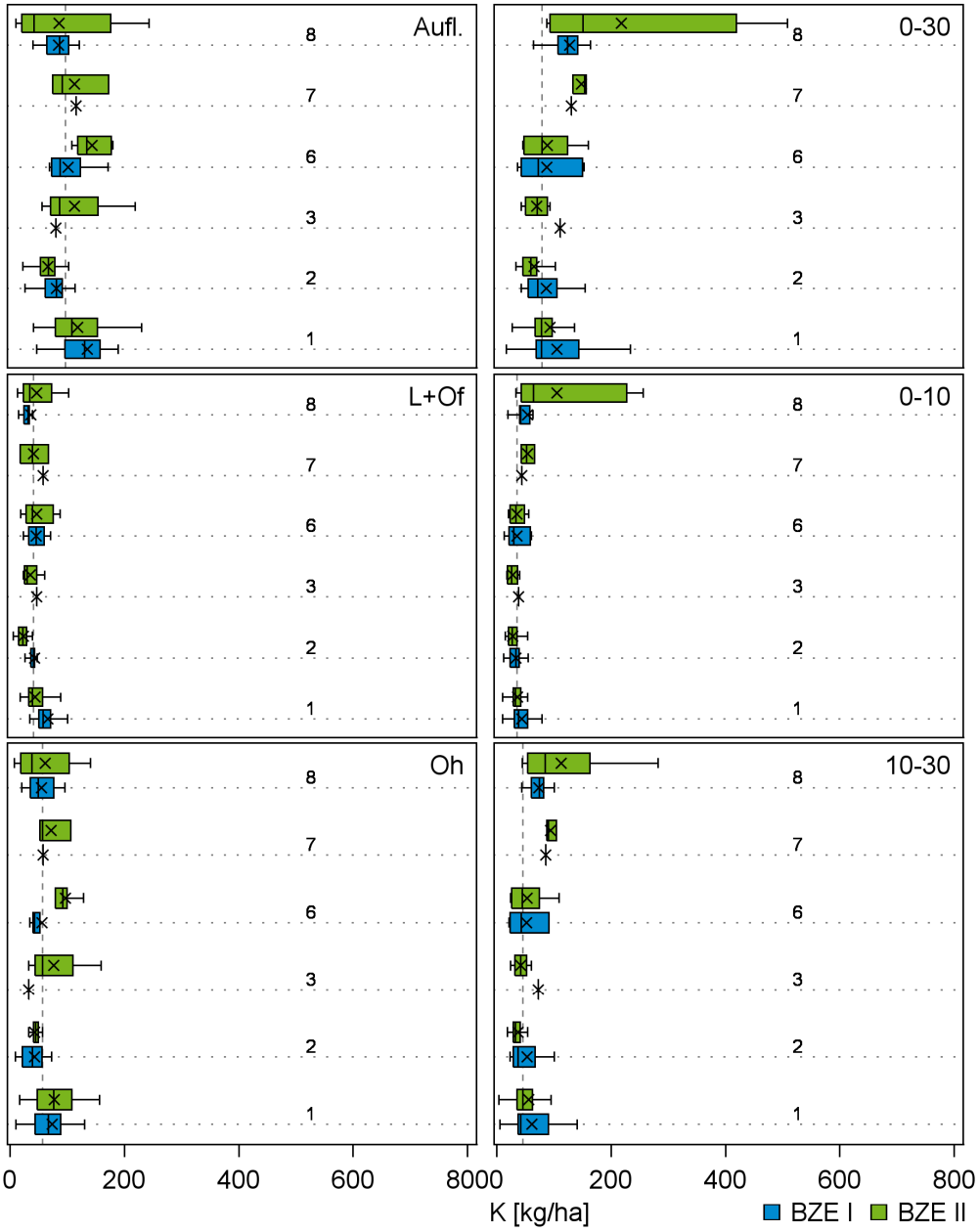

Abb. 73: Kaliumvorräte gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, linke Seite extrahierbares Kalium der Auflage, rechte Seite austauschbares Kalium des Mineralbodens (in den Tiefenstufen 0-30 cm, 0-10 cm und 10-30 cm), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände.

4.4.15 Phosphorkonzentration

Die P-Konzentrationen in der Auflage (Abb. 74) unterschieden sich zwischen den Bestandestypen. Signifikante Unterschiede gab es sowohl bei der BZE I als auch bei der BZE II (Welch-ANOVA, $P < 0{,}001$, bzw. ANOVA, $P < 0{,}001$). Die niedrigsten BZE II-Konzentrationen kamen in der Auflage der Kiefernbestände (2) mit $0{,}64 \pm 0{,}18$ mg g^{-1}, die höchsten in der Auflage der Fichtenbestände (1) und der sonstigen Laubbaumarten (8) mit $0{,}98 \pm 0{,}14$ mg g^{-1} und $1{,}06 \pm 0{,}47$ mg g^{-1} vor. Zwischen den Inventuren sank die P-Konzentration in den Kiefernbeständen, die Unterschiede zwischen den Bestandestypen in der Entwicklung waren jedoch nicht signifikant (Kruskal-Wallis, $P > 0{,}1$). Die Verteilung der P-Konzentrationen zeigte in beiden Auflagehorizonten mit BZE II-Werten von $0{,}68 \pm 0{,}13$ bis $1{,}02 \pm 0{,}41$ mg g^{-1} im L+Of-Horizont und BZE II-Werten von $0{,}63 \pm 0{,}21$ bis $1{,}00 \pm 0{,}57$ mg g^{-1} im Oh-Horizont ein ähnliches Muster. In beiden Horizonten unterschieden sich die Fichten- und Kiefernbestände zu beiden Inventurzeitpunkten. Im Oh-Horizont gab es darüber hinaus signifikante Unterschiede in der Entwicklung der P-Konzentration zwischen den Inventuren (Welch-ANOVA, $P < 0{,}01$). Diese sind vor allem durch die Senkung der P-Konzentrationen in den Kiefernbeständen von $0{,}76 \pm 0{,}16$ auf $0{,}63 \pm 0{,}21$ mg g^{-1} begründet.

4.4.16 Phosphorvorrat

Die Auflage der Fichtenbestände (1) enthielt zum Zeitpunkt der BZE I signifikant höhere P-Vorräte (Abb. 74) als die Auflage der Kiefernbestände (2) oder der sonstigen Laubbaumarten (8) (ANOVA, $P < 0{,}05$). Zum Zeitpunkt der BZE II waren die Unterschiede mit Werten zwischen $47.7 \pm 43{,}0$ und 84.5 ± 44.5 kg ha^{-1} weniger stark ausgeprägt. Insgesamt nahmen die P-Vorräte in der Auflage zwischen den Inventuren ab. Unterschiede zwischen den Bestandestypen traten dabei nicht auf (Kruskal-Wallis, $P > 0{,}1$). Die P-Vorräte nahmen vor allem im L+Of-Horizont ab. Besonders in den Fichten- und Kiefernbeständen zeigte sich im Vergleich zu den anderen Bestandestypen (ANOVA, $P = 0{,}05$) eine starke Abnahme von $63{,}3 \pm 20{,}0$ auf $34.4 \pm 12{,}6$ kg ha^{-1} und von $41{,}6 \pm 10{,}9$ auf $20{,}9 \pm 8{,}5$ kg ha^{-1}. Im Oh-Horizont ergaben sich bei BZE II-Werten zwischen $35{,}0 \pm 26{,}0$ und $53{,}1 \pm 34.1$ kg ha^{-1} keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bestandestypen.

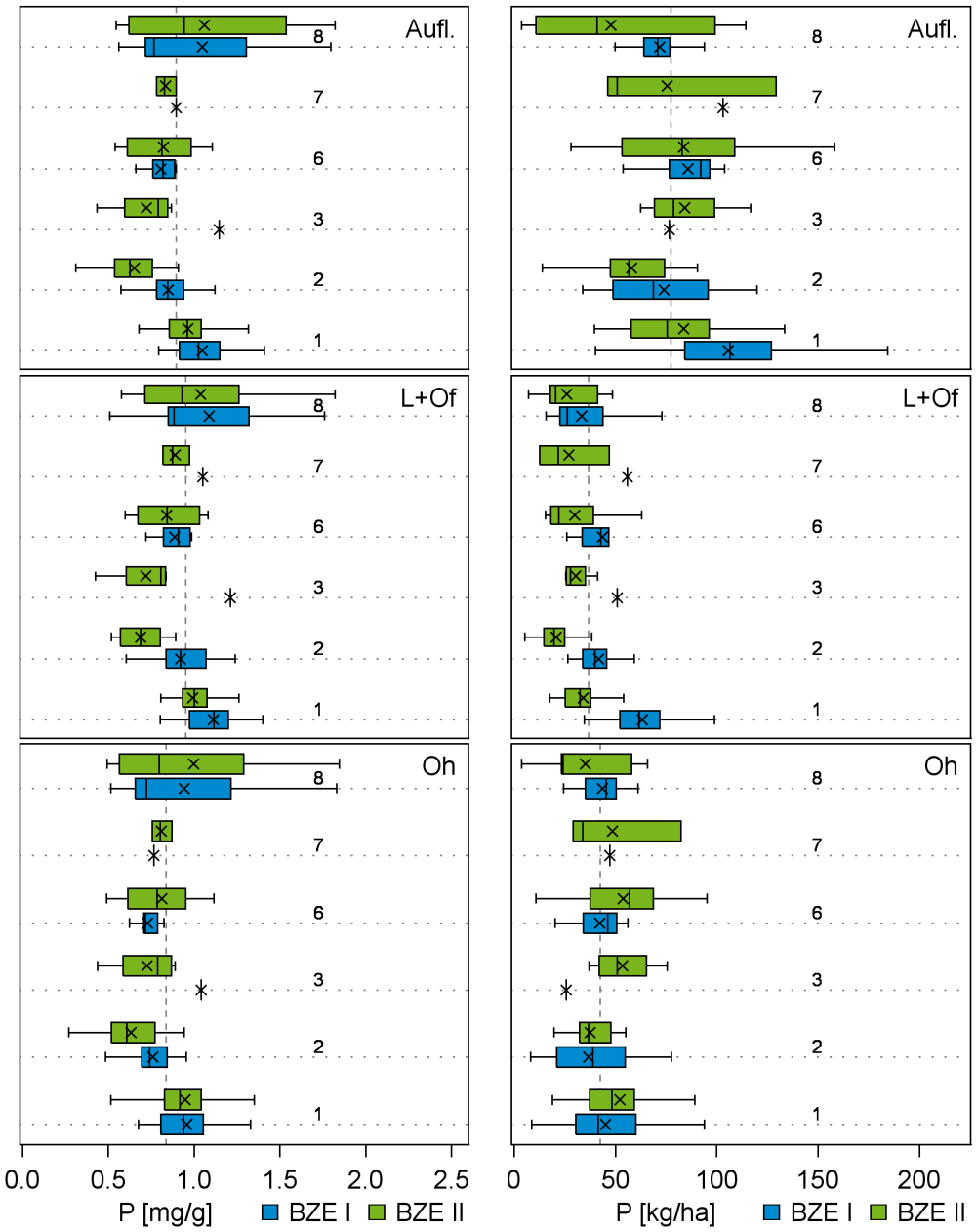

Abb. 74: Extrahierbarer Phosphor gruppiert nach Bestandestyp und Inventur, Phosphorkonzentration der Auflage (links) und Phosphorvorräte der Auflage (rechts), mit Auflage = gesamte Auflage, 1 = Fichtenbestände, 2 = Kiefernbestände, 3 = sonstige Nadelbaumbestände, 6 = laubholzreiche Nadelwälder, 7 = nadelholzreiche Laubwälder, 8 = sonstige Laubbaumbestände.

4.4.17 Fazit zum Einfluss der Bestockungsform auf die Bodenchemie

Der Vorrat der organischen Auflage unterschied sich zwischen den Bestandestypen nur im L+Of-Horizont zum Zeitpunkt der BZE I. Hier waren unter Fichtenbeständen höhere Vorräte zu finden. Allerdings gab es unter Fichtenbeständen auch eine deutliche Abnahme zwischen den Inventuren. In der organischen Auflage war die C-Konzentration unter Fichtenbeständen höher als unter Kiefernbeständen und den sonstigen Laubbaumarten. Im Mineralboden traten unter Kiefernbeständen die niedrigsten und unter Fichtenbeständen sowie unter den sonstigen Laubbaumarten die höchsten C-Konzentrationen auf. Die C-Vorräte des L+Of-Horizonts waren zum Zeitpunkt der BZE I unter Fichtenbeständen höher als unter Kieferbeständen. Unter Fichte gab es im L+Of-Horizont aber auch eine deutliche Abnahme der C-Vorräte zwischen den Inventuren. Im Mineralboden und im Oh-Horizont ergaben sich keine Unterschiede der C-Vorräte zwischen den Bestandestypen. Die N-Konzentration war in der Auflage von Fichtenbeständen höher als in der Auflage der anderen Bestandestypen. Im Mineralboden traten unter Kiefernbeständen die niedrigsten N-Konzentrationen auf; die höchsten dagegen unter Fichtenbeständen und bei den sonstigen Laubbaumarten. Die N-Vorräte der organischen Auflage waren unter Fichtenbestände höher als unter Kiefern- und sonstigen Laubbaumbeständen. Im L+Of-Horizont nahmen unter Fichtenbeständen die N-Vorräte ab. Im Mineralboden traten unter Kiefernbeständen deutlich niedrigere N-Vorräte auf als unter Fichten- und sonstigen Laubbaumbeständen. Die weitesten C/N-Verhältnisse traten sowohl in der Auflage als auch im Mineralboden unter Kiefernbeständen auf. Weiterhin gab es zwischen den Inventuren unter Kiefernbeständen eine deutliche Weitung des C/N-Verhältnisses.

Die pH-Werte der organischen Auflage stiegen unter Fichtenbeständen an. Unter Kiefernbestände kam es dagegen insbesondere im Oh-Horizont zu einer Abnahme der pH-Werte. Demzufolge waren zum Zeitpunkt der BZE II, die bei der BZE I festgestellten Unterschiede nicht mehr vorhanden. Im Mineralboden waren die pH-Werte zu beiden Inventurzeitpunkten unter Kiefernbeständen am höchsten. Kiefernbestände stocken auf Böden mit niedriger Austauschkapazität. Hier kam es zwischen den Inventuren zu einer Abnahme der Basensättigung. Insgesamt ist unter Fichtenbeständen die Basensättigung bei einer höheren Austauschkapazität niedriger als in Kiefernbeständen. Unter Kiefernbeständen nahmen die Ca-Konzentrationen und Vorräte der Auflage ab, während bei den übrigen Bestandestypen eine Zunahme festgestellt wurde. Auch die Unterschiede in den Ca-Vorräten, die zum Zeitpunkt der BZE I mit den niedrigsten Vorräten unter Fichtebeständen auffällig waren, wurden zur BZE II hin ausgeglichen. Unter Kiefernbeständen sank die Mg-Konzentration der organischen Auflage , während sie in den übrigen Bestandestypen anstieg. Bei der BZE II fanden sich in den Kiefernbeständen sowohl im Mineralboden als auch in der organischen Auflage die niedrigsten Mg-Konzentrationen und -vorräte. Auch bei der K-Konzentration kam es unter Kiefernbeständen zu einer Abnahme während bei den sonstigen Laubbaumarten die Konzentration anstieg. Zum Zeitpunkt der BZE II waren die Kaliumkonzentrationen der organischen Auflage unter Kiefern- und sonstigen Nadelbaumarten niedriger als in den anderen Bestandestypen. Im Mineralboden wiesen Kiefernbestände ebenfalls die niedrigsten K-Konzentrationen auf. Die P-Konzentration der

organischen Auflage nahm unter Kiefernbestände insbesondere im Oh-Horizont ab. Hier fanden sich deutlich niedrigere P-Konzentrationen als bei den sonstigen Laubbaumarten und Fichtenbeständen.

5 Bewertung der Zustandseigenschaften der Standorte in den Testgebieten

5.1 Vergleich der Zustandseigenschaften mit den Stammeigenschaften

Eine Bewertung der Zustandseigenschaften eines Standortes kann nur erfolgen, wenn diese mit den Stammeigenschaften in Beziehung gesetzt werden. Die Stammeigenschaften spiegeln sich in der Standortsform wider, die sich unabhängig von ihrer geographischen Verbreitung definiert. Aufgrund der Zusammensetzung aus Lokalboden-, Wasserhaushalt- und Reliefform sind unter Beachtung des Klimas Aussagen über die forstliche Eignung möglich (Schulze und Kopp 1995). Die Zustandseigenschaften eines Standortes sind jedoch durch anthropogene Stoffeinwirkungen und oft auch durch Jahrhunderte währende wirtschaftliche Nutzung nachhaltig verändert worden, so dass Standortszustand und Potential zumeist nicht mehr übereinstimmen. Die Zusammenfassung einzelner Standortsformen zu Standortsformengruppen basiert auf ökologisch ähnlich wirkenden Standortsmerkmalen, die ein gleichartiges waldbauliches Handeln hinsichtlich Baumartenwahl und Bestandesbehandlung erfordern und vergleichbare Wuchsleistungen erwarten lassen. Um die Abweichungen der Zustandseigenschaften von den Stammeigenschaften eines Standortes bewerten zu können, wurden für jedes Testgebiet die Lokalbodenformen und die Standortsformengruppen in Abhängigkeit vom Bestand in einer Auswertungseinheit betrachtet. Das heißt: In den Ausführungen der nachfolgenden Kapitel ist eine Auswertungseinheit als Kombination aus Lokalbodenform (LF) + Standortsformengruppe (SFG) + Bestand (BT) definiert.

Als wesentliches Merkmal prägt die Humusform die Zustandseigenschaften des Oberbodens. In der Humusform der Standortserkundung werden verwandte Zustandsformen der humusreichen Oberbodenhorizonte, besonders der Humusdecke erfasst und nach forstökologischen Gesichtspunkten in bestimmte Nährkraft- und Feuchtestufen gegliedert (Schulze und Kopp 1995). Dabei deckt die Stammbodenform durch ihre Integration des Feuchteregimes (Klima, Grund- und Stauwassereinfluss) größere Unterschiede im Humusvorrat ab.

Es ist zu beachten, dass sich die Humusform der Standortserkundung wesentlich von der morphologischen Humusform der organischen Auflage unterscheidet. So werden durch den im Allgemeinen gebräuchlichen Begriff der (morphologischen) Humusform Ausprägungen der Humushorizonte hinsichtlich ihrer Mächtigkeit und weiterer im Feld ansprechbarer Merkmale klassifiziert. Dagegen steht die Humusform der Standortserkundung als Bezeichnung für eine „Oberbodenzustandsklasse“. Die Humusmorphologie wird hier nicht näher betrachtet, sondern eine Einstufung nach definierten Werten zu Stickstoff-/Kohlenstoffparametern und Basensättigungen bzw. pH-Werten vorgenommen. Der so (durch die Humusform der Standortserkundung) charakterisierte Oberbodenzustand wird im Standortserkundungsverfahren für das ostdeutsche Tiefland durch Bodenvegetationsformengruppen untersetzt.

Den Humusformen der Standortserkundung sind entsprechende Zustands-Nährkraftstufen zugeordnet. Diese können in Form unterschiedlicher Sticksoff- und Säure-Basen-Stufen durch definierte laboranalytische Kennwerte abgegrenzt werden. Die laboranalytischen Merkmale der Humusformen der Standortserkundung liegen mit der SEA 95 für N_c (%), das C/N-Verhältnis, die Basensättigung und den pH(KCl)-Wert definiert vor und sind für die Humusdecke bzw. für die oberen humusreichen Zentimeter des Mineralbodens anzuwenden. In dieser Studie erfolgte die Anwendung der Kennwerte sowohl auf den Oh-Horizont als auch auf die oberen 5 cm des Mineralbodens.

5.1.1 Basensättigung

Die in der SEA 95 definierten laboranalytischen Rahmenwerte für die Basensättigung lassen sich aufgrund abweichender labortechnischer Analyseverfahren nicht mit den Werten aus den Testgebieten vergleichen. Daher kann die Basensättigung im Folgenden hinsichtlich der Zustandseigenschaften nicht hinlänglich bewertet werden. Generell ist der Oh-Horizont durch relative hohe Basenanteile und damit durch eine höhere Elastizität gekennzeichnet als der Mineralboden, da im Oh-Horizont deutlich mehr basisch wirkende Kationen an der Kationenaustauschkapazität beteiligt sind als im Mineralboden (Abb. 75). Sowohl für den Oh-Horizont als auch für den Mineralboden lassen sich die morphologischen Humusformen der Untersuchungspunkte nicht durch die Basensättigung erklären, da die Werte unabhängig von der gefundenen Form über den gesamten Wertebereich streuen. Die mit Abstand häufigste morphologische Humusform unabhängig vom Testgebiet war rohhumusartiger Moder.

Die Unterschiede in der Basensättigung in den einzelnen Testgebieten sind groß. Die Basensättigung im Hügel- sowie im Tiefland war sowohl im Oh-Horizont als auch im Mineralboden geringer ausgeprägt als im Bergland. Einige Standorte weisen in der organischen Auflage eine fast 100 %ige Sättigung mit basisch wirkenden Kationen auf. Selbst im Mineralboden fanden sich Werte von bis zu 80 %. Diese Standorte zeigen eine deutliche Reaktion auf die im Erzgebirge durchgeführte Bodenschutzkalkung.

Dass die dystrophen, sandigen Tieflandstandorte ähnliche Werte wie im Hügelland aufweisen, ist sicherlich der sekundären Aufbasung durch basische Staubeinträge oder aus benachbarten Brikettfabriken und Kohlekraftwerken in der Vergangenheit geschuldet. Allerdings ist die absolute Austauschkapazität dieser Standorte und damit auch ihre Elastizität gegenüber Säurebelastungen insgesamt nur sehr gering (Fritz et al. 2009, Zirlewagen 2009).

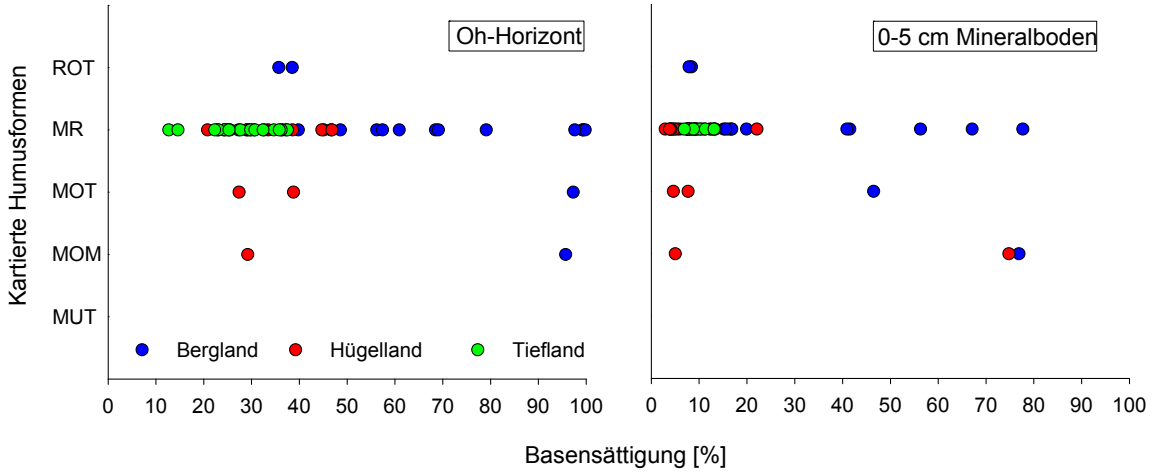

Abb. 75: Basensättigung in der organischen Auflage und im Mineralboden der Testgebiete in Abhängigkeit von den kartierten morphologischen Humusformen.

Die Streuung der Basensättigung in den Testgebieten war im Mineralboden höher als im Oh-Horizont (Abb. 76). Im Testgebiet Bergland streuten sowohl die Werte für den Oh-Horizont als auch für den Mineralboden beträchtlich. Die Streuung der unvernässten Standorte (OgGn) war generell größer als die der Nassstandorte (OgGG, FoGG). Für den Oh-Horizont konnte gezeigt werden, dass die Unterscheidung in Feuchteziffern für die unvernässten Standorte im Gegensatz zu den vernässten Standorten, bei denen ein Trend erkennbar ist, keine Unterschiede zeigt. Selbst die Einteilung in Nass- und Feuchtstandort oder die Trennung nach Bestand ergab keine klaren Hinweise auf Unterschiede in der Basensättigung. Die Ursache für diese Befunde muss vorrangig in den Bodenschutzkalkungen, die in dem Untersuchungsgebiet Bergland durchgeführt wurden, gesehen werden. Im Mineralboden nimmt die Basensättigung im Gegensatz zu den Nassstandorten auf unvernässten Standorten sehr hohe Werte an. Generell sind die Werte jedoch niedriger als im Oh-Horizont. Durch die große Streuung der Werte lässt sich kaum ein Muster identifizieren. Eine bessere Versorgung mit basisch wirkenden Kationen bei Buchenbeständen im Vergleich zu Fichtenbeständen (bei gleicher Feuchteziffer) ist jedoch erkennbar. Möglicherweise war die Basensättigung auf unvernässten Standorten höher als auf vernässten Standorten, was jedoch durch die hohe Variabilität der Werte nicht verifizierbar ist. Generell ist für das Bergland festzuhalten, dass die Bodenschutzkalkung die Basensättigung in einem solchen Maß beeinflusst, dass der Parameter wenig differenziert.

Die Basensättigung der Oh-Horizonte war im Testgebiet Hügelland höher als im Mineralboden. Trotz der größeren Streuung im Oh-Horizont grenzt sich die organische Auflage deutlich vom Mineralboden ab. Während im Oh-Horizont keine Unterschiede in der Basensättigung zwischen den einzelnen Standortsformengruppen (TM2, WM2, NM2) zu finden waren, zeigt sich ein Baumarteneffekt, da sich unabhängig von der Feuchtestufe auf Eichenstandorten höhere Anteile basisch wirkender Kationen fanden als auf Fichtenstandorten. Die Basensättigung des Mineralbodens war auf wechselfeuchten und nassen Standorten gegenüber unvernässten

Standorten erhöht. Des Weiteren fanden sich bei gleicher Feuchtestufe höhere Werte unter Eichen- als unter Fichtenwald.

Im Tiefland war die Variabilität ähnlich ausgeprägt wie im Hügelland, mit einer geringeren Streuung im Mineralboden und einer größeren Variabilität im Oh-Horizont. Generell war die Streuung nicht nur innerhalb, sondern auch zwischen den Standortsformen gering, so dass sich kaum Unterschiede erkennen ließen. Allerdings zeigte sich ein Trend in der Ausprägung eines höheren Anteils basisch wirkender Kationen in Oh-Horizonten von Standorten mit mäßiger Nährkraft (TM2) im Vergleich zu Standorten mit geringerer Nährkraft (TA2, TZ1). Dies konnte jedoch nicht für den Mineralboden festgestellt werden.

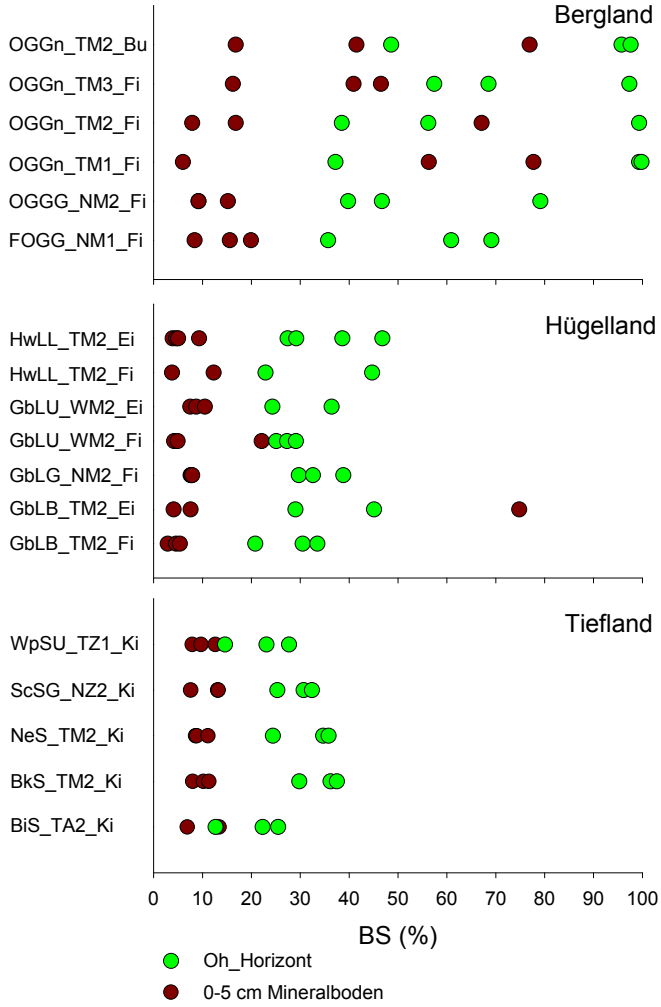

Abb. 76: Basensättigung der organischen Auflage und des Mineralbodens für verschiedene Standortsformen in den Testgebieten.

5.1.2 pH(KCl)-Wert

Die potenzielle Azidität zahlreicher Standorte, ausgedrückt als pH(KCl)-Wert, lag sowohl im Oh-Horizont als auch im Mineralboden im Aluminium-Eisen- bis Eisen-Pufferbereich (pH: 3,8-3,2 bzw. < 3,2) (Abb. 77). Lediglich in der organischen Auflage des Testgebiets Bergland fanden sich aufgrund der dort durchgeführten Bodenschutzkalkung höhere pH-Werte. Außer für die Oh-Horizonte der Mittelgebirgsstandorte war die Streuung der pH-Werte gering. Die Einordnung der festgestellten morphologischen Humusformen in die Kennwerte der Humusformen der Standortserkundung (SEA 95) gelang für den Mineralboden im Gegensatz zum Oh-Horizont nur teilweise. Im Oh-Horizont zeigten sich bis auf einige Berglandstandorte Übereinstimmungen bei den Humusformen typischer Rohhumus und rohhumusartiger Moder. Im Hügelland erfolgte die Kartierung von Moder und mullartiger Moder, obwohl die Laboranalysen einen anderen Schluss hin zu ökologisch schlechteren Humusformen nahelegen. Die Einordnung der morphologischen Humusform in die laboranalytischen Kennwerte der SEA 95 zeigte, dass alle Humusformen vom typischen Mull bis zum typischen Rohhumus vorhanden waren. Besonders auffällig waren pH-Werte im Oh-Horizont > 4.5. Allerdings wäre die Einordnung in die Humusform typischer Mull oder mullartiger Moder unsinnig, da hier die Bodenschutzkalkung eine deutliche Anhebung des pH-Wertes verursacht hat. Der Vergleich von Humusformen nach morphologischer Ansprache und Humusformen der Standortserkundung auf Basis chemischer Parameter macht deutlich, dass aufgrund der unterschiedlichen Zuordnungsmethoden durchaus unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten sind. Die Ergebnisse der laboranalytischen Untersuchung der pH-Werte für den Mineralboden erlauben ebenfalls eine teilweise Einordnung in die Kennwerte für die Humusformen. Jedoch ist zu beachten, dass die Kennwerte für Probenmaterial von Oh-Horizonten und nicht für Mineralbodenproben entwickelt wurden. So ließen sich einige morphologisch als rohhumusartiger Moder angesprochene Einheiten anhand der Auswertung der Laboranalysen in die Kategorie typischer Moder einordnen.

Während für den Oh-Horizont die niedrigsten Werte im Hügelland gefunden wurden, zeigten sich für den Mineralboden die niedrigsten Werte im Bergland. Sowohl im Oh-Horizont als auch im Mineralboden waren die pH-Werte des Hügellands im Durchschnitt niedriger als im Tiefland. Dies ist wiederum auf die bereits erwähnten basischen Staubeinträge zurückzuführen, indem puffernde Kationen zu einer Anhebung des pH-Wertes im Testgebiet Tiefland führten. Die Aufbasung der Mittelgebirgsstandorte durch die Bodenschutzkalkung führte im Mineralboden im Gegensatz zum Oh-Horizont zu keiner deutlichen Anhebung der pH-Werte im Vergleich zu den anderen Testgebieten.

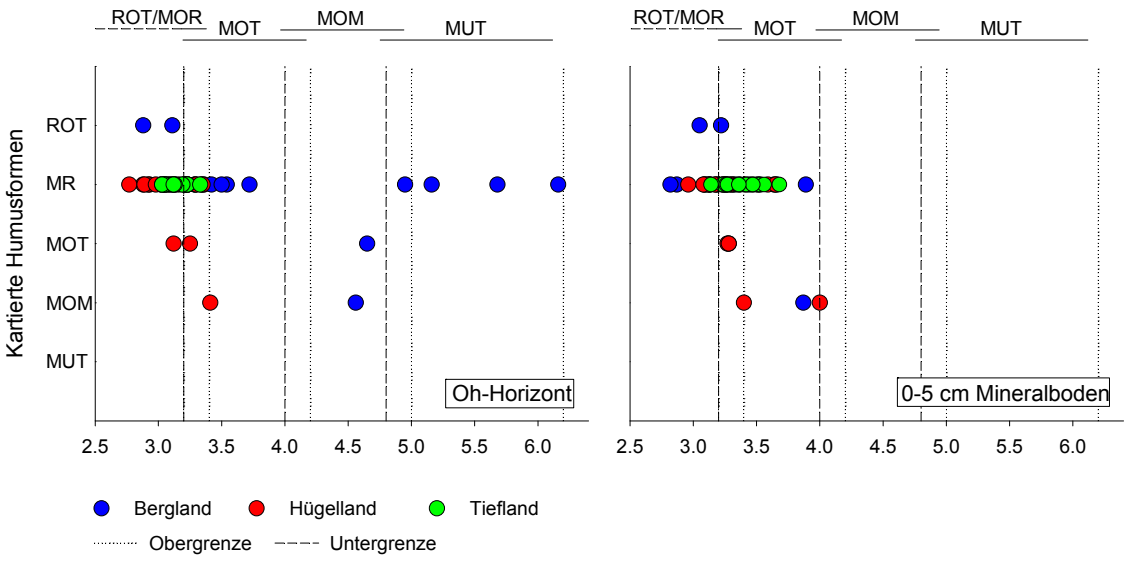

Abb. 77: Humusformen nach Kennwerten zum pH(KCl) nach SEA 95 im Vergleich mit den morphologisch ausgeprägten Humusformen, dargestellt für die organische Auflage und den Mineralboden. Abk.: ROT, typischer Rohhumus; MOR, rohhumusartiger Moder; MOT, typischer Moder; MOM, mullartiger Moder; MUT, typischer Mull.

Die pH(KCl)-Werte der Standortsformen streuen im Oh-Horizont des Berglands deutlich stärker als im Hügelland bzw. im Tiefland (Abb. 78). Am geringsten war jedoch die Streuung im Mineralboden des Tieflands. Aufgrund der großen Variabilität der Werte im Bergland sowohl innerhalb als auch zwischen den Standortsformen ist eine gesicherte Aussage kaum zu treffen. Tendenziell waren die pH-Werte des Mineralbodens etwas niedriger als im Oh-Horizont. Bei den Nassstandorten ist jedoch die geringe Variabilität im Vergleich zu den unvernässten Standorten im Oh-Horizont auffällig. Ein Einfluss der Feuchtezahl auf die Höhe des pH-Wertes konnte für die verbleibenden Standortsformen nicht gefunden werden. Ähnlich wie bei der Basensättigung fanden wir bei konstanter Feuchteziffer etwas höhere pH-Werte unter Buche als unter Fichte. Auch für den Mineralboden ist aufgrund der großen Streuung der Werte keine gesicherte Aussage möglich. Wie bereits für den Oh-Horizont dargelegt, fanden wir für den Mineralboden bei konstanter Feuchteziffer etwas höhere pH-Werte unter Buche als unter Fichte. Auch streuten die Werte der Nassstandorte im Vergleich zu den unvernässten Standorten kaum. Des Weiteren zeigte sich auch im Mineralboden der bereits für den Oh-Horizont erwähnte Baumarteneffekt.

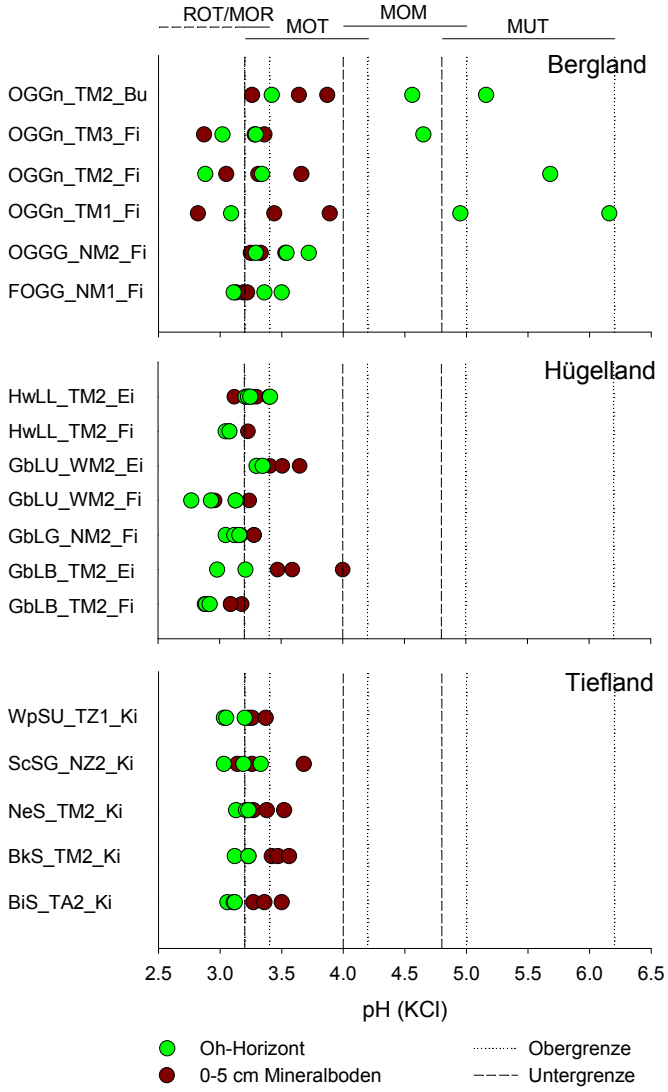

Abb. 78: pH(KCl)-Wert der organischen Auflage und des Mineralbodens für verschiedene Standortsformen der Testgebiete mit Bezug zu den nach der SEA95 abgeleiteten Kennwerten. Abk.: ROT, typischer Rohhumus; MOR, rohhumusartiger Moder; MOT, typischer Moder; MOM, mullartiger Moder; MUT, typischer Mull.

Die Streuung der pH-Werte in den Oh-Horizonten und im Mineralboden des Testgebiets Hügelland innerhalb der Standortsformen war gering. In der Tendenz fanden sich für die Eichenstandorte im Oh-Horizont höhere pH-Werte bei gleicher Bodenfeuchtestufe als für die Fichtenstandorte. Der Baumarteneffekt spiegelte sich auch im Mineralboden wider. Allerdings war ein Einfluss der Bodenfeuchtestufe selbst sowohl im Oh-Horizont als auch im Mineralboden nicht feststellbar.

Die Streuung der pH-Werte der Oh-Horizonte im Tiefland war sowohl innerhalb als auch zwischen den Standortsformen gering. Es zeigte sich weiterhin, dass ärmere Standorte geringere pH-Werte aufwiesen als Standorte mit mittlerer Nährkraft. Wasserhaushaltsbedingte Unterschiede konnten nicht festgestellt werden. Ähnlich wie im Hügelland spiegelten sich auch im Tiefland die

pH-Werte des Oh-Horizonts im Mineralboden wider. Standorte mit geringer Nährkraft hatten einen niedrigeren pH-Wert als besser ausgestattete Standorte. Möglicherweise deutet sich ein Einfluss des Wasserhaushaltes auf die Höhe des pH-Wertes an, zumal etwas niedrigere pH-Werte auf feuchteren Standorten vorkamen. Allerdings ist dieser Effekt aufgrund der großen Abweichung eines ScSG_NZ2_Ki-Standortes vom Gruppenkollektiv nicht eindeutig nachzuweisen.

5.1.3 C/N-Verhältnis

Die C/N-Verhältnisse lagen im Oh-Horizont zwischen 18,5 und 27.6 und im Mineralboden zwischen 16,7 und 33,6 (Abb. 79). Die Streuung der C/N-Verhältnisse im Oh-Horizont war enger als die im Mineralboden. Während die größte Variabilität im Oh-Horizont für die Tieflandstandorte festgestellt wurde, streuten die Werte im Mineralboden für alle Testgebiete gleichermaßen stark. Die angewandten Rahmenwerte für das C/N-Verhältnis sind Ausdruck für die jeweilige mikrobielle Zersetzbarkeit der organischen Substanz bzw. die biologische Bodenaktivität und Humusqualität. Ab einem C/N-Verhältnis größer 25 beginnt sich die mikrobielle Aktivität in Folge von Stickstoffmangel zu verlangsamen. Im Gegensatz zum Mineralboden, wo die C/N-Verhältnisse z.T. deutlich weiter waren, konnte für die Oh-Horizonte nur an wenigen Standorten ein Stickstoffmangel nachgewiesen werden. Der Vergleich der kartierten Humusformen mit den Rahmenwerten der SEA 95 für die Oh-Horizonte zeigt, dass für die meisten der Tieflandstandorte, für einige Standorte des Hügellands und für nur wenige Mittelgebirgsstandorte Übereinstimmungen bei der Humusform festgestellt wurden. Unabhängig vom Standort lagen viele C/N-Verhältnisse unterhalb des für die Humusform angewandten Rahmenwerts.

Die angegebenen Rahmenwerte sind zwar nicht für den Mineralboden vorgesehen, dennoch fanden sich hier vergleichbare Muster wie im Oh-Horizont. Es gab sogar größere Übereinstimmungen für rohhumusartigen Moder als im Oh-Horizont, was sicherlich auf die generell weiteren C/N-Verhältnisse im Mineralboden zurückzuführen ist, wodurch eine Verschiebung in den als ökologisch schlechter zu bewerteten Bereich erfolgte.

Die Streuung der C/N-Verhältnisse ist zwischen den Standortsformen ähnlich groß wie zwischen den Kompartimenten Oh-Horizont und Mineralboden (Abb. 80). Die C/N-Verhältnisse in den Oh-Horizonten des Testgebiets Bergland streuen wenig. Die Standorte unter Buche hatten dabei deutlich engere C/N-Verhältnisse als unter Fichte, was auf die unterschiedliche Art und Zusammensetzung der Streu zurückzuführen ist. Bis auf den Einfluss der Streuqualität konnten keine Unterschiede gefunden werden. Die Einordnung der C/N-Verhältnisse in die Humusform typischer Moder spiegelt nicht die für Fichtenbestände typischen Standortverhältnisse wider, da auf einem Gneisstandort unter Fichte in den höheren Lagen des Berglands durchaus ungünstigere morphologische Humusformen zu erwarten sind.

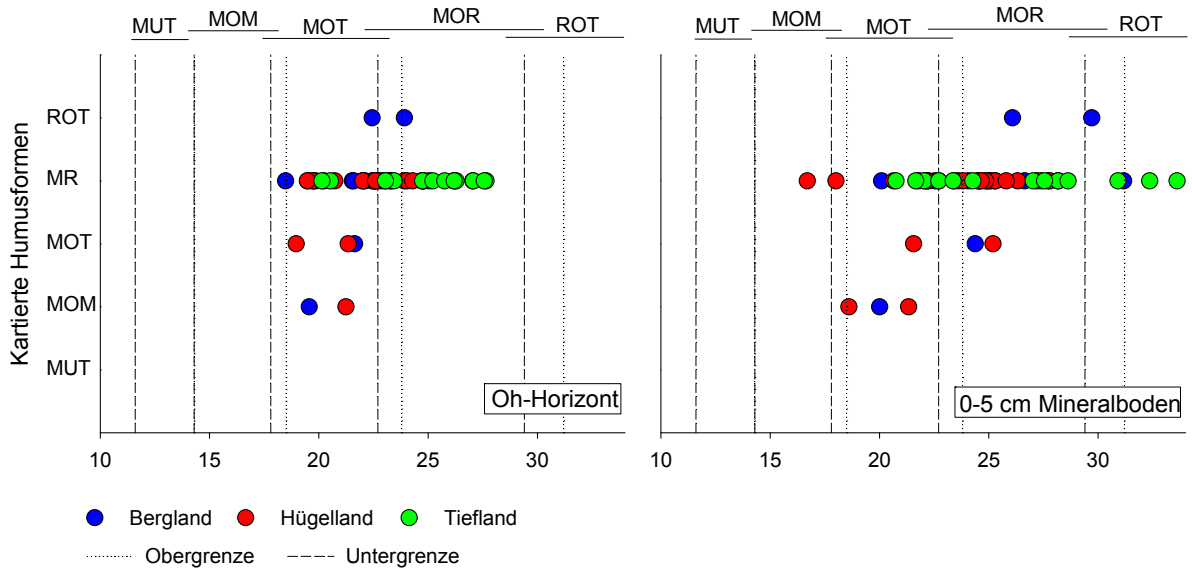

Abb. 79: Humusformen nach SEA95-Kennwerten zum C/N-Verhältniss im Vergleich mit den morphologisch ausgeprägten Humusformen, dargestellt für die organische Auflage und den Mineralboden. Abk.: ROT, typischer Rohhumus; MOR, rohhumusartiger Moder; MOT, typischer Moder; MOM, mullartiger Moder; MUT, typischer Mull.

Die Variabilität der C/N-Werte im Mineralboden war weiter als im Oh-Horizont. Vor allem die Werte der Nassstandorte schwankten stark. Auch im Mineralboden zeichnet sich ein Baumarteneffekt ab, der jedoch weniger stark ausgeprägt war als im Oh-Horizont. Weitere Unterschiede zwischen den Standortsformen waren nicht erkennbar. Aufgrund der weiteren C/N-Verhältnisse im Mineralboden ließen sich die Werte besser als für den Oh-Horizont in die Rahmenwerte der SEA 95 integrieren, obwohl deren Anwendung ausschließlich auf den Oh-Horizont vorgesehen ist.

Trotz der relativ hohen Streuung in den Oh-Horizonten innerhalb der Standortsgruppen des Testgebiets Hügelland zeichnet sich ein deutlicher Baumarteneffekt ab. Unterschiede zwischen den Bodenfeuchtestufen waren nicht vorhanden. Die Rahmenwerte führen bei den meisten Eichenstandorten zur Einordnung in die Humusform typischer Moder, die auch die erwartete morphologische Humusform darstellt. Diese morphologische Humusform wurde auch häufig im Gelände unter Eiche angesprochen. Die laboranalytischen Werte der Fichtenstandorte tendieren eher zur Humusform rohhumusartiger Moder, was die Kartierung der morphologischen Humusform bestätigte. Ein ähnliches Bild in der Verteilung der C/N-Werte in den Oh-Horizonten zeigte sich für den Mineralboden, indem es deutliche Unterschiede zwischen den Eichen- und den Fichtenbeständen gab, jedoch keine Unterschiede in Bezug auf den Wasserhaushalt feststellbar waren.

Die C/N-Verhältnisse der Oh-Horizonte im Tiefland sind weiter als die im Berg- oder Hügelland. Andererseits ist die Streuung innerhalb der Standortsformen in den meisten Fällen gering. So

weisen ärmere Standorte weitere C/N-Verhältnisse auf als Standorte mit mittlerer Nährkraft. Lediglich die BkS_TM2_Ki-Standorte zeigten trotz mittlerer Nährkraft durchgehend weite C/N-Verhältnisse.

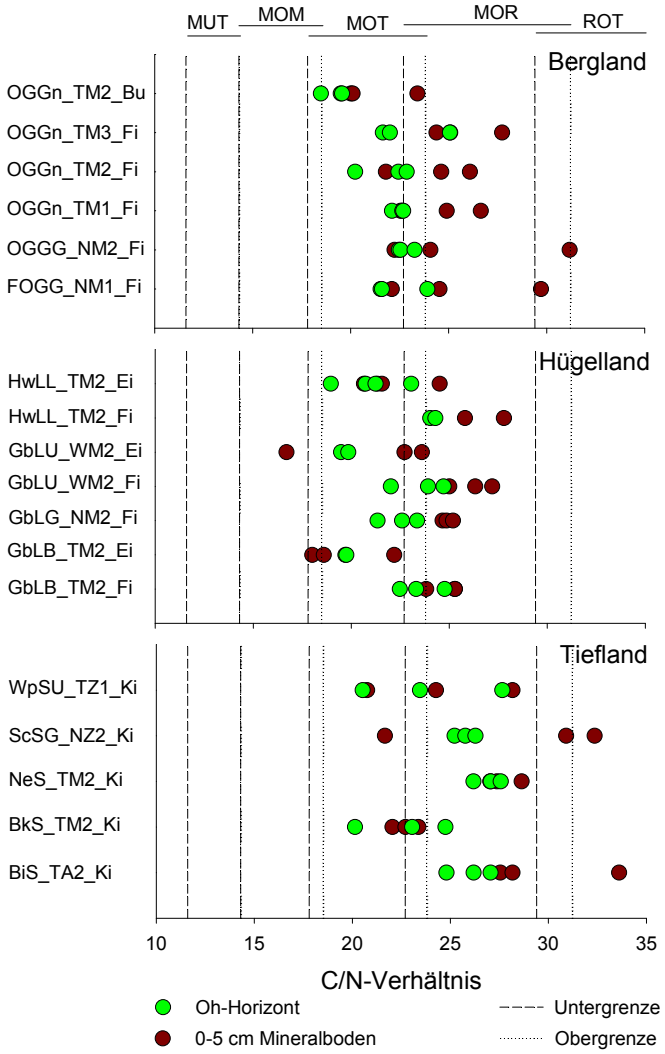

Abb. 80: C/N-Verhältnis der organischen Auflage und des Mineralbodens für verschiedene Standortsformen der Testgebiete mit Bezug zu den nach der SEA95 abgeleiteten Kennwerten. Abk.: ROT, typischer Rohhumus; MOR, rohhumusartiger Moder; MOT, typischer Moder; MOM, mullartiger Moder; MUT, typischer Mull.

Die gemessenen Werte der meisten Standorte korrespondieren gut mit den Rahmenwerten der Humusformen der Standortserkundung nach SEA 95. Dies trifft v.a. für rohhumusartigen Moder zu. Einige Standorte fallen jedoch in die Klasse typischer Moder, die aus morphologischen Gesichtspunkten nicht auf den ausgewählten Standorten vorkommt. Hier spielt möglicherweise die Überlagerung natürlicher bodenökologischer Prozesse durch anthropogen verursachte Stickstoffeinträge eine Rolle. Im Gegensatz zum Oh-Horizont war die Variabilität innerhalb der Standortsgruppen im Mineralboden höher. Auch ein Zusammenhang von Nährkraftstufe und C/N-Verhältnis konnte nicht nachgewiesen werden.

5.1.4 Schlussfolgerung

Die Humusform ist zwar Ausdruck eines bestimmten Gleichgewichtszustandes zwischen dem Nährstoffstatus des Standortes und der biologischen Aktivität und sie erlaubt auch eine Beurteilung von Zersetzung und Mineralisierung der organischen Substanz, die die Stoffkreisläufe in Waldökosystem entscheidend prägen. Dennoch veränderten anthropogen bedingte Stoffeinträge die stoffliche Zusammensetzung der Streu, was letztlich auch die morphologische Humusform überprägte. Diese Tatsache erschwert die Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich der Bewertung der Zustandseigenschaften der Standorte. Eine starke Diskrepanz ergibt sich beim Vergleich von pH-Werten und dem C/N-Verhältnis (Abb. 81). Eine Beziehung zwischen beiden Parametern ist sowohl im Mineralboden als auch im Oh-Horizont nicht ersichtlich. Der Oberbodenzustand wurde durch atmogene Einträge so beeinträchtigt, dass harmonische Humusformen der Standortserkundung nach Schulze und Kopp (1995) kaum auftreten. So zeigten sich disharmonische Humusformen mit relativ engen C/N-Verhältnissen und gleichzeitig sehr niedrigen pH-Werten. Andererseits fanden sich häufig günstigere Basensättigungsgrade und hohe pH-Werte auf den pleistozänen Sandstandorten des Tieflands. Auch die Böden des Berglands wiesen trotz des relativ sauren Ausgangssubstrats hohe Basensättigungsgrade und pH-Werte auf. Damit zeigt sich in diesen Testgebieten eine weitgehend substratunabhängige Nivellierung des chemischen Bodenzustandes. Diese Nivellierung ist im Tiefland vermutlich durch basisch wirkende Stäube und im Bergland durch die Bodenschutzkalkung hervorgerufen worden. Des Weiteren waren die C/N-Verhältnisse im Tief- und im Hügelland so eng ausgeprägt, dass die zugeordneten Humusformen der Standortserkundung nicht mit den für diese Standorte typischen morphologischen Humusformen korrespondieren. Möglicherweise trugen hier anthropogen verursachte Stickstoffeinträge zu einer Verengung der C/N-Verhältnisse bei. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die Rahmenwerte der Humusformen der Standortserkundung unter dem Aspekt der Dynamik der Umweltveränderungen überprüft werden sollten. Auch scheinen die Unterschiede der Parameter C/N und pH-Wert zwischen den morphologischen Humusformen z.T. unbedeutend zu sein. Während im Tiefland und teilweise auch im Hügelland eine Einordnung der morphologischen Humusformen in die Rahmenwerte für das C/N-Verhältnis und den pH-Wert möglich ist, war dies im Bergland nicht der Fall. Eingeschränkt trifft dies auch für die Basensättigung zu. Die morphologische Ansprache jedoch ließ anhand der Rahmenwerte kaum Rückschluss auf die C/N-Verhältnisse oder den pH-Wert zu. Generell waren die Unterschiede zwischen den Standortsformengruppen bezüglich der untersuchten Parameter gering ausgeprägt. So konnte kein relevanter Einfluss des Wasserhaushalts nachgewiesen werden. Es ist eher ist davon auszugehen, dass die untersuchten Parameter einen regionalen Bezug aufweisen, da z.T. ein substratbezogener Zusammenhang erkennbar war. Weiterhin bleibt die Unterscheidung des Bestandestyps eine wichtige Größe, um Zustandseigenschaften aus der morphologischen Humusform direkt bzw. aus den dort gemessenen Zustandsparametern ableiten zu können.

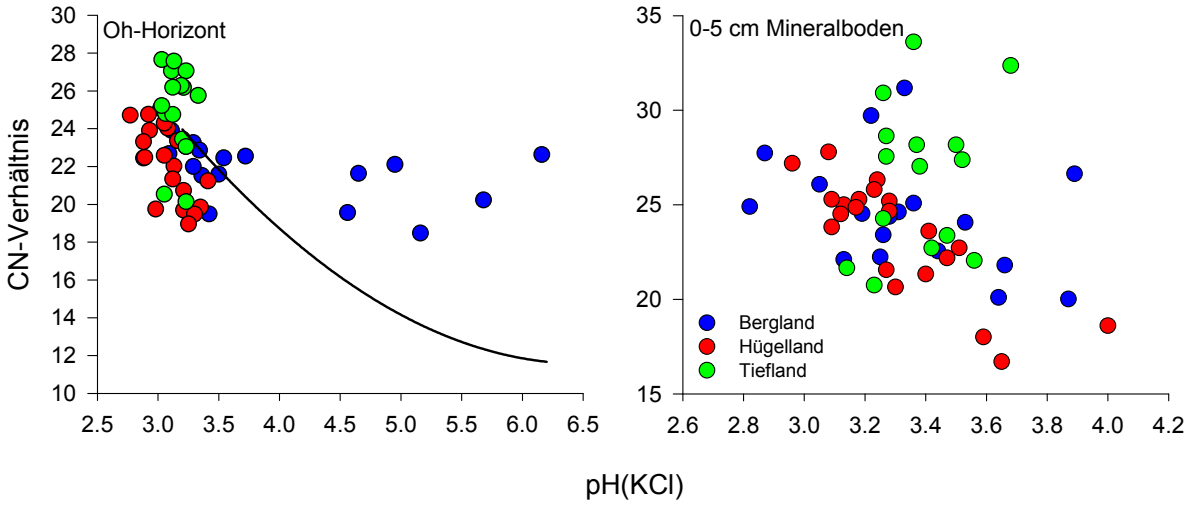

Abb. 81: Beziehung zwischen pH(KCl) und C/N-Verhältnis im Oh-Horizont und im Mineralboden in den Testgebieten (Kurve der Rahmenwerte für den Oh-Horizont nach Schulze und Kopp (1995) für harmonische Humusformen).

Die Ableitung der Zustandseigenschaften anhand der Basensättigung, des pH-Werts und des C/N-Verhältnisses der Humusform der Standortserkundung ist aufgrund der geringen Stichprobenzahl und der Variabilität der Parameter problematisch. Aufgrund der geringeren Variabilität im Vergleich zum Oh-Horizont scheinen die oberen 5 cm des Mineralbodens zur Beurteilung der Zustandseigenschaften am besten geeignet zu sein. Mit zunehmender Tiefe würden die Unterschiede zwischen den Standortsformen noch zunehmen, der Bezug zur Auflage könnte jedoch weniger stark ausgeprägt sein bzw. komplett verschwinden.

5.2 Klassifikation der Testgebiete in Bezug auf die Zustandseigenschaften

Wie im Kapitel 5.1 bereits dargelegt, konnte kein Einfluss des Wasserhaushalts auf die getesteten Parameter nachgewiesen werden. Darüber hinaus war es vom Testgebiet abhängig, wie stark der Effekt eines bestimmten Parameters war. Um die Eignung der klassifizierten Auswertungseinheiten [= LF + SFG + BT] zu überprüfen, wurde zunächst eine testgebietsunabhängige Clusteranalyse nach Average-linkage-Verfahren (Kapitel 2.7.4) sowohl für den Oh-Horizont als auch für die oberen 5 cm und 30 cm des Mineralbodens durchgeführt.

Die Resultate der Clusteranalyse für den Oh-Horizont zeigen, dass sich die Testgebiete hinsichtlich der untersuchten Parameter voneinander unterscheiden (Abb. 82). Das Testgebiet Bergland trennte sich in zwei größere Cluster vom Gesamtkollektiv ab. Während sich unterschiedliche Cluster bezüglich der Bodenfeuchtestufe ergaben, war keine Clusterbildung für Lokalbodenformen und Bestand ausgeprägt. Das Hügelland bildete ein großes Cluster, das sich wiederum in vier kleinere Cluster unterteilen ließ. Sowohl gleiche Lokalbodenformen als auch gleiche Bestände und z.T. auch gleiche Bodenfeuchtestufen konnten innerhalb des großen

Clusters abgetrennt werden. Ähnlich wie für das Hügelland bildete das Tiefland ein großes Cluster, innerhalb dessen sich jedoch nicht eindeutig zusammenhängende Gruppen erkennen ließen. Insgesamt konnte die Clusteranalyse für Oh-Horizonte die unterschiedlichen Gebiete abgrenzen. Eine eindeutige Unterscheidung nach Standortsformen bzw. Standortsformengruppen innerhalb der Gebietscluster war jedoch nicht möglich.

Die Clusterbildung im Mineralboden war heterogener als im Oh-Horizont. So zeigte sich dennoch für die oberen 5 cm des Mineralbodens ein ähnliches, wenn auch weniger stark ausgeprägte Muster als im Oh-Horizont (Abb. 83). Einzelne gebietsfremde Standorte traten jetzt häufiger in Clustern auf. Die Clusteranalyse für die oberen 5 cm des MineralHorizonts zeigte abgesehen von der guten Trennung zwischen den Testgebieten auch Unterschiede nach Standortsformen bzw. Standortsformengruppen innerhalb der Gebietscluster auf, die jedoch weniger stark ausgeprägt waren als für den Oh-Horizont. Die Cluster für die oberen 30 cm des Mineralbodens waren bezüglich Lokalbodenform, Standortsformengruppe oder Bestand äußerst heterogen ausgeprägt (Abb. 84).

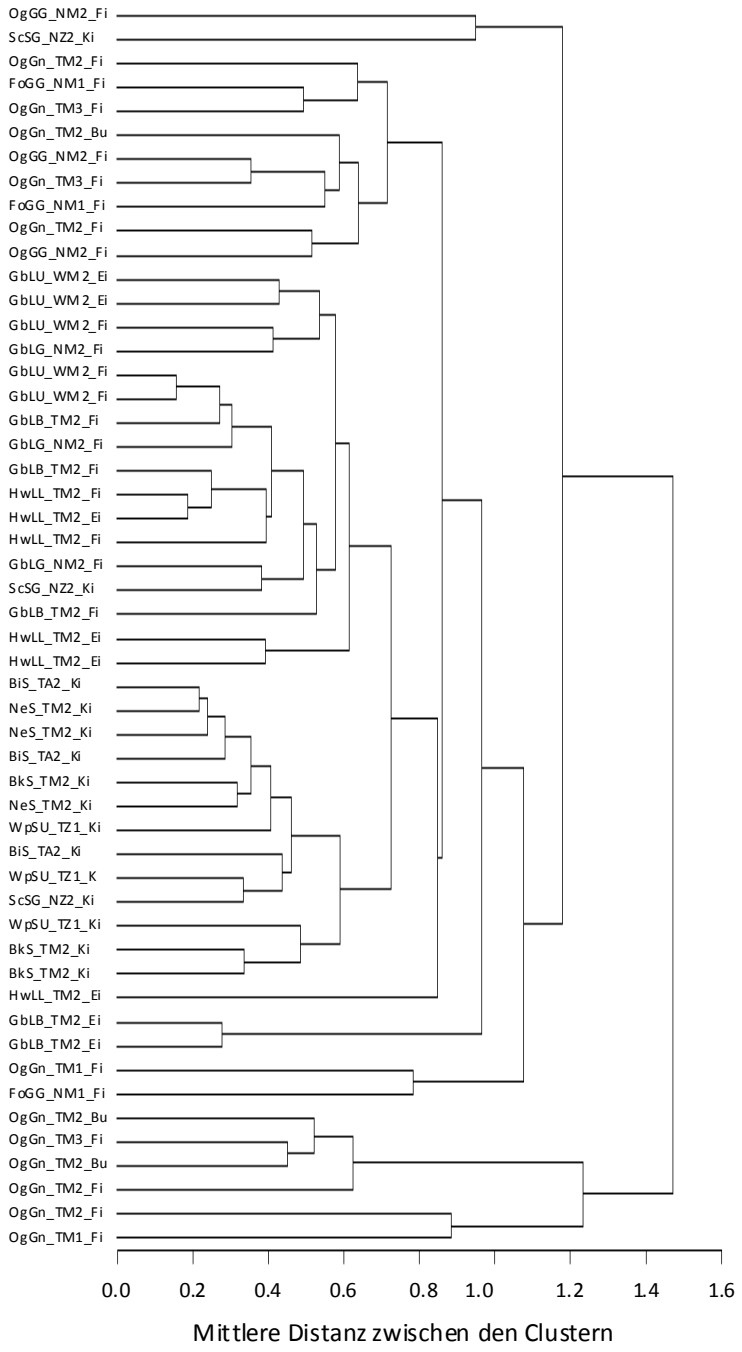

Abb. 82: Dendrogramm basierend auf der Methode „average linkage“ mit Standortsformen aller drei Testgebiete für den Oh-Horizont. Parameter: Kohlenstoff-, Stickstoff-, Calcium-, Magnesium-, Kalium-, Aluminium-, Mangan-, Eisengehalte, Durchwurzelungsintensität, Horizontmächtigkeit, Neigung, Humusmenge, C/N-Verhältnis, effektive Austauschkapazität, Basensättigung, pH(KCl).

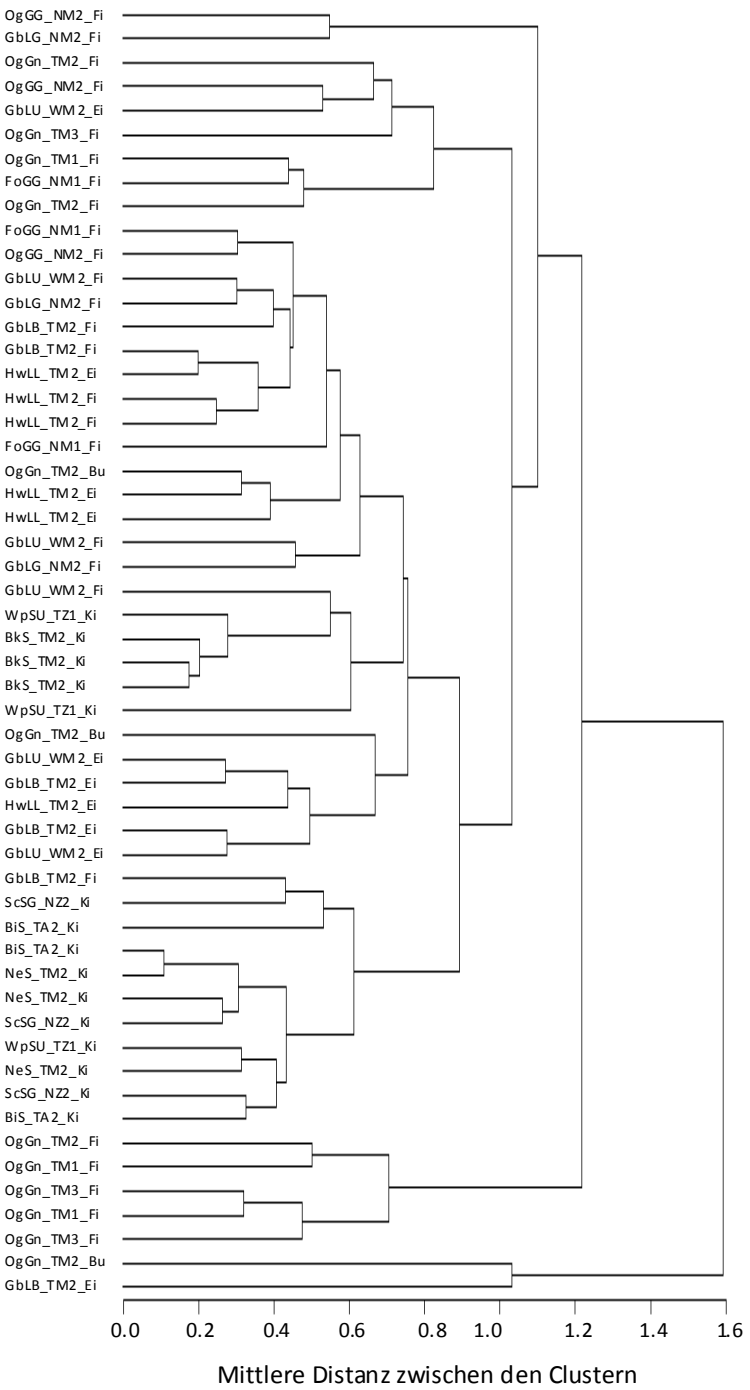

Abb. 83: Dendrogramm basierend auf der Methode „average linkage“ mit Standortsformen aller drei Testgebiete für die oberen 5 cm des Mineralbodens. Parameter: Kohlenstoff-, Stickstoff-, Calcium-, Magnesium-, Kalium-, Aluminium-, Mangan-, Eisengehalte, Neigung, Trockenrohdichte, Feinbodenmenge, C/N-Verhältnis, effektive Austauschkapazität, Basensättigung, pH(KCl).

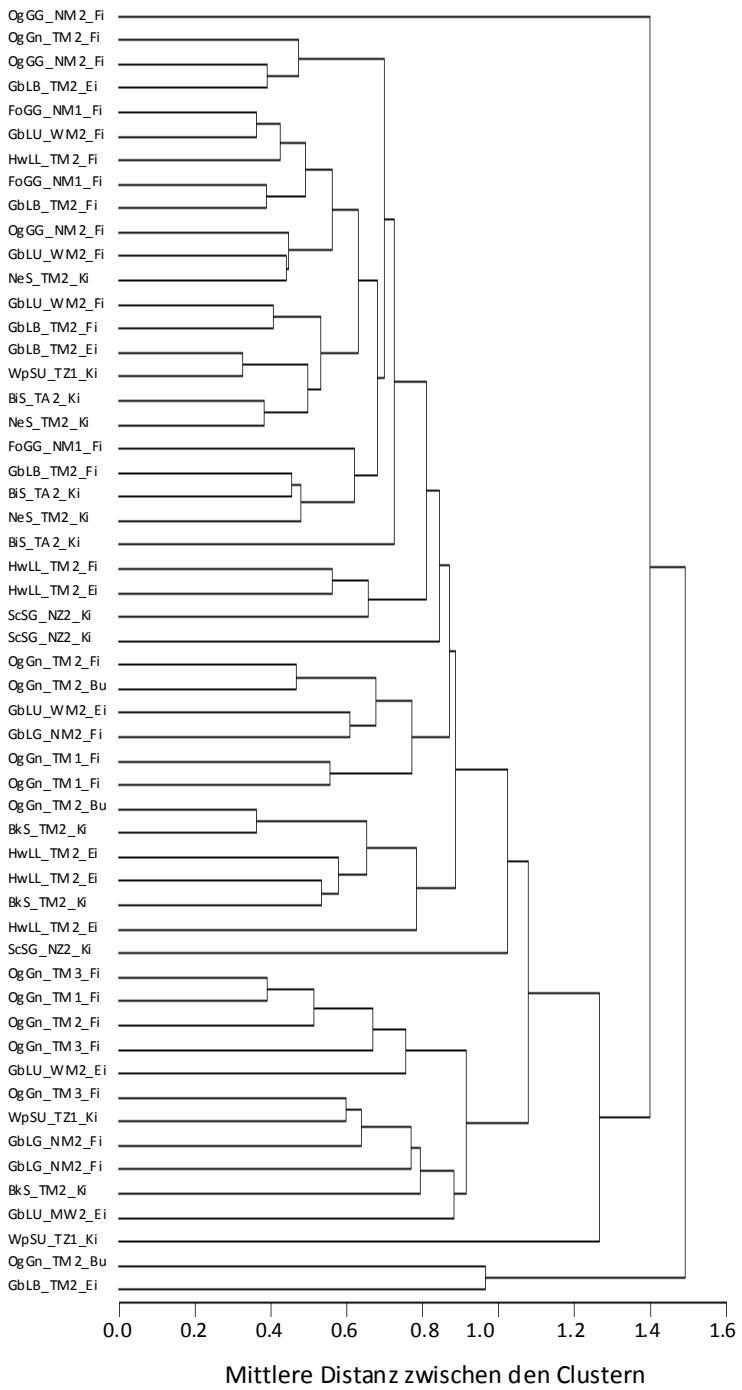

Abb. 84: Dendrogramm basierend auf der Methode „average linkage“ mit Standortsformen aller drei Testgebiete für die oberen 30 cm des Mineralbodens. Parameter: Kohlenstoff-, Stickstoff-, Calcium-, Magnesium-, Kalium-, Aluminium-, Mangan-, Eisengehalte, Neigung, Trockenrohdichte, Feinbodenmenge, C/N-Verhältnis, effektive Austauschkapazität, Basensättigung, pH(KCl).

6 Methodenentwicklung zur Erfassung von Zustandseigenschaften auf Waldstandorten

6.1 Identifizierung relevanter Zustandsparameter

Mit der Clusteranalyse (Kapitel 5.2) war es nicht möglich, definierte Auswertungseinheiten [= Lokalbodenform (LF) + Standortsformengruppe (SFG) + Bestand (BT)] hinsichtlich ihres Wasserhaushalts oder ihrer Nährkraft hinlänglich mit laboranalytischen und kartierten Parametern abzugrenzen. Dies macht die Herausarbeitung von Parametern zur Kennzeichnung waldbaulich/ökologisch relevanter Zustandseigenschaften schwierig. Die Charakterisierung der Standorte nach dem Wasserhaushalt und der Nährkraft, z.T. nach der Lokalbodenform, spiegelt sich in den Laborergebnissen kaum wider. Die Übertragung der Zustand-Standortseigenschaften auf die Auswertungseinheiten gelang ansatzweise für den Oh-Horizont und teilweise für die oberen 5 cm des Mineralbodens. Um nun die ökologisch relevanten Zustandsparameter identifizieren zu können, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA), für den Oh-Horizont und den Mineralboden (0-5 cm) getrennt nach Testgebiet durchgeführt. Darüber hinaus erfolgte eine ANOVA für das Kompartiment Oh-Horizont + Mineralboden (0-30 cm). Des Weiteren erfolgte die Anwendung der ANOVA nicht nur für die Auswertungseinheit, sondern auch für deren Komponenten getrennt nach Lokalbodenform, Standortsformengruppe und Bestand, was wiederum die Bewertung unterschiedlichster Effekte ermöglicht.

Im Testgebiet Bergland ergab sich sowohl für den Oh-Horizont als auch für den Mineralboden kein einheitliches Muster in der Parameterauswahl (Tab. 47). Die ANOVA deckte kaum Parameter auf, die sowohl für den Oh-Horizont als auch für den Mineralboden relevant waren. Jedoch traten die Gruppenunterschiede, ausgedrückt als *P*-Wert, hinsichtlich der identifizierten Parameter im Oh-Horizont deutlicher als im Mineralboden auf. Für den Mineralboden mussten auch nicht signifikante Parameter für die Identifizierung der Zustandsparameter verwendet werden. Dies traf v.a. für die Gruppen Auswertungseinheit und Standortsformengruppe zu. Die Einbeziehung von Oh-Horizont + Mineralboden (0-30 cm) ergab für fast alle Einheiten (Auswertungseinheit, Lokalbodenform, Standortsformengruppe, Bestand) eine bessere Differenzierbarkeit innerhalb der untersuchten Gruppen. Es konnten jedoch keine allgemeingültigen Parameter identifiziert werden, die sowohl in allen Kompartimenten als auch in allen Einheiten vorkamen.

Folgende drei in ihrer Wichtigkeit geordnete Parameter beschreiben die Zustandseigenschaften des Oh-Horizonts am besten:

- Auswertungseinheit [= LF + SFG + BT]: C/N-Verhältnis, effektive Austauschkapazität, Magnesiumgehalt
- Lokalbodenform [LF]: Oh-Horizontmächtigkeit, Natriumgehalt, Hangneigung
- Standortsformengruppe [SFG]: effektive Austauschkapazität, Magnesiumgehalt, Kaliumgehalt
- Bestand [BT]: C/N-Verhältnis, Mangangehalt, Durchwurzelungsintensität mit Feinwurzeln

Folgende drei in ihrer Wichtigkeit geordnete Parameter beschreiben die Zustandseigenschaften des Mineralbodens (0-5 cm) am besten:

- Auswertungseinheit [= LF + SFG + BT]: effektive Austauschkapazität, Magnesiumgehalt, Aluminiumgehalt
- Lokalbodenform [LF]: Natriumgehalt, Hangneigung, Basensättigung
- Standortsformengruppe [SFG]: Magnesiumgehalt, Natriumgehalt, Basensättigung
- Bestand [BT]: Mangangehalt, Durchwurzelungsintensität mit Feinwurzeln, C/N-Verhältnis

Folgende drei in ihrer Wichtigkeit geordnete Parameter beschreiben die Zustandseigenschaften des Oh-Horizonts + Mineralbodens (0-30 cm) am besten:

- Auswertungseinheit [= LF + SFG + BT]: effektive Austauschkapazität, Mangangehalt, Stickstoffgehalt,
- Lokalbodenform [LF]: Stickstoffgehalt, Stickstoffvorrat, effektive Austauschkapazität
- Standortsformengruppe [SFG]: effektive Austauschkapazität, Stickstoffgehalt, Mangangehalt
- Bestand [BT]: Mangangehalt, Hangneigung, C/N-Verhältnis

Tab. 47: Übersicht über Zustandsparameter des Berglandes mit relevantem ökologischem Aussagewert bezüglich der untersuchten Gruppen.

	Oh-Horizont				Mineralboden 0-5 cm				Oh-Horizont + Mineralboden 0--30 cm			
	LF+SFG+BT	LF	SFG	BT	LF+SFG+BT	LF	SFG	BT	LF+SFG+BT	LF	SFG	BT
C	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,046*	.	.
N	.	.	.	.	.	.	.	.	0,023*	0,009*	0,030*	.
Ca	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Mg	0,054*	.	0,024*	.	0,104	.	0,067*	.	.	.	.	.
K	.	.	0,031*	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Na	.	0,022*	.	.	.	0,010*	0,076*	.	.	.	.	.
Mn	.	.	.	0,006*	.	.	.	0,007*	0,007*	.	0,036*	0,001*
Al	.	.	.	.	0,117	.	.	.	.	.	.	.
Fe	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
AK_e	0,035*	.	0,015*	.	0,024*	.	.	.	0,002*	0,024*	0,008*	.
BS	.	.	.	.	.	0,081*	0,100	.	.	.	.	.
BSV	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
C/N	0,017*	.	.	< 0,001*	.	.	.	0,028*	.	.	.	0,105
pH(KCl)	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Horizont	.	0,017*	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Wurzeln	.	.	.	0,091*	.	.	.	0,023*	.	.	.	.
Hang	.	0,032*	.	.	.	0,033*	.	.	.	0,032*	.	0,036*
CV	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,040*	.	.
NV	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,020*	.	.

*Signifikante Unterschiede mit $P < 0,05$ getestet durch ANOVA; dargestellt sind entweder alle signifikanten oder mindestens drei Ergebnisse mit höchster Aussagekraft. Gruppen: LF + SFG + BT, Auswertungseinheit; LF = Lokalbodenform; SFG = Standortsformengruppe; BT = Bestandestyp. Parameterauswahl: Gehalte von Kohlenstoff, Stickstoff, Calcium, Magnesium, Kalium, Natrium, Mangan, Aluminium und Eisen; BS = Basensättigung; BSV = Basenvorrat; C/N = C/N-Verhältnis; Horizont = Horizontmächtigkeit; Mächtigkeit = Oh-Horizontmächtigkeit; Wurzeln = Durchwurzelungsintensität der Feinwurzeln; Hang = Hangneigung; CV = Kohlenstoffvorrat; NV = Stickstoffvorrat.

Das Testgebiet Hügelland zeigte im Vergleich zum Bergland für weitaus mehr Parameter signifikante Effekte (Tab. 48). Die Identifizierung von Parametern für die einzelnen Gruppen zwischen den Kompartimenten Oh-Horizont, Mineralboden sowie Oh-Horizont + Mineralbonden (0-30 cm) war für alle Einheiten erfolgreich. Besonders gut ließen sich die Lokalbodenformen in Kombination mit dem Oh-Horizont + Mineralboden (0-30 cm) anhand der identifizierten Parameter erklären. Entscheidend für die Beschreibung der Zustandseigenschaften scheint v.a. die Hangneigung zu sein.

Folgende drei in ihrer Wichtigkeit geordnete Parameter beschreiben die Zustandseigenschaften des Oh-Horizonts am besten:

- Auswertungseinheit [= LF + SFG + BT]: Hangneigung, pH(KCl), Aluminiumgehalt
- Lokalbodenform [LF]: Hangneigung, Oh-Horizontmächtigkeit, effektive Austausch-kapazität
- Standortsformengruppe [SFG]: Oh-Horizontmächtigkeit, Hangneigung, Eisengehalt
- Bestand [BT]: Calciumgehalt, pH(KCl), Eisengehalt

Folgende drei in ihrer Wichtigkeit geordnete Parameter beschreiben die Zustandseigenschaften des Mineralbodens (0-5 cm) am besten:

- Auswertungseinheit [= LF + SFG + BT]: Hangneigung, Eisengehalt, Kohlenstoffgehalt
- Lokalbodenform [LF]: Hangneigung, Eisengehalt, Kohlenstoffgehalt
- Standortsformengruppe [SFG]: Eisengehalt, Hangneigung, Kohlenstoffgehalt
- Bestand [BT]: Calciumgehalt, Aluminiumgehalt und pH(KCl)

Folgende drei in ihrer Wichtigkeit geordnete Parameter beschreiben die Zustandseigenschaften des Oh-Horizonts + Mineralbodens (0-30 cm) am besten:

- Auswertungseinheit [= LF + SFG + BT]: Hangneigung, Kohlenstoffvorrat, Natriumgehalt
- Lokalbodenform [LF]: Hangneigung, Kohlenstoffvorrat, Natriumgehalt
- Standortsformengruppe [SFG]: Kohlnestoffvorrat, Natriumgehalt, Magnesiumgehalt
- Bestand [BT]: Natriumgehalt, Eisengehalt, C/N-Verhältnis

Tab. 48: Übersicht über Zustandsparameter des Hügellandes mit relevantem ökologischem Aussagewert bezüglich der untersuchten Gruppen.

	Oh-Horizont				Mineralboden 0-5 cm				Oh-Horizont + Mineralboden 0-30 cm			
	LF+SFG+BT	LF	SFG	BT	LF+SFG+BT	LF	SFG	BT	LF+SFG+BT	LF	SFG	BT
C	.	.	.	0,025*	0,006*	.	.	0,007*	.	.	0,023*	.
N	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Ca	0,005*	.	.	< 0,001*	0,004*	.	.	< 0,001*	.	.	.	.
Mg	.	.	.	.	.	.	.	.	0,049*	0,025*	0,021*	.
K	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Na	.	.	.	.	.	.	.	.	0,023*	0,009*	0,003*	0,015*
Mn	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Al	0,004*	.	.	0,027*	0,014*	.	.	< 0,001*	.	.	.	.
Fe	.	.	0,082	0,016*	0,040*	0,011*	0,003*	0,026*	.	.	.	0,046*
AK_e	0,005*	0,049*	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
BS	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
BSV	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
C/N	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,052
pH(KCl)	0,003*	.	.	< 0,001*	0,001*	.	.	< 0,001*	.	.	.	.
Horizont	.	0,019*	0,008*	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Wurzeln	.	.	.	.	.	.	.	0,013*	.	.	.	.
Hang	< 0,001*	< 0,001*	0,037*	.	< 0,001*	< 0,001*	0,046*	.	< 0,001*	< 0,001*	0,046*	.
CV	.	.	.	.	0,016*	.	.	0,002*	0,017*	0,006*	0,002*	.
NV	.	.	.	.	0,011*	0,043*	0,036*	0,014*	0,043*	.	0,033*	.

*Signifikante Unterschiede mit $P < 0,05$ getestet durch ANOVA; dargestellt sind entweder alle signifikanten oder mindestens drei Ergebnisse mit höchster Aussagekraft. Gruppen: LF + SFG + BT, Auswertungseinheit; LF = Lokalbodenform; SFG = Standortsformengruppe; BT = Bestandestyp. Parameterauswahl: Gehalte von Kohlenstoff, Stickstoff, Calcium, Magnesium, Kalium, Natrium, Mangan, Aluminium und Eisen; BS = Basensättigung; BSV = Basenvorrat; C/N = C/N-Verhältnis; Horizont = Horizontmächtigkeit; Mächtigkeit = Oh-Horizontmächtigkeit; Wurzeln = Durchwurzelungsintensität der Feinwurzeln; Hang = Hangneigung; CV = Kohlenstoffvorrat; NV = Stickstoffvorrat.

Im Tiefland wurden nur die Auswertungseinheit und die Standortsformengruppe untersucht, da zum einen keine unterschiedlichen Bestände betrachtet worden sind und zum anderen die Kombination von Lokalbodenform und Standortsformengruppe (mit Ausnahme von NeS_TM2_Ki und BkS_TM2_Ki) keine zusätzlichen Gruppen ergab (Tab. 49). Trotz der Fülle der identifizierten Parameter für den Oh-Horizont waren diese kaum mit denen des Mineralbodens (0-5 cm) oder des Kompartiments Oh-Horizont + Mineralboden (0-30 cm) identisch. So fanden sich im Vergleich zum Mineralboden (0-5 cm) kaum signifikante Parameter in der Standortsformengruppe. Insgesamt lassen sich die Auswertungseinheiten am besten im Mineralboden (0-5 cm) und die Standortsformengruppen im Oh-Horizont differenzieren. Das Kompartiment Oh-Horizont + Mineralboden (0-30 cm) ist für die Beschreibung von Zustandseigenschaften im Tiefland ungeeignet.

Folgende drei in ihrer Wichtigkeit geordnete Parameter beschreiben die Zustandseigenschaften des Oh-Horizonts am besten:

- Auswertungseinheit [= LF + SFG + BT]: C/N-Verhältnis, Stickstoffgehalt, Durchwurzelungsintensität mit Feinwurzeln
- Standortsformengruppe [SFG]: Oh-Horizontmächtigkeit, Kaliumgehalt, Durchwurzelungsintensität mit Feinwurzeln

Folgende drei in ihrer Wichtigkeit geordnete Parameter beschreiben die Zustandseigenschaften des Mineralbodens (0-5 cm) am besten:

- Auswertungseinheit [= LF + SFG + BT]: Aluminiumgehalt, Kohlenstoffgehalt, effektive Austauschkapazität
- Standortsformengruppe [SFG]: Aluminiumgehalt, Kohlenstoffgehalt, Natriumgehalt

Folgende drei in ihrer Wichtigkeit geordnete Parameter beschreiben die Zustandseigenschaften des Oh-Horizonts + Mineralbodens (0-30 cm) am besten:

- Auswertungseinheit [= LF + SFG + BT]: Mangangehalt, Aluminiumgehalt, Magnesiumgehalt
- Standortsformengruppe [SFG]: Magnesiumgehalt, Eisengehalt, Natriumgehalt

Tab. 49: Übersicht über Zustandsparameter des Tieflandes mit relevantem ökologischem Aussagewert bezüglich der untersuchten Gruppen.

	Oh-Horizont				Mineralboden 0-5 cm				Oh-Horizont + Mineralboden 0-30 cm			
	LF+SFG+BT	LF	SFG	BT	LF+SFG+BT	LF	SFG	BT	LF+SFG+BT	LF	SFG	BT
C	.	.	.	.	0,009*	.	0,060	.	.	.	.	.
N	0,013*	.	.	.	0,020*	.	.	.	.	.	.	.
Ca	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Mg	.	.	.	.	0,019*	.	.	.	0,046*	.	0,015*	.
K	0,043*	.	0,019*	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Na	.	.	0,041*	.	0,019*	.	0,064	.	.	.	0,043*	.
Mn	0,048*	.	0,036*	.	.	.	.	.	0,018*	.	.	.
Al	.	.	.	.	0,001*	.	0,004*	.	0,035*	.	.	.
Fe	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,034*	.
AK_e	.	.	.	.	0,011*	.	.	.	.	.	.	.
BS	.	.	.	.	0,030*	.	.	.	.	.	.	.
BSV	.	.	.		0,016*	.	.	.	.	.	.	.
C/N	0,007*	.	0,026*	.	0,040*	.	.	.	.	.	.	.
pH(KCl)	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Horizont	0,044*	.	0,018*	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Wurzeln	0,032*	.	0,020*	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Hang	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
CV	.	.	0,033*	.	.	.	.	.	.	.	.	.
NV	.	.	0,016*	.					.	.	.	.

*Signifikante Unterschiede mit $P < 0,05$ getestet durch ANOVA; dargestellt sind entweder alle signifikanten oder mindestens drei Ergebnisse mit höchster Aussagekraft. Gruppen: LF + SFG + BT, Auswertungseinheit; LF = Lokalbodenform; SFG = Standortsformengruppe; BT = Bestandestyp; Parameterauswahl: Gehalte von Kohlenstoff, Stickstoff, Calcium, Magnesium, Kalium, Natrium, Mangan, Aluminium und Eisen; BS = Basensättigung; BSV = Basenvorrat; C/N = C/N-Verhältnis; Horizont = Horizontmächtigkeit; Mächtigkeit = Oh-Horizontmächtigkeit; Wurzeln = Durchwurzelungsintensität der Feinwurzeln; Hang = Hangneigung; CV = Kohlenstoffvorrat; NV = Stickstoffvorrat.

6.2 Validierung der Zustandsparameter für die Testgebiete

Ob die in Kapitel 6.1 identifizierten Parameter die angestrebten Gruppierungen ergeben, wurde durch eine kanonische Diskriminanzanalyse (CDA) überprüft (Kapitel 2.7.5). Falls durch die CDA eine genaue Trennung der Gruppen erfolgt, können die zugrundeliegenden Zustandsparameter als Indikatoren zur Beschreibung dieser Gruppe dienen.

Im Testgebiet Bergland konnten die ausgewählten Parameter zur Bewertung der Auswertungseinheit [= LF + SFG + BT] mehr Varianz im Oh-Horizont erklären, als die Parameter im Mineralboden (Abb. 85). In beiden Kompartimenten erklärte jeweils die erste kanonische Variable die meiste Varianz. Die Buchenstandorte ließen sich im Oh-Horizont im Gegensatz zum Mineralboden gut abtrennen. Weiterhin ließen sich im Oh-Horizont zwei von drei mineralischen Nassstandorten abgrenzen. Die verbleibenden Punkte zentrierten sich ungeordnet im Grafikmittelpunkt. Im Mineralboden streuten die Punkte über den gesamten Bereich.

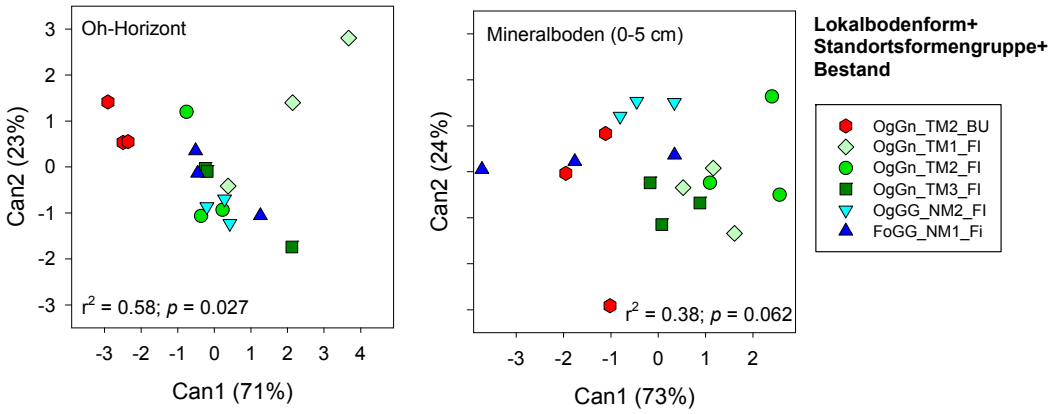

Abb. 85: Verteilung der kanonischen Variablen im Oh-Horizont und Mineralboden des Berglands für die entsprechenden Auswertungseinheiten.

Wird die Auswerteeinheit in ihre einzelnen Bestandteile aufgespalten, zeigt sich ebenfalls sowohl für den Oh-Horizont als auch für den Mineralboden eine sehr heterogene Verteilung. Die Standortsformengruppe im Oh-Horizont konnte weitaus mehr Varianz erklären als die Lokalbodenform oder der Bestand (Abb. 86). Dennoch ließen sich mit der CDA nur die feuchten Standorte von der Gesamtstichprobe abtrennen. Die Lokalbodenformen zeigten eine Abspaltung der unvernässten Standorte von den mineralischen Nassstandorten. Die Betrachtung des Bestandestyps ergab für die erste kanonische Variable eine erklärte Varianz von nur 34 %, was dennoch zur Separierung der Buchenstandorte ausreichte.

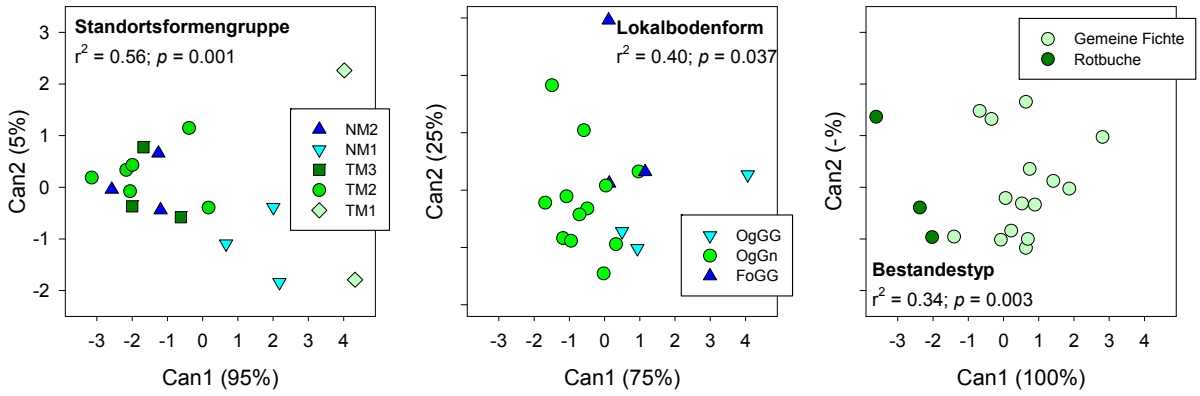

Abb. 86: Verteilung der kanonischen Variablen im Oh-Horizont des Berglands für Standortsformengruppe, Lokalbodenform und Bestandestyp.

Die zweite kanonische Variable der Standortsformengruppe im Mineralboden erklärte zwar mehr Varianz als im Oh-Horizont, eine Abspaltung bestimmter Standortsformengruppen konnte jedoch nicht erzielt werden (Abb. 87). Es zeigte sich, dass sie feuchtere Standorte im Grafikmittelpunkt liegen, während die trockneren Standorte stärker streuen. Die Unterteilung in Lokalbodenformen ergab, dass sich die meisten unvernässten Standorte (OgGn) abspalteten und eine eigene Gruppe bilden. Die Bestandestypen ließen sich hingegen im Mineralboden nur schlecht unterscheiden.

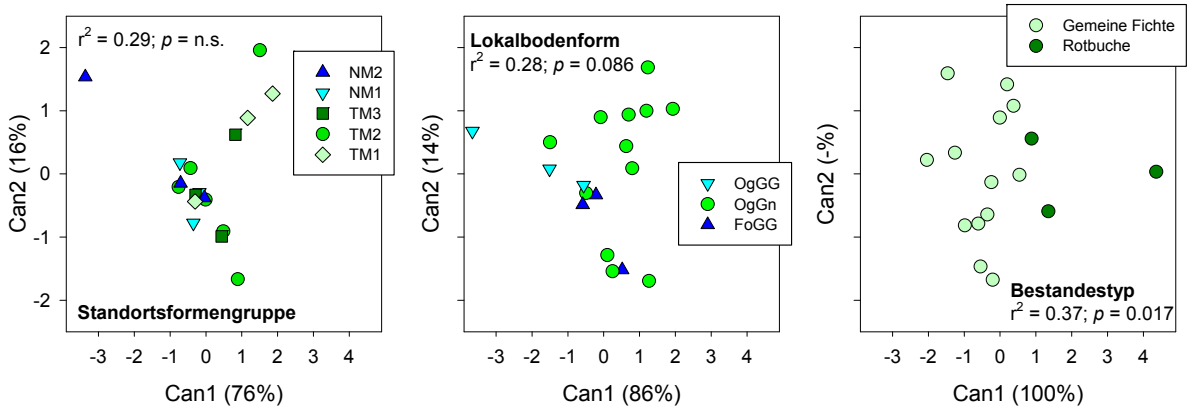

Abb. 87: Verteilung der kanonischen Variablen im Mineralboden des Berglands für Standortsformengruppe, Lokalbodenform und Bestandestyp.

Die erklärte Varianz im Testgebiet Hügelland lag in beiden untersuchten Kompartimenten > 60 %, obschon im Mineralboden ein größerer Zusammenhang festgestellt werden konnte (Abb. 88). Dennoch ergab sich sowohl für den Oh-Horizont als auch für den Mineralboden ein heterogenes Verteilungsmuster hinsichtlich einer Gruppenbildung der Standorte. Im Oh-Horizont bildeten sich nur drei Cluster heraus, die aus einer großen heterogenen und zwei kleinen homogenen Gruppen bestanden. Eine klare Aussage kann daher nicht erfolgen. Im Mineralboden hingegen bildeten sich 4 relativ deutlich abgrenzbare Cluster heraus. So zeigten sich Gruppierung mit folgender Zusammensetzung: (1) Eichenstandorte (GbLB_TM2, GbLU_WM2), (2) HwLL-Standorte,

(3) Fichtenstandorte (GbLU_WM2, GbLG_NM2), (4) Fichtenstandorte (GbLB_TM2). Allerdings fand sich auch für den Mineralboden kein Zusammenhang zwischen den aktuellen Zustandseigenschaften und den Stammeigenschaften der Auswertungseinheit.

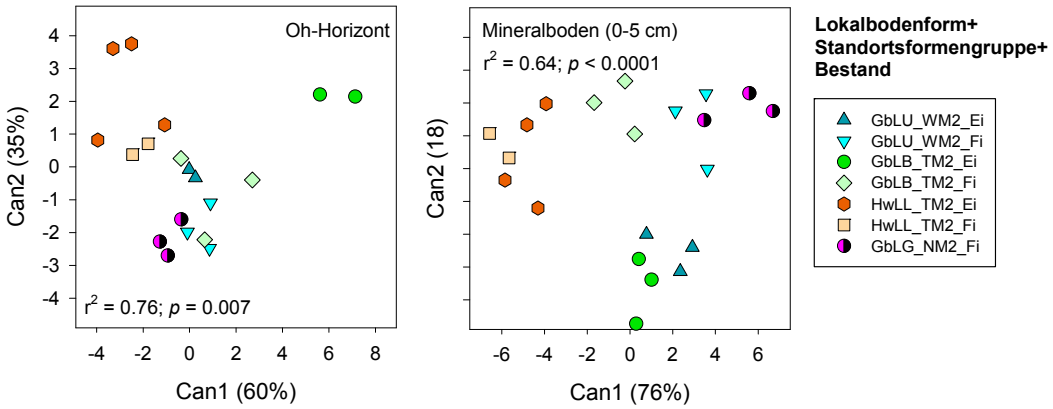

Abb. 88: Verteilung der kanonischen Variablen im Oh-Horizont und Mineralboden des Hügellands für die entsprechenden Auswertungseinheiten.

Die Darstellung der kanonischen Variablen für die Standortsformengruppe, die Lokalbodenform und den Bestand im Oh-Horizont zeigt eine eindeutigere Clusterbildung als für die alles integrierende Auswertungseinheit (Abb. 89). So lassen sich die mineralischen Nassstandorte und wechselfeuchten Standorte von den unvernässten Formen separieren. Die Lokalbodenformen konnten in die Gruppe der typischen Braunerden (HwLL), in die Gruppe der Übergangsformen zum Staugley (GbLB) und in die Gruppe der Stauwasserböden (GbLU, GbLG) aufgeteilt werten. Bei den GbLB-Standorten wird deutlich, dass anhand der getesteten Parameter die Zuordnung der aktuellen Zustandseigenschaften einerseits sehr gut möglich war, andererseits jedoch einige Standorte dieser Gruppe entweder eher in die Gruppe der feuchten oder in die Gruppe der trockenen Standorte tendierte. Die Bestandestypen ließen sich trotz des geringen Anteils erklärter Varianz sehr gut in Eichen und Fichtenstandorte trennen.

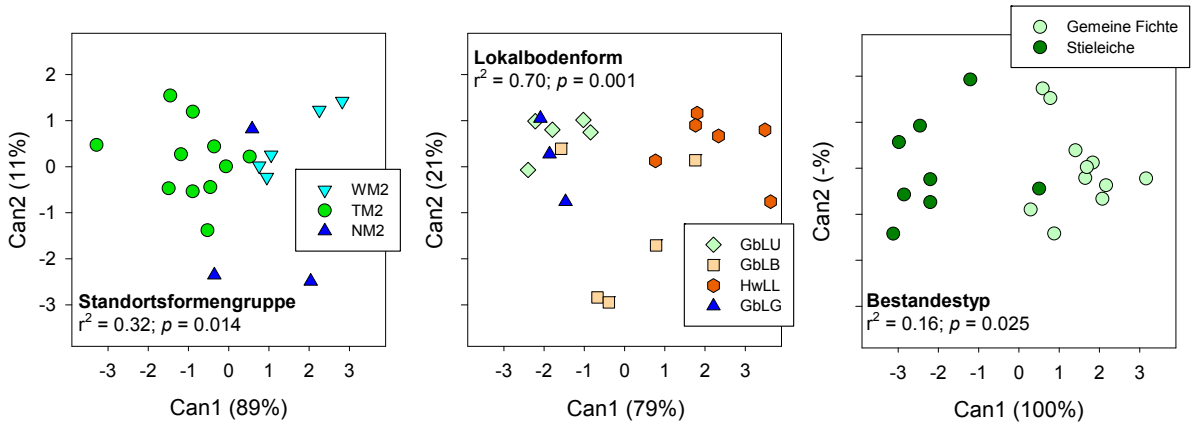

Abb. 89: Verteilung der kanonischen Variablen im Oh-Horizont des Hügellands für Standortsformengruppe, Lokalbodenform und Bestandestyp.

Die Zerlegung der Auswertungseinheit in ihre Einzelkomponenten zeigt für den Mineralboden ein verändertes Bild im Vergleich zum Oh-Horizont (Abb. 90). Die Standortsformengruppen lassen sich ähnlich wie im Oh-Horizont in unvernässte terrestrische sowie in wechelsfeuchte/vernässte Standorte unterteilen. Bei den Lokalbodenformen ergab sich ebenfalls eine Zerlegung in eher trockene und in feuchte Standorte. Allerdings umfasste der Übergangsbereich zwischen beiden Clustern neben den GbLB-Standorten auch GbLU-Standorte, die sich im Oh-Horizont sehr gut zu den feuchten Standorten zuordnen ließen. Ähnlich wie im Oh-Horizont bildeten die Fichten- und die Eichenbestände deutlich getrennte Gruppen.

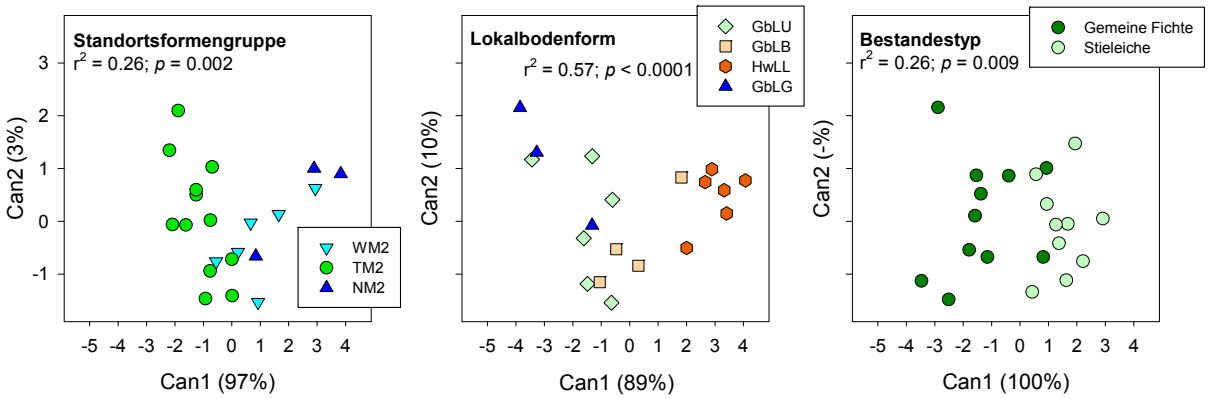

Abb. 90: Verteilung der kanonischen Variablen im Mineralboden des Hügellands für Standortsformengruppe, Lokalbodenform und Bestandestyp.

Für das Tiefland konnten für den Oh-Horizont und den Mineralboden > 50 % der Varianz durch die kanonischen Variablen erklärt werden (Abb. 91). Teilweise gelang die Gruppierung der Standorte für beide Kompartimente. Im Oh-Horizont ließen sich lediglich die WpSU-Standorte nicht von den ScSG-Standorten trennen, obwohl sie durch einen gegensätzlichen Wasserhaushalt geprägt sind. Die Trennung der WpSU-Standorte von den ScSG-Standorten ließ sich im Mineralboden erzielen. Trotz unterschiedlicher Nährkraft gruppierten sich im Mineralboden BiS- und NeS-Standorte. In diese Gruppe fielen auch die vernässten ScSG-Standorte.

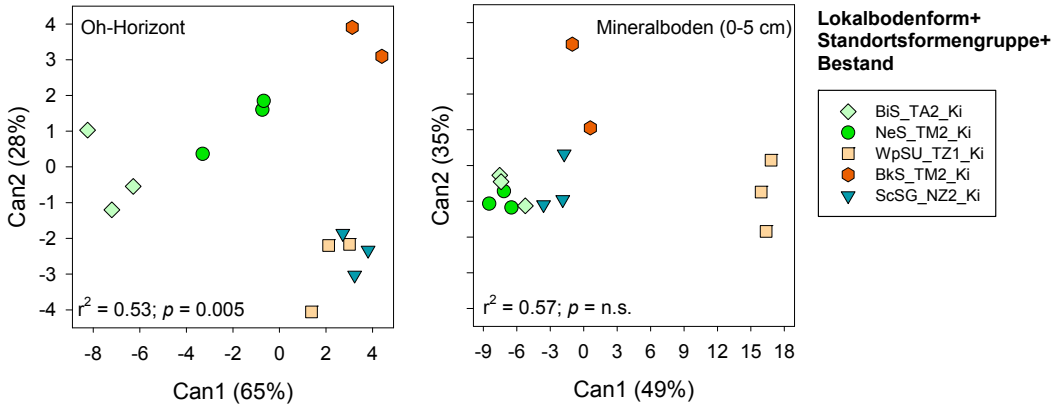

Abb. 91: Verteilung der kanonischen Variablen im Oh-Horizont und Mineralboden des Tieflands für die entsprechenden Auswertungseinheiten.

Für die Lokalbodenformen des Tieflands wurde keine CDA durchgeführt, da sich bis auf die Lokalbodenformen NeS und BkS keine weiteren Gruppen ergeben würden. Ebenfalls nicht durchgeführt wurde die Auswertung der Bestandesdaten, da die ausgewählten Tieflandstandorte ausschließlich von Kiefernbeständen geprägt sind. Die Auswertung der Standortsformengruppe ergab für den Oh-Horizont eine weniger deutlich ausgeprägte Abgrenzung von Standorten als für den Mineralboden (Abb. 92). Allerdings lag der Anteil der erklärten Varianz für den Oh-Horizont etwas über der des Mineralbodens. Die Verteilung der ziemlich armen Standorte im Oh-Horizont unterscheidet sich von der der armen und mittleren Standorte. Allerdings unterschieden sich die armen von den mittleren Standorten in ihrer Verteilung kaum. Im Mineralboden wiederum bildeten nur die ziemlich nährstoffarmen unvernässten Standorte ein separates eigenes Cluster. Eine weitere Unterscheidung war nicht möglich.

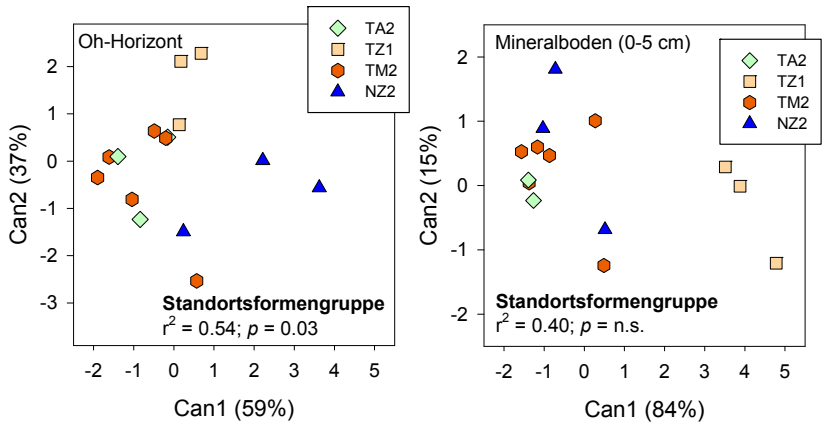

Abb. 92: Verteilung der kanonischen Variablen im Oh-Horizont und Mineralboden des Tieflands für die Standortsformengruppe.

6.3 Vitalitäts- und wachstumsstimulierende Parameter

6.3.1 Nährstoffversorgung und Bodenversauerung

Zu den Hauptnährelementen gehören nach abnehmenden Gehalten in der Pflanze Stickstoff, Kalium, Calcium, Magnesium, Phosphor und Schwefel (Augusto et al. 2002). Die Pflanzennährstoffe entstammen überwiegend dem Ausgangsgestein, sie können jedoch auch durch Düngung, durch die Atmosphäre oder durch hoch anstehendes Grundwasser in die Böden gelangen. Die in der Bodenlösung enthaltene direkt pflanzenverfügbare Menge an Nährelementen ist jedoch im Vergleich zur Gesamtmenge klein. Die an Feststoffe gebundenen Nährelemente liegen in unterschiedlich starken Bindungsformen vor und müssen erst mobilisiert werden. Ihre Verfügbarkeit hängt von verschiedenen Faktoren ab. Von großer Bedeutung ist dabei die Rate der Nachlieferung durch Verwitterung aus dem Vorrat der Feststoffe in die Lösungsphase, aber auch umgekehrt, d.h. von der Rate der Festlegung gelöster Anteile. Der Umsatz von Kationen, d.h. der Kreislauf von Aufnahme und Abgabe ist für jedes Element unterschiedlich. So war in einer Studie von Horn (1994) der Calciumumsatz unter Fichtenbeständen auf Granit doppelt so hoch wie der von Kalium und überstieg sogar das Fünffache des Magnesiumumsatzes. Der Austrag durch Auswaschung ist jedoch für alle Elemente gleich groß. Die Verwitterung z.B. von Granit und damit der Nachschub an basisch wirkende Kationen erfolgt jedoch sehr langsam, was wiederum mit einer Abnahme des pH-Wertes und damit mit entsprechenden Schäden am Bestand einhergeht (z.B. Wurzelschädigung).

Allerdings sind wesentliche Steuerungsgrößen der Verwitterungsraten von Bodenmineralen der pH-Wert (Drever 1994) und die DOC (gelöste organische Substanz) Bodenkonzentration (Raulund-Rasmussen et al. 1998). Einige Studien zeigten, dass Standorte unter *Picea abies* saurer und 2 bis 3 mal mehr DOC oder niedrigmolekulare organische Komplexbildner in der Bodenlösung aufwiesen als Standorte unter *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* oder *Quercus robur* (Augusto und Ranger 2001, Raulund-Rasmussen et al. 1998, Strobel et al. 1999). Somit beeinflusst die Baumart den pH-Wert und die Zusammensetzung der Komplexbildner in der Bodenlösung, was wiederum die Verwitterungsraten und damit die Freisetzung von physiologisch wichtigen Pflanzennährstoffen fördert. Dieser Effekt ist jedoch ausschließlich auf den Oberboden (Augusto et al. 2000) oder auf den durchwurzelten Bereich beschränkt (Courchesne und Gobran 1997). Eine Limitierung des Baumwachstums durch fehlende Nährstoffe wird gewöhnlich durch einen Mangel von Stickstoff Calcium, Magnesium oder Kalium verursacht (Landmann et al. 1995). Als Zentralatom des Chlorophylls spielt Magnesium eine wichtige Rolle bei der Photosynthese. Eine unzureichende Magnesiumversorgung kann zur sog. Chlorose führen, was zur Gelbfärbung älterer Blätter oder zum frühen Abwerfen von Nadeln führen kann. Magnesiummangel kann weiterhin des Wachstums infolge einer Hemmung der Zellteilung stören sowie das Austrocknung der Knospen oder das Absterben von Wurzelspitzen bewirken. Ein Mangel an Kalium kann zu einem reduzierten Wachstum und zu einer erhöhten Wiedermobilisierung von älteren Organen

führen. Außerdem wird das Austrocknung von Knospenspitzen und das frühzeitige Welken älterer Blätter durch Kaliummangel induziert.

Die geographische Verteilung des Stickstoffeintrags ist sowohl in Bezug auf dessen chemische Zusammensetzung als auch im Betrag variabel. Bei geringen Einträgen auf sauren Standorten sind es v.a. Pilze, die organischen Stickstoff via Protease (die speziell bei niedrigen pH-Werten durch Pilze realisiert wird) pflanzenverfügbar bereitstellen. Generell benötigen Pilze mehr Stickstoff als Pflanzen um ihre Zellstruktur aufzubauen (Schulze et al. 2005). Mit dem Abbau von Lignin durch Pilze wird DOC durch das Sickerwasser zusammen mit Kationen im Boden verlagert. Hierdurch wird die Bodenversauerung vorangetrieben, was wiederum die Umweltbedingungen für die saure Protease fördert. Ein Überangebot an Ammonium und Nitrat hat zur Folge, dass mehr Kationen (v.a. K^+ und Al^{3+}) aus den Tonmineralen entweichen. Im Vergleich zum relativ immobilen Ammonium ist Nitrat nicht an Austauscher gebunden und bleibt somit in der Bodenlösung mobil. Die Auswaschung von Nitrat geht jedoch mit einem Verlust an basisch wirkenden Kationen einher, was zu einer Mangelversorgung des Bestandes führen kann (Durka et al. 1994). In den Testgebieten ist Stickstoff aufgrund atmogener Stoffeinträge kein Mangelelement. Kaliummangel kann ebenfalls ausgeschlossen werden. Er tritt eher in sehr dichten Beständen und auf kalkhaltigen Substraten in Kombination mit Trockenheit auf (Landmann et al. 1995). Calcium- und Magnesiummangel sind ebenfalls bei Trockenheit und dichten Bestände häufig, jedoch insbesondere mit sehr saurem Ausgangsgestein assoziiert (Schulze und Kopp 1995). Darüber hinaus wird Calcium- und Magnesiummangel durch die Bodenversauerung und den Nährstoffumsatz gesteuert, zumal einige Nadelbaumarten die Fähigkeit besitzen den Umsatz an Nährstoffen an einem Standort aufgrund minderer Streuqualität und schlecht abbaubarer abgestorbener Wurzeln (z.B. Lignin/Stickstoff-Verhältnis, Härtegrad) zu reduzieren. Darüber hinaus produziert die Streu spezielle organische Komponenten (z.B. komplexierende Säuren, giftige-wirkungshemmende Bestandteile, etc.), weshalb der ReinBestandesanbau von säurewirksamen Baumarten und von Baumarten, die den Nährstoffumsatz begrenzen, auf sehr sauren Standorten kritisch ist (Augusto et al. 2002).

Die aufgeführten Mangelindikatoren dürften v.a. für das Testgebiet Tiefland bzw. für das Niederlausitzer-Altmoränenland sowie in Teilen für das Elbsandsteingebirge und Teile des Vogtlands relevant sein, da hier auf einem sehr nährstoffarmen Ausgangssubtrat Kiefernbestände stocken. Dennoch kann die Bereitstellung von Nährkationen durch die Bewirtschaftung beeinflusst werden, indem z.B. gemischte Bestände mit gutem Pflegezustand angestrebt werden, wodurch der Streuabbau stimuliert und somit ein verbessertes Nährstoffangebot erreicht wird. Nadelbäume besitzen eine Streu, die nur schwer abbaubar ist. Durchforstungseingriffe in Nadelwaldbeständen auf Böden mit geringen Nährstoffvorräten bewirken eine Erhöhung des Lichteinfalls und fördern damit gleichzeitig die Abbautätigkeit der Mikroflora und erhöhen somit den stofflichen Umsatz (Augusto et al. 2002). Eine mögliche Mangelsituation von Fichtenbeständen in den mittleren und höheren Mittelgebirgslagen wird bereits durch die Bodenschutzkalkung unterbunden. Während der BZE I lagen die pH-Werte und die Basensättigung auf sehr niedrigem Niveau. Durch die Bodenschutzkalkung wurden diese deutlich

angehoben. Für die Verjüngung, den Erhalt der Fichtenbestände und den Umbau in Bergmischwaldbestände wird es auch weiterhin notwendig sein, Standorte zu kalken, um Mangelsituationen vorzubeugen.

Die Höhe des Nährstoffentzugs durch die Pflanzen ist neben klimatischen Einflüssen von der Baumart und dessen Ertrag abhängig. Einige Standorte (v.a. im Tiefland) sind potentiell nicht in der Lage in ausreichender Menge essentielle Elemente für ein entsprechendes Wachstum bereitzustellen. Hinzu kommt, dass es durch die Industrialisierung, den Verkehr und die Landwirtschaft zur Freisetzung säurebildender Schwefel- und Stickstoffverbindungen kommt, wodurch sich der natürliche Prozess der Versauerung noch verstärkt hat. Andererseits führten Aufbasungen durch Asche- und Kalkstäube zur Veränderung des Nährstoffgleichgewichts und durch eine zunehmende Stickstofffracht in den Depositionen zu Standortveränderungen in den Böden. Die mit Nährkationen ausgestatteten Böden außerhalb der Mittelgebirge und der sandigen Altmoränengebiete sind aufgrund ihrer Lithologie bisher in der Lage den Eintrag von Säuren aufzufangen und auszugleichen. Im Testgebiet Bergland bzw. in den mittleren und hohen Lagen der Mittelgebirge wurden viele Standorte bereits einer Bodenschutzkalkung unterzogen, um einer weitere Versauerung vorzubeugen bzw. die Ernährungssituation der Bestände durch Bereitstellung von Nährkationen zu verbessern. Hier kann von einer mangelfreien Nährstoffversorgung der Bäume ausgegangen werden. Im Testgebiet Tiefland bzw. im Niederlausitzer-Altmoränenland sowie in Teilen des Elbsandsteingebirges und des Vogtlandes ist aufgrund der geologisch bedingt schwächer ausgestatteten Bodensubstrate die Pufferkapazität der Böden für Säurebildner z.T. so weit erschöpft, dass es örtlich zu einer säurebedingten Nährstoffverarmung und Freisetzung phytotoxischer Stoffe wie z.B. Aluminiumionen kommen kann. Der Säurezustand ist daher eine zentrale Steuergröße, die unmittelbar einen Großteil der im Boden ablaufenden biologischen, chemischen und physikalischen Prozesse steuert. Er ist somit für die Lebensbedingungen der Bodenorganismen und die Verfügbarkeit der Nährstoffe von eminenter Bedeutung. Auf Regionen mit nährstoffarmen Ausgangssubstraten sollte daher ein größeres Augenmerk gelegt werden, um negative Effekte für das Baumwachstum zu vermeiden.

Untersuchungen von Binkley und Valentine (1991) und Nordén (1994) zeigten, dass der pH-Wert von der Baumartenzusammensetzung des Bestandes beeinflusst wird So war der pH-Wert des Oberbodens unter *Picea abies u*nd *Pinus sylvestris* signifikant niedriger als unter *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* oder *Quercus robur*. Der Einfluss von Nadelbäumen wie *Picea abies* oder *Pinus sylvestris* auf die Versauerung von Waldstandorte hat u.a. folgende Gründe: (I) die höhere Aufnahmekapazität von atmosphärischen Stoffeinträgen, die per se versauernd wirken (Augusto et al. 2002); (II) die Säurewirksamkeit der Streu (Alriksson und Eriksson 1998, Ovington 1953); (III) der Umfang der Protonen die mittels Wurzeln durch Kationen eingetauscht werden (Matzner und Ulrich 1983); oder (IV) die Modifizierung des Mikroklimas durch die unterschiedliche Dichte der Bestände (Crozier und Boerner 1984, Nihlgård 1969). Veränderungen des pH-Wertes können die biochemischen Prozesse in Waldökosystemen dramatisch beeinflussen. Daher sollte der ReinBestandesanbau von Nadelbaumarten wie *Picea abies* oder *Pinus sylvestris* auf Standorten

mit geringer Säurenneutralisationskapazität kritisch geprüft werden, um Boden und Wasser vor einer Versauerung zu schützen (Augusto et al. 2002). Als zuverlässiger und leicht bestimmbarer Indikator gilt der pH-Wert der Bodenlösung. Um einen stabilen Wert des Säurepotentials ohne saisonale Schwankungen zu erzielen, wurden in dieser Studie für die Auswertung pH(KCl)-Werte verwendet. Allerdings wird die austauschbare Acidität nicht vollständig in einer salzhaltigen Suspension erfasst (Block et al. 2000). Zur Abschätzung der Dynamik der Versauerung ist die Belegung der Bodenaustauscher mit Basen-Kationen ebenfalls von Bedeutung. Daher wurde die Basensättigung ebenfalls in die Auswertung Integriert.

Eine Abnahme der Pufferkapazität kann auch mit einem konstanten pH-Wert einhergehen, da dieser lediglich eine Intensitätsgröße darstellt (Ulrich 1988). Um die Pufferkapazität als Faktor für die ökologische Bewertung aufgreifen zu können, wurde angenommen, dass sich die kurzfristige Pufferkapazität im Boden aus dem Vorrat an austauschbaren Basen (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}) ergibt. Der pH(KCl)-Wert, die Basensättigung und der Basenvorrat wurden letztendlich als Parameter identifiziert, die den Boden-Säure-Zustand der ausgewählten Standorte hinreichend charakterisieren.

6.3.2 Organische Bodensubstanz

Stickstoff ist nur in geringen Mengen im Ausgangsgestein vorhanden. Der überwiegende Teil dieses Hauptnährelements stammt jedoch aus der Atmosphäre und wird erst im Boden durch biologische Stickstoffbindung in organischer Form bereitgestellt. Der Gesamt-Stickstoffgehalt steht in enger Beziehung zum Gehalt an organischem Kohlenstoff. Die Gültigkeit des C/N-Verhältnisses als Rahmenwert zur Beurteilung der Zustandseigenschaften erscheint aufgrund anthropogener Immissionen von Stickoxiden und Ammoniak jedoch eingeschränkt. Darüber hinaus erfolgte im Testgebiet Tiefland ein längerfristiger Einfluss von Flugaschen auf bodenchemische Eigenschaften (Klose und Makeschin 2004). Dennoch ist das C/N-Verhältnis ein nützlicher Parameter um die mikrobielle Zersetzbarkeit der organischen Substanz bzw. die biologische Bodenaktivität und Humusqualität zu beurteilen (v. Zezschwitz 1985). Daher kann er als Indikator für die Stabilität der organischen Substanz herangezogen werden (Sikora et al. 1996). Je enger das C/N-Verhältnis, desto höher ist der Humusumsatz und damit die Stickstoffversorgung der Bestände. Durch die anthropogen bedingt erhöhten Stickstoffeinträge wurden bereits höhere Zuwächse besonders von jungen Beständen aber auch von älteren Bäumen festgestellt. Darüber hinaus weist die Zunahme der Stickstoffgehalte in den Blättern (Hofmann 1995) und die Verengung der C/N-Verhältnisse in der organischen Auflage auf eine höhere Stickstoffversorgung der Waldökosysteme hin. Bei abnehmendem C/N-Verhältnis steigt indes die Gefahr einer Auswaschung von Nitrat aus den Waldböden (Gundersen et al. 1998). Die Funktionalität des Stickstoffkreislaufes von Waldökosystemen kann durch zu hohe Stickstoffeinträge so stark beeinflusst werden, dass die Regulierung der Stickstoffversorgung der Bäume beeinträchtigt wird.

Die Menge des gespeicherten Kohlenstoffs, und damit auch die Menge an Stickstoff, hängen u.a. vom Klima, der Vegetation, dem Grundwasser, der Durchwurzelungstiefe und der Bodenart ab (Meentemeyer und Berg 1986). Wesentliche Standortsfaktoren für die Intensität des biologischen Umsatzes von Kohlenstoff im Boden sind Bodenfeuchte und Bodenart sowie Menge und Qualität der nachgelieferten Streu. Es wird davon ausgegangen, dass durch eine erhöhte Streunachlieferung die organische Substanz der Böden erhöht wird. Studien von Raulund-Rasmussen und Vejre (1995) und Gärdenäs (1998) zeigten, dass *Picea* und *Pinus* Bestände höhere Kohlenstoffvorräte aufwiesen als unter Laubwald. Ebenfalls kann das Gewicht der organischen Auflage unter *Picea abies* doppelt so hoch sein, wie das von Laubholzarten wie *Fagus sylvatica* (Nihlgård 1971, Ovington 1954). Der Abbau der Streu wird von der Streuzusammensetzung gesteuert (Muys 1995). Die Abbaurate der Streu ist Baumartenspezifisch und wird von Faktoren wie Härtegrad, Morphologie, Lignin/Stickstoff-Verhältnis, Persistenz der Streu oder dem Gehalt wasserlöslicher Komponenten beeinflusst (Berg 1986, Gower und Son 1992). Wenn davon ausgegangen wird, dass das Lignin/Stickstoff- und das C/N-Verhältnis eng korreliert sind, kann geschlussfolgert werden, dass nur langsam abbaubare Streu ein höheres C/N-Verhältnis hat als Streu, die relativ schnell abgebaut wird.

6.3.3 Fazit zu Vitalitäts- und wachstumsstimmulierenden Parametern

Anhand relevanter Literatur wurden Parameter identifiziert, die einen dominierenden Einfluss auf die Vitalität und das Wachstum von Waldbeständen haben. Folgende standortsprägende Parameter sind relevant: Basenvorrat, Basensättigung, Kohlenstoffvorrat, C/N-Verhältnis, pH(KCl)-Wert. Die ausgewählten Parameter prägen im entscheidenden Maße die Standortsbedingungen und sind somit für das Wachstum und die Vitalität des Bestandes von Bedeutung. Die Wirkungsrichtung und Stärke der ausgewählten Zustandsparameter wird (je nach Skalenniveau) wiederum durch unterschiedlichste Faktoren beeinflusst. In viele Studien wird darauf hingewiesen, dass sich der Klimawandel zukünftig auf den Waldzustand auswirken wird. Die Stoffkreisläufe der Böden und ihr Wasserhaushalt werden direkt betroffen sein. Daher müssen aus waldbaulicher Sicht die Zustandsparameter des Standorts bei der Waldbewirtschaftung noch stärker berücksichtigt werden.

6.4 Klassifikation des Gesamtkollektivs in Bezug auf die Zustandseigenschaften

Die Clusterung von Zustandsparametern, die einen dominierenden Einfluss auf die Vitalität und das Wachstum von Waldbeständen ausüben (Kapitel 6.3) ergab unter Einbeziehung des Gesamtkollektivs (BZE- und Testgebiete) eine gute Einordnung der Testgebietsstandorte. Ähnlich den Resultaten aus der Clusternalyses in Kapitel 5.2 zeigt sich auch hier eine bessere Klassenbildung bei ausschließlicher Einbeziehung des Oh-Horizonts (Abb. 93) im Vergleich zur Gesamtbetrachtung von Oh-Horizont und Mineralboden (Abb. 94). Die Clusterung bezogen auf den Oh-Horizont war besonders gut für die Berglandstandorte ausgeprägt. Das Bergland ließ sich mit zwei größeren Gruppen von den Hügel- und Tieflandstandorten abtrennen. Möglicherweise führte die Bodenschutzkalkung der Standorte zu einer deutlichen Gruppenbildung. Während sich die meisten Tieflandstandorte in drei kleineren Clustern wiederfanden, ergab sich im Hügelland eine große zusammenhängende Gruppe (jedoch mit einer größeren Streuung der verbleibenden Hügellandstandorte). Die Testgebietsstandorte bildeten bei Einbeziehung von Oh-Horizont und Mineralboden eher kleinere Cluster, die über den gesamten Bereich des Dendrogramms streuten. Das Bergland bildete zwei größere Clustern aus, die jedoch nicht eigenständig für sich stehen, sondern sich eher in das Gesamtkollektiv integrieren ließen. Das Hügelland trennte sich in drei kleinere, voneinander separierte Gruppen auf. Am stärksten streute das Tiefland über den gesamten Bereich des Dendrogramms.

Eine auffällige Gruppenbildung hinsichtlich der Zusammensetzung des Bestandes oder der Standortsformengruppen waren weder bei ausschließlicher Betrachtung des Oh-Horizonts noch bei der Einbeziehung des gesamten Kompartiments Oh-Horizont + Mineralboden ausgeprägt. Über die Einordnung der charakteristischen Lokalbodenformen der Testgebiete in das Gesamtkollektiv der BZE-Standorte konnten keinerlei Aussagen getroffen werde, da nicht hinreichend aussagekräftige standortskundliche Informationen für diese Auswertung zur Verfügung standen. Es deutete sich jedoch an, dass die Einbeziehung des Mineralbodens in die Clustereranalyse bestimmte Merkmale eher verwischt, die Betrachtung der Oh-Horizonte jedoch zu einer deutlicheren Differenzierung der Standorte beitrugen.

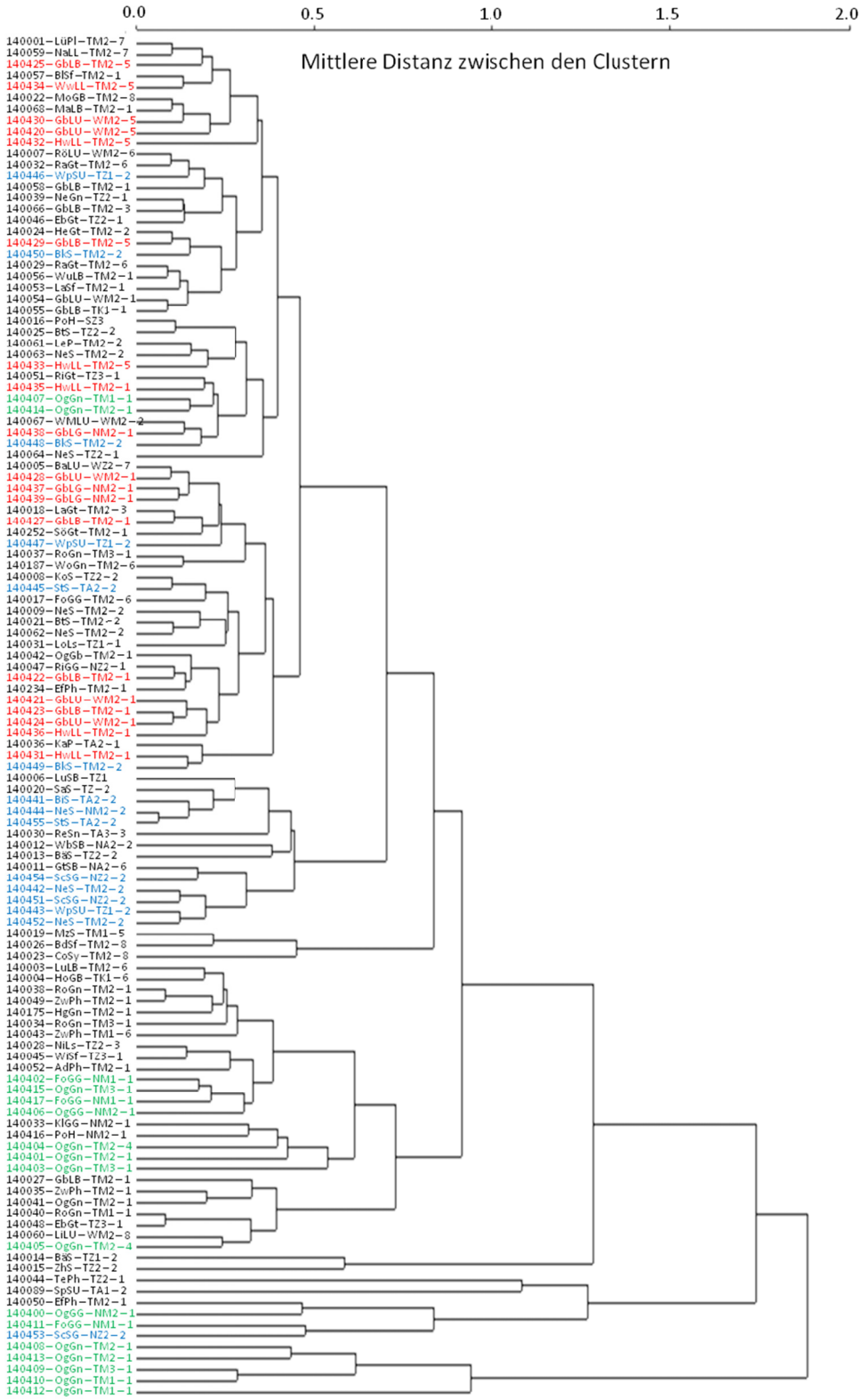

Abb. 93: Dendrogramm basierend auf average linkage sowohl mit den Punten aus den Testgebieten als auch der BZE auschließlich für den Oh-Horizont (schwarz, BZE-Standorte; grün, Bergland; rot, Hügelland; blau, Tiefland). Parameter: C/N-Verhältnis, effektive Austauschkapazität, verfügbarer Basenvorräte, Kohlenstoffvorrat, pH(KCl).

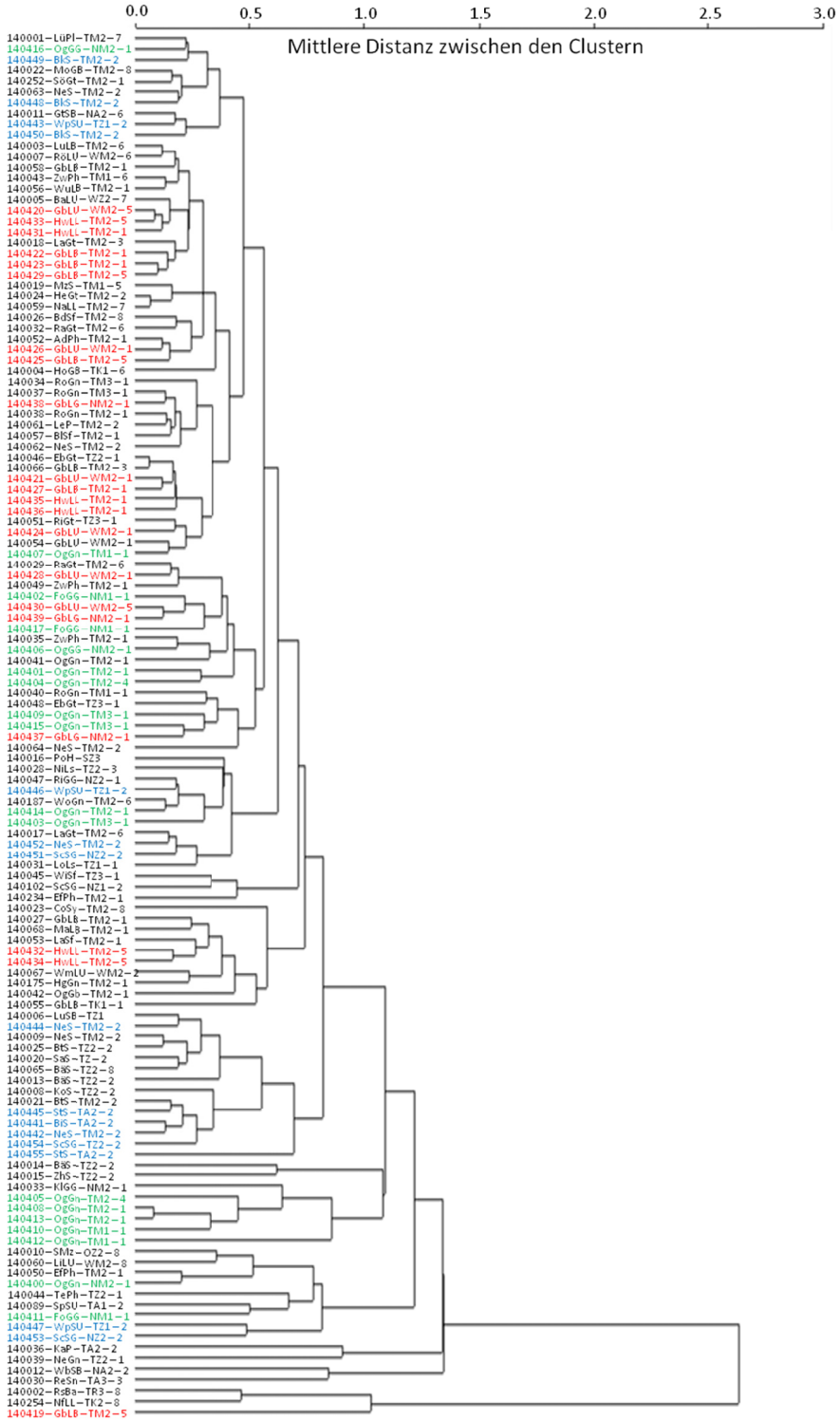

Abb. 94: Dendrogramm basierend auf average linkage sowohl mit den Punten aus den Testgebieten als auch der BZE für die oberen 30 cm des Mineralbodesns einschließlich des Oh-Horizonts (schwarz, BZE-Standorte; grün, Bergland; rot, Hügelland; blau, Tiefland). Parameter: C/N-Verhältnis, effektive Austauschkapazität, verfügbarer Basenvorräte, Kohlenstoffvorrat, pH(KCl).

6.5 Validierung ausgewählter Zustandsparameter für das Gesamtkollektiv

Die bereits in Kapitel 6.3 dargelegten Zustandsparameter mit einem dominierenden Einfluss auf die Vitalität und das Wachstum von Waldbeständen wurden für das Gesamtkollektiv (BZE- und Testgebietsstandorte) einer Kanonischen Diskriminanzanalyse unterzogen (Kapitel 2.7.5). Die ausgewählten Zustandsparameter wurden auf Ihre Eignung hin überprüft, ob ihre Merkmalsausprägung bestimmte Muster bzw. ähnliche Gruppen widerspiegelt. Dabei wurde auch auf die Gruppierung der Bodenformen (Kapitel 4) zurückgegriffen. Um statistisch verwendbare Kollektive zu erhalten wurden jedoch schwächer besetzte Gruppen zusammengefasst oder nicht berücksichtigt. Damit verbunden ist auch eine von Kapitel 4 abweichende Nummeration der Bodenformengruppen (Tab. 50).

Tab. 50: Aggregierte Zuordnung der Lokalbodenformen zu den Bodenformengruppen.

Nr.	Bodenformengruppe	Lokalbodenform
1	Braunerde u. Braunstaugleye aus Lösslehm	GbLB, HwLL, LuLB , MaLB, NaLL, WuLB
2	Staugleye auf Lösslehm und über Lehm	BaLU, GbLU, LiLU, RöLU, WhLU, WmLU
3	Braunerde u. Braunstaugleye aus Gneis	HgGn, OgGB, RoGn, WoGn
4	Braunerde u. Braunstaugleye aus Granit, Porphy o. Syenit	CoSy, HoGB, HoGt, LeP, RaGt; SöGt
5	Braunpodsole o. Braunerde o. Braunstaugleye aus versch. Grundgesteinen	CdLs, EbGt, HeGt, LaGt,LoLs, LüPl, MoGB, NeGn, NiLs, TePh, WiSF
6	Braunerden aus Phyllit o. Schiefer	AdPh, BdSf, BlSf, EfPh, LaSf, ZwPh
7	Gesteins- u. Lösslehmhumusstaugleye	KlGG, RiGG, OgGG, FoGG
8	pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft; terrestrisch	BkS, BtS, GlS, MzS, NeS
9	pleist. Sandformen ziemlich armer Nährkraft; terrestrisch	BäS, BiS, KoS, SaS, StS, ZhS
10	pleist. Sand; Gleypodsole	GtSB, LuSB, SpSU, WbSB, WpSU

Zunächst erfolgte die Untersuchung in Hinblick auf den Einfluss von Kalkungsmaßnahmen auf das Gesamtkollektiv (Abb. 95). Hierbei ergab sich eine relativ deutliche Auftrennung von gekalkten und nicht gekalkten Standorten. Die Trennung der Standorte orientierte sich lediglich an der ersten kanonischen Variable, die 100 % der Varianz erklärt. Dennoch ist es für das weitere Vorgehen von Vorteil, die Analysen getrennt nach gekalkten und nicht gekalkten Standorte durchzuführen.

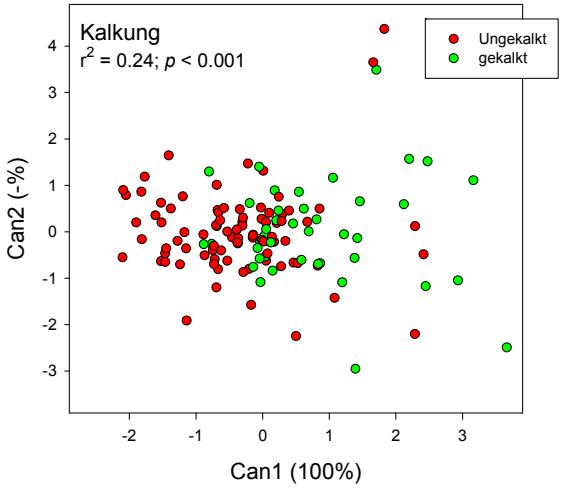

Abb. 95: Verteilung der kanonischen Variablen für das Gesamtkollektiv getrennt nach ungekalkten und gekalkten Standorten.

Während mittels Diskriminanzanalyse für die ungekalkten Standorte eine erfolgreiche Zuordnung bestimmter Bodenformengruppen erzeugt werden konnte, ergab die Analyse der gekalkten Standorte kein statistisch verwertbares Ergebnis (Abb. 96). Es zeigte sich bei den ungekalkten Standorte eine deutliche Abspaltung der Bodenformengruppen 8 (terr. mittl. pleist. Sandformen), 9 (terr. ärmere pleist. Sandformen) und 10 (Sand-Gleypodsole) in den positiven Bereich der Can1-Achse und eine deutliche Abspaltung der Bodenformengruppen 1 (Lösslehm-Braunstaugleye) und 2 (Lösslehm u- Lehm-Staugleye) in den negativen Bereich der Can1-Achse. Demnach unterscheiden sich anhand der ausgewählten Parameter v.a. vergleyte Lehmstandorte deutlich von Standorten auf pleistozänen Sanden. Die verbleibenden Bodenformengruppen gruppieren sich um den 0-Punkt beider Achsen und stehen damit zwischen den bereits erwähnten Formen. Es handelt sich hierbei bevorzugt um Verwitterungsböden aus Festgestein ohne nennenswerte Anteile an Lockersubstrat.

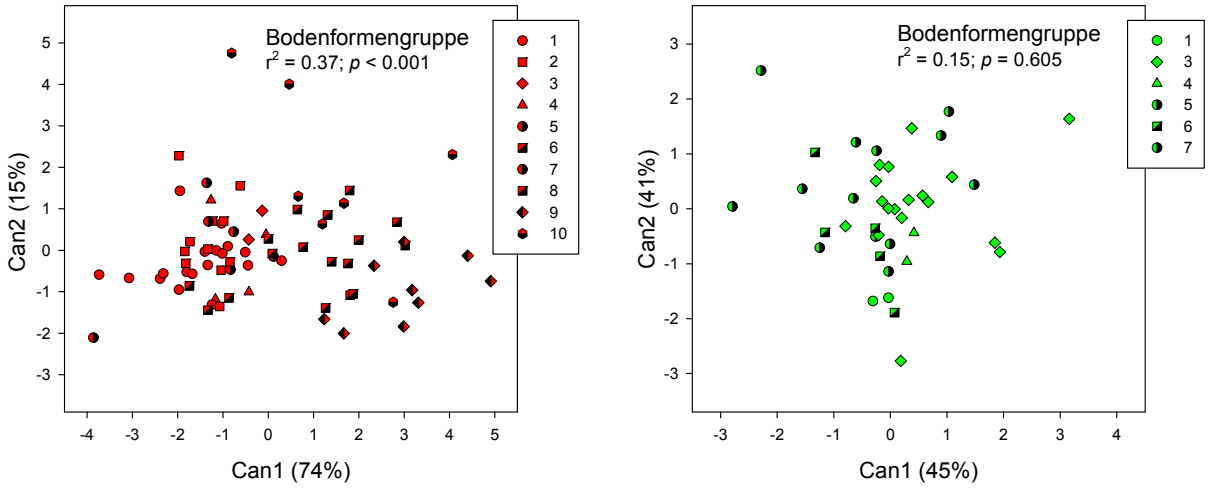

Abb. 96: Verteilung der kanonischen Variablen für das Gesamtkollektiv getrennt nach ungekalkt (links) und gekalkt (rechts) für die Bodenformengruppen. Abk.: 1 = Braunstaugleye auf Lösslehm; 2 = Staugleye auf Lösslehm und über Lehm; 3 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis; 4 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit; 5 = Braunpodsole auf Grundgestein; 6 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer; 7 = Gesteins- u. Lösslehmhumusstaugleye; 8 = pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft; 9 = pleist. Sandformen armer Nährkraft; 10 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden.

Sowohl für die ungekalkten als auch für die gekalkten Standorte ließen sich für den Bestand mittels Diskriminanzanalyse signifikante Muster generieren (Abb. 97). Jedoch konnte das Modell mehr Varianz für die ungekalkten Flächen erklären. Die Stichprobe der ungekalkten Standorte gliedert sich in zwei Gruppen. Bis auf die Kiefernstandorte (2) befinden sich alle weiteren Bestände im negativen Achsenabschnitt der Can1-Achse. Einige Braunstaugleye auf Lösslehm (1) mit Eichenbeständen (5) und sonstigen Laubbaumarten (8) können als Ausreißer betrachtet werden. Die verbleibenden Standorte [meist Fichten- (1), Laubholz- (5) und laubholzreiche Nadelwaldbestände (6)] bilden ein relativ homogenes Cluster. Die Bodenformengruppe spielt eine nur untergeordnete Rolle. Möglicherweise übt der Bestand einen relativ großen Einfluss auf die bodenchemischen Parameter und auf die Vorratswerte aus. Im negativen Achsenabschnitt der Can1-Achse befinden sich fast ausschließlich ungekalkte Fichtenstandorte. Die Kiefernbestände stocken ausschließlich auf pleistozänen Sanden (8; 9; 10). Diese Standorte lassen sich in die ärmeren Sande (9, weiter rechts auf Can1-Achse) und mittleren Sande (8, näher an Null auf Can1-Achse) differenzieren. Die gekalkten Standorte bildeten ebenfalls zwei ähnlich große Gruppen. Während die Gruppe im negativen Achsenabschnitt der Can1-Achse von Fichtenstandorten dominiert wird, finden sich im deutlich positiven Bereich die drei laubholzdominierten Bestände. Einen Einfluss der Bodenformengruppe auf die Gruppierung der Standorte konnte nicht festgestellt werden.

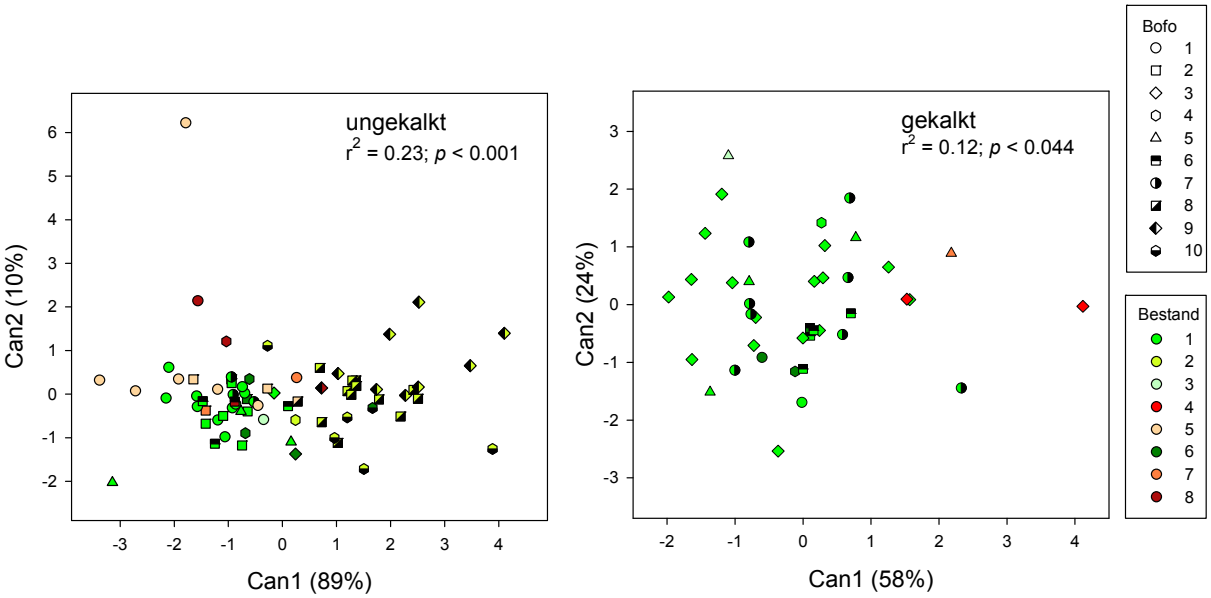

Abb. 97: Verteilung der kanonischen Variablen für das Gesamtkollektiv getrennt nach ungekalkte und gekalkte Standorte für den Bestand. Abk. (Legende Bofo): 1 = Braunstaugleye auf Lösslehm; 2 = Staugleye auf Lösslehm und über Lehm; 3 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Gneis; 4 = Braunerde u. Braunstaugleye auf Granit; 5 = Braunpodsole auf Grundgestein; 6 = Braunerden auf Phyllit u. Schiefer; 7 = Gesteins- u. Lösslehmhumusstaugleye; 8 = pleist. Sandformen mittlerer Nährkraft; 9 = pleist. Sandformen armer Nährkraft; 10 = Gleypodsole auf pleistozänen Sanden. Abk. (Legende Bestand): 1 = Fichtenbestand (> 70 % Fichte); 2 = Kiefernbestand (> 70 % Kiefer); 3 = sonstige Nadelbaumarten (> 70 % sonstiges Nadelholz); 4 = Buchenbestand (> 70 % Buche); 5 = Eichenbestand (> 70 % Eiche); 6 = laubholzreiche Nadelmischbestände (> 30 % Laubholz); 7 = nadelholzreiche Laubholzmischbestände (> 30 % Nadelholz); 8 = sonstige Laubbaumarten (≥ 70 % sonstiges Laubholz).

6.6 Erforderliche Anzahl von Probenahmen zur Erfassung von Zustandseigenschaften

Die Berechnung der Probenanzahl, die für eine hinreichende Charakterisierung der Standortseigenschaften ausreichend ist, erfolgte ausschließlich für den Oh-Horizont und nur anhand der Parameter, die laboranalytisch ermittelt und als Indikator abgeleitet wurden (Kapitel 6.1). Im Bergland sind die relativen minimalen detektierbaren Unterschiede (MDD_{rel}) der ausgewählten Parameter C/N-Verhältnis und Ak_e unterschiedlich ausgeprägt (Abb. 98). Mit weniger als 40 Wiederholungen für die Gruppe OgGn_TM3 und mit weniger als 20 Wiederholungen für die verbleibenden Auswertungseinheiten [= LF + SFG + BT] kann die Variabilität der C/N-Verhältnisse < 10 % gedrückt werden. Eine solch geringe Anzahl an Wiederholungen war mit der AK_e nicht möglich, da vor allem die trockneren OgGn-Standorte eine hohe Variabilität aufwiesen. Lediglich die Nassstandorte und teilweise die frischen unvernässten Standorte kommen mit 40 Wiederholungen aus, damit < 20 % detektierbare Unterschiede erzielt werden können. Um eine ähnliche Größenordnung für mäßig frische unvernässte OgGn-Standorte zu erzielen, sind hingegen mehr als 300 Wiederholungen notwendig.

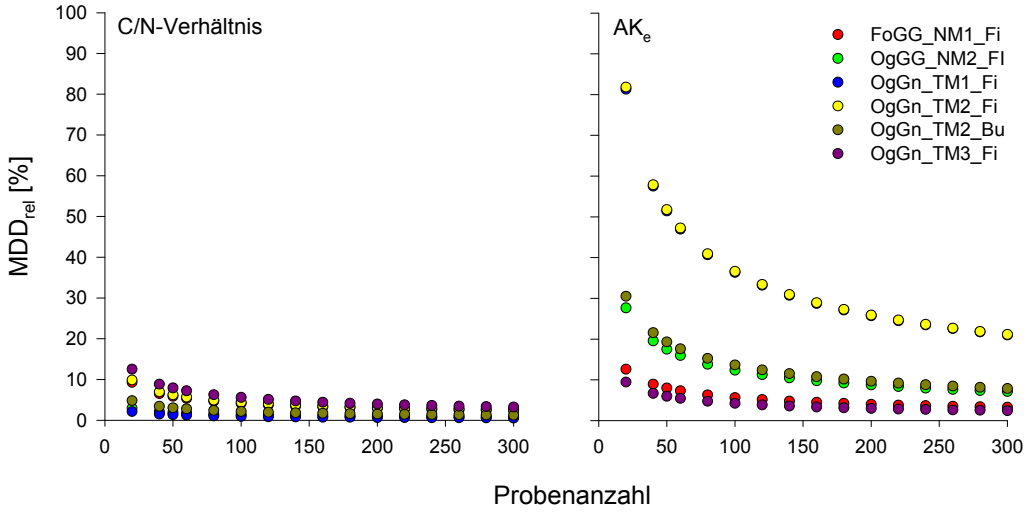

Abb. 98: Relative minimale detektierbare Unterschiede (MDD_{rel}) für das C/N-Verhältnis und die effektive Austauschkapazität (AK_e) in den verschiedenen Auswertungseinheiten im Bergland.

Die für das Hügelland identifizierten Parameter AK_e und Aluminiumkonzentration zeigten ebenfalls ein unterschiedliches Verhalten bezüglich der MDD_{rel} (Abb. 99). Es ist für die Erhebung der AK_e möglich, eine Variabilität < 10 % zu erhalten, wenn mindestens 20 Probenahmen für jede Auswertungseinheit erfolgen. Soll die Aluminiumkonzentration für die Auswertungseinheit GbLU_WM2_Fi mit einer MDD_{rel} < 20 % erfasst werden, sind weitaus mehr als 300 Wiederholungen notwendig. Für die verbleibenden Gruppen sind immerhin noch 20 Wiederholungen, um eine Variabilität von ≈ 20 % (oder niedriger) zu erzielen.

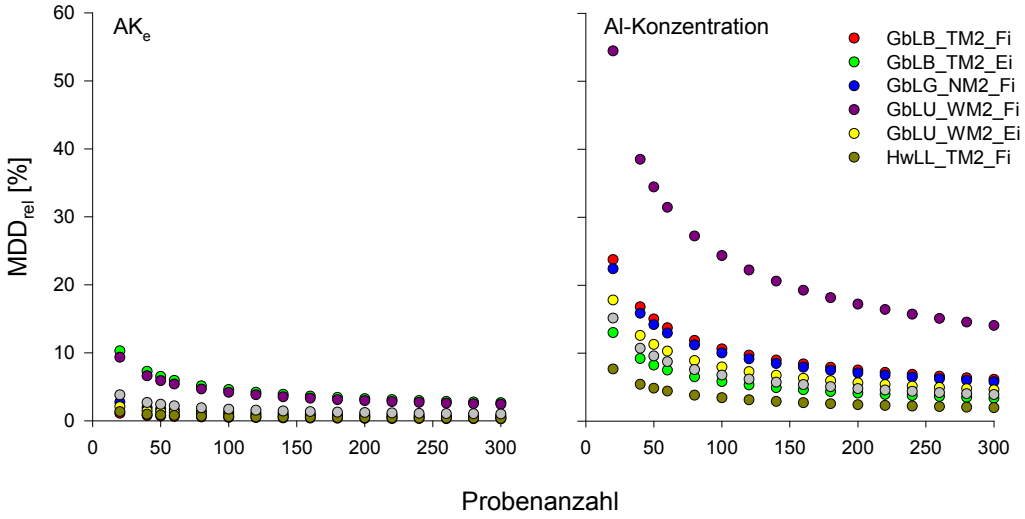

Abb. 99: Relative minimale detektierbare Unterschiede (MDD_{rel}) für die effektive Austauschkapazität (AK_e) und die Aluminiumkonzentration in den verschiedenen Auswertungseinheiten im Hügelland.

Relativ heterogen ist der Verlauf der MDD_{rel} für die Parameter C/N-Verhältnis und Stickstoffkonzentration im Tiefland (Abb. 100). Die C/N-Verhältnisse des Nassstandorts ScSG und des unvernässten Standorts NeS waren am wenigsten variabel, wodurch mit einer Beprobung von weniger als 20 Wiederholungen detektierbare Änderungen < 5 % erzielt werden können. Hingegen sind mehr als 120 Wiederholungen für die Bodenform BkS und WpSU erforderlich, um < 10 % Variabilität zu erzielen. Die MDD_{rel} fiel für die Stickstoffkonzentration etwas höher als für die C/N-Verhältnisse aus. Die größte Variabilität ging von den Bodenformen NeS und ScSG aus. Hierbei sind mehr als 240 Wiederholungen erforderlich, damit < 10 % der Variabilität abgedeckt sind. Einen ähnlichen detektierbaren Unterschied kann für die verbleibenden Bodengruppen erzielt werden, wenn lediglich 40 Wiederholungen stattfinden.

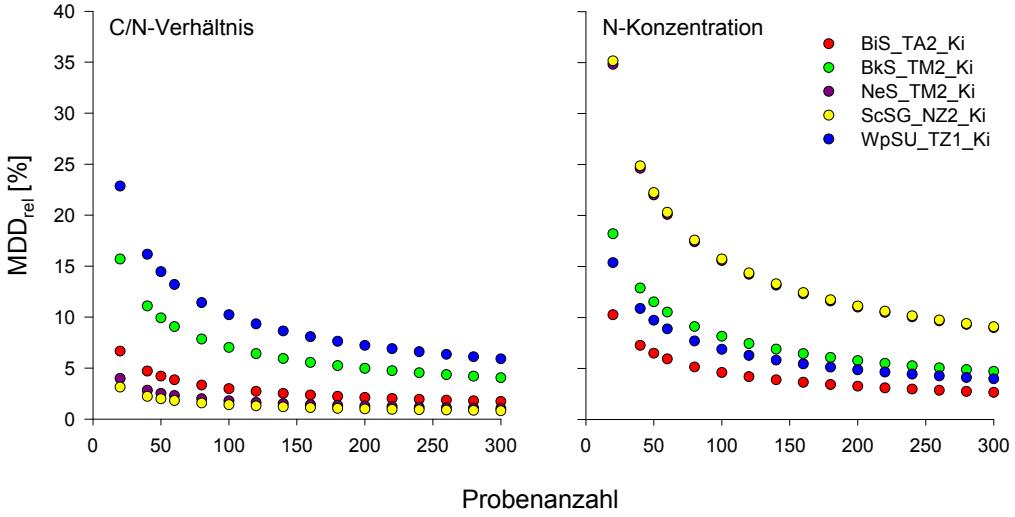

Abb. 100: Relative minimale detektierbare Unterschiede (MDD_{rel}) für das C/N-Verhältnis und die Stickstoffkonzentration in den verschiedenen Auswertungseinheiten im Tiefland.

6.7 Schlussfolgerung

Es wurden aus einer Vielzahl von Parameter versucht, diejenigen abzuleiten, die innerhalb der untersuchten Gruppierungen (Auswertungseinheit, Standortsformengruppe, Bestand, Lokalbodenform) für alle Testgebiete Allgemeingültigkeit besitzen. Die Eingangsparameter umfassten Gehalte von Kohlenstoff, Stickstoff, Calcium, Magnesium, Kalium, Natrium, Mangan, Aluminium, Eisen, die Basensättigung, den Basenvorrat, das C/N-Verhältnis, die Horizontmächtigkeit, die Durchwurzelungsintensität der Feinwurzeln, die Hangneigung sowie der Kohlenstoff- und Stickstoffvorrat. Die Anwendung der identifizierten Parameter zur Zustandsbeschreibung im Gelände sollte daher auf das Untersuchungsgebiet abgestimmt sein. Problematisch ist außerdem, dass nicht signifikante Ergebnisse ebenfalls bei der Auswahl der Indikatoren berücksichtigt wurden, um einer Mindestanzahl an Parametern gerecht zu werden. Die Aussagekraft dieser Indikatoren ist jedoch gering und nicht sicher anwendbar. Generell eignet sich für die Zustandsbewertung eines Standorts der Oh-Horizont besser als der Mineralboden (0-5 cm) oder der Oh-Horizont + Mineralboden (0-30 cm). Auffällig war weiterhin, dass kartierte oder im Gelände erfassbare Parameter wie Hangneigung, Horizontmächtigkeit und Durchwurzelungsintensität häufig einen Einfluss auf die oben beschriebenen Gruppierungen ausübten. Das lässt wiederum den Schluss zu, dass eine genaue Standortsbeschreibung die Zustandseigenschaften eines Standortes besser wiedergibt als eine labortechnische Analyse ausgewählter Parameter; zumindest wenn Standortsformen bzw. Standortsformengruppen die Grundlage der Auswertung bilden.

Wie sich auch schon bei der Parameterauswahl abzeichnete, war die erfolgreiche Zuordnung der aktuellen Zustandseigenschaften zu den Stammeigenschaften (im Sinne von Lokalbodenform, Bodenformengruppe bzw. Standortsformengruppe) stark vom Testgebiet abhängig.

Problematisch gestaltete sich dies v.a. auf den gekalkten Flächen im Bergland, wo kaum Parameter gefunden wurden, die zur Beschreibung des Standortes herangezogen werden konnten. Dementsprechend ließen sich für die Auswertungseinheiten [= LF + SFG + BT], Standortsformengruppen oder Lokalbodenformen nur unbefriedigende Ergebnisse erzielen. Im Vergleich zum Mineralboden ergaben sich bei Betrachtung des Oh-Horizonts konsistentere Ergebnisse. Die Ergebnisse der MDDs für die abgeleiteten Indikatoren im Oh-Horizont zeigten jedoch, dass mindestens 20 Wiederholungen für eine Auswertungseinheit je Testgebiet erforderlich sind. Da jedoch die Unterschiede sowohl zwischen den Parametern als auch zwischen den Auswertungseinheiten groß sind, empfiehlt sich die Zusammenlegung relativ homogener Einheiten. Hierbei müssen gebietscharakteristische Merkmale berücksichtigt werden. Generell zeigte die Auswertung, dass eine Einteilung in Standortsformengruppen oder in Lokalbodenformen sowie nach Bestandestypen einer Einteilung in Auswertungseinheiten, die diese Merkmale kombinieren, vorzuziehen ist.

Um dennoch ein Parameterset für eine gebietsunabhängige Auswertung anwenden zu können, wurden Literaturangaben aus standortskundlicher Sicht bewertet und geeignete Parameter identifiziert, die einen dominierenden Einfluss auf die Vitalität und das Wachstum von Waldbeständen haben. Die relevanten standortsprägenden Parameter (Basenvorrat, Basensättigung, Kohlenstoffvorrat, C/N-Verhältnis, pH(KCl)-Wert) spiegelten sich v.a. in der Wiederfindung der Testgebiete im Gesamtkollektiv sowohl im Oh-Horizont als auch im Oh-Horizont + Mineralboden (0-30 cm) wider. Leider ergaben sich keine eindeutigen Gruppierungen in Bezug auf die Standortsformengruppe oder den Bestand. Ein weiteres Problem bei der Auswertung der abgeleiteten Zustandsparameter ergab sich durch die Berücksichtigung von Standorten, die durch Bodenschutzkalkungen geprägt sind. Daher ist die Auftrennung in gekalkte und ungekalkte Kollektive zu empfehlen, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. So ließen sich dann auch für die ungekalkten Flächen bestimmte Merkmalsausprägungen (Lokalbodenformen, Standortsformengruppen, Bestände) statistisch abgesichert wiederfinden, was die Verwendung der herausgearbeiteten Zustandsparameter zur Charakterisierung von Zustandsformen rechtfertigt.

7 Regionalisierung von Zustandseigenschaften auf Waldstandorten

7.1 Überprüfung der Homogenität des BZE II-Datensatzes mit dem Testgebietsdatensatz

Die Hauptkomponentenanalyse des transponierten Gesamtdatensatzes (BZE II + Testbeprobung), d.h. sämtlicher Analysewerte aller Tiefenstufen (Kapitel 2.7.8), ergab, dass 13 Komponenten einen Eigenwert > 1 hatten. Ihr Anteil an erklärter Varianz betrug 85 % (Abb. 101). Die 13 Hauptkomponenten (Anhang: Tab. III-4) wurden als Eingangsdatensatz für die Clusteranalyse genommen.

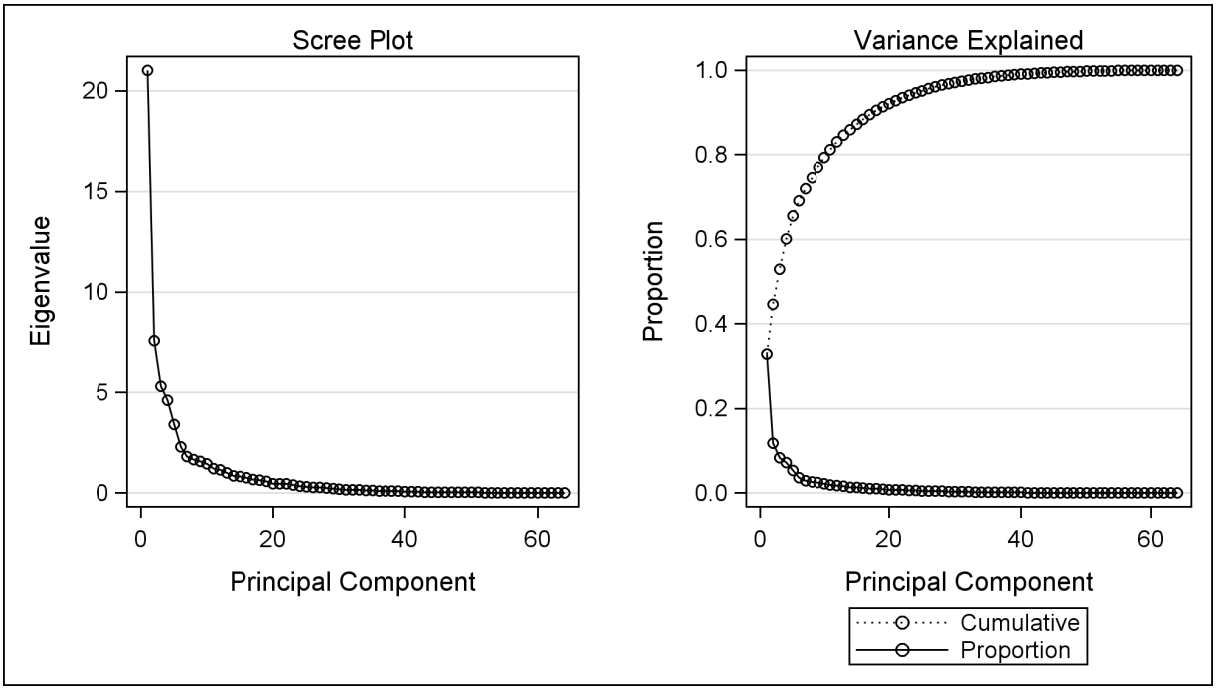

Abb. 101: Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse des vereinigten und transponierten Testgebiets- und BZE II-Datensatzes. Links der „Scree-plot“ mit den der Größe nach sortierten Eigenwerten der extrahierten Hauptkomponenten und rechts der Anteil der Hauptkomponenten an der erklärten Varianz.

Die Clusteranalyse der 13 Hauptkomponenten zeigt (Abb. 102), dass sich die neuen Daten aus der Testgebietsbeprobung gut mit dem BZE II-Datensatz vereinigen ließen. Die beiden Datensätze trennten sich nicht clusterweise voneinander ab. Es ließ sich deutlich ein Cluster abgrenzen, der fast alle Standorte des Tieflands umfasste (oberer Cluster, Abb. 102). Weiterhin ließ sich ein weiterer Cluster ausgrenzen, der von Standorten des Hügellandes dominiert wurde (unterer Cluster, Abb. 102). Schließlich teilten sich die Mittelgebirgsstandorte in zwei weitere Cluster auf

(mittlere Cluster, Abb. 102), wovon einer größere Ähnlichkeit zum Hügellandscluster aufwies. Die Aufteilung in noch kleinere Cluster war, beurteilt nach den Hauptbodenformengruppen, dem Bestandestyp und der Kalkung, nicht eindeutig. So ließ sich der „Tieflands“-Cluster in zwei weitere Cluster einteilen. Diese wiederum wurden allerdings von keinem der genannten Klassifizierungsmerkmale dominiert. Der gleiche Schluss ergibt sich auch bei der Betrachtung des Hügellands- und der beiden Mittelgebirgscluster. Im Hügellandscluster scheint es allerdings eine Untergliederung nach Fichtenbeständen und anderen Beständen, vorwiegend Eichenbestände, zu geben. Weiterhin fällt auf, das Braunerden auf Sand-Granit auch in den Hügellandcluster fallen.

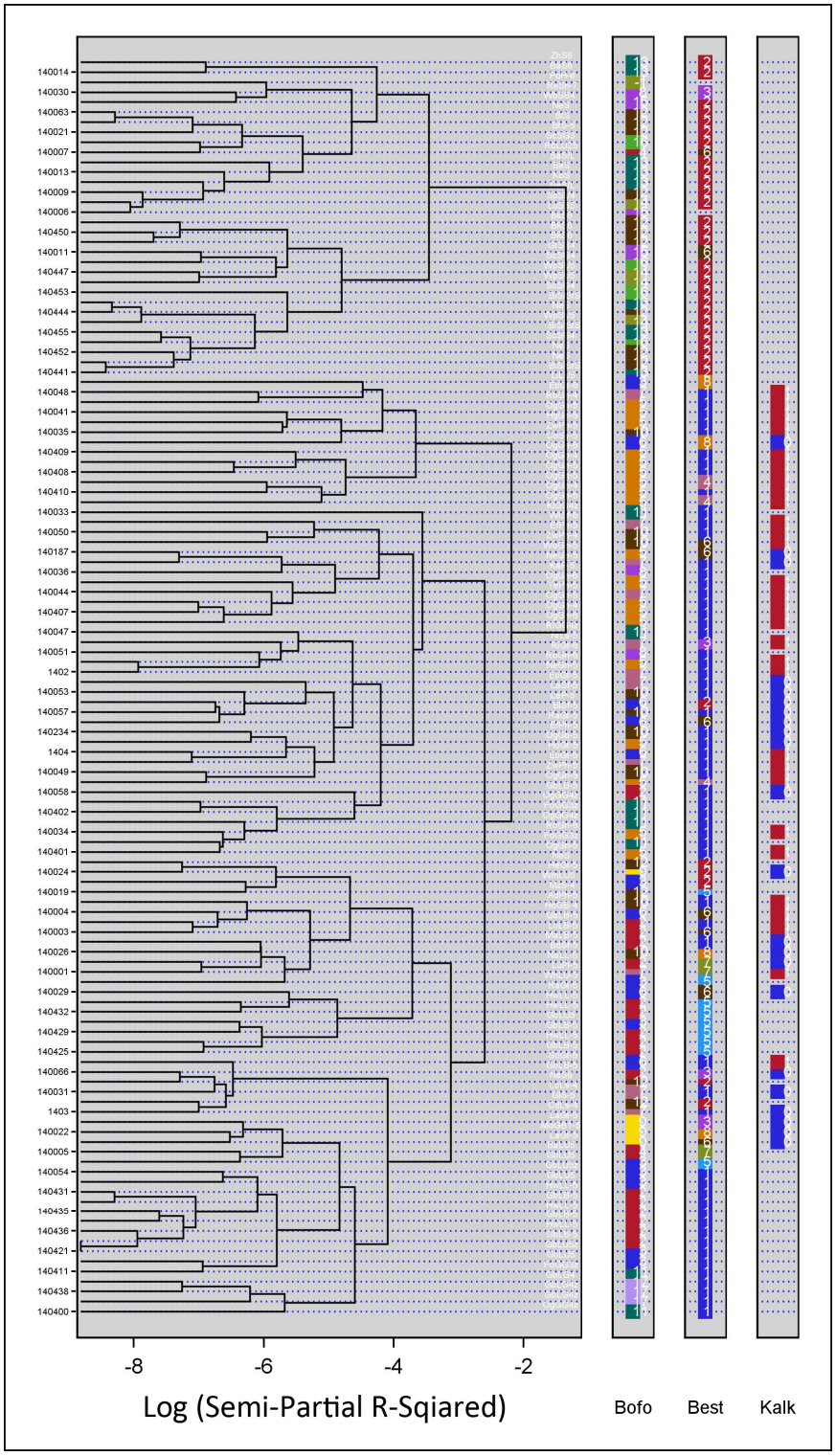

Abb. 102: Dendrogramm aus der Clusteranalyse der Hauptkomponenten (Eigenwert > 1) des transponierten Gesamtdatensatzes. Die Probepunkte der Testgebiete haben als vierte Ziffer eine 4, sonst eine = 0, mit Bofo = Bodenformengruppe, Best = Bestandestyp, Kalk = Kalkung. Weisse Buchstabencodes zeigen die Lokalbodenformen an.

Nachdem die Clusteranalyse gezeigt hatte, dass sich die beiden Datenkollektive, BZE II und Testgebietsbeprobung, vereinigen ließen, wurden mit dem gesamten Datensatz aber für die einzelnen Variablen getrennt Regressionsanalysen durchgeführt.

7.2 Anpassung von Regressionsmodellen

Die Ergebnisse der Anpassung der linearen Modelle zeigten, dass die Bodenformgruppen (Tab. 45) auf die Elementgehalte der Auflage wenig Einfluss hatten (Tab. 51). Eine Ausnahme stellten die Phosphatgehalte im L+Of-Horizont dar. Ansonsten übten in der Auflage vor allem die Variable Höhe ü. NN sowie die Kalkung und der Bestandestyp einen Einfluss aus. Letzterer vor allem auf die Kalium und Aluminiumgehalte, sowie das C/N-Verhältnis. Wenn eine Kalkung durchgeführt wurde, scheint sie der dominierende Faktor bei den Humusvorräten zu sein. Die austauschbaren Elementgehalte des Mineralbodens wurden vor allem durch den Prädiktor Bodenformengruppe und durch die Variable Höhe ü. NN beeinflusst. Die Bodenformengruppe wirkt ebenfalls auf die Austauschkapazität. Der Einflussfaktor Kalkung wirkt im Mineralboden am stärksten in der Tiefenstufe 0-10 cm. Beeinflusst werden die Basensättigung, das C/N-Verhältnis und die austauschbaren Gehalte an Magnesium, Aluminium und Natrium. Der unplausibel erscheinende Effekt der Kalkung auf den Feinbodenvorrat kann wohl damit erklärt werden, dass die gekalkten Böden im Vergleich zu der Klasse der nicht zu kalkenden vergleichsweise feinbodenarm sind. Den großen Einfluss, den die Höhe ü. NN auf die Zielvariablen hat, geht einher mit den Ergebnissen der Clusteranalyse, wonach sich die Probepunkte primär nach den großräumigen Einheiten Tiefland, Hügelland und Bergland einteilen lassen. Außerdem kann sie als Proxy für Klimafaktoren gelten. Diese wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt, da sich Unterschiede innerhalb der Testgebiete nur schlecht berücksichtigen lassen. Die Prädiktorenvariable Relieflage zeigt in keinem Fall einen signifikanten Einfluss.

Die Modellgüte kann anhand des Vergleiches des Root Mean Square Errors (RMSE = Wurzel des mittleren quadratischen Prognosefehlers) mit dem Mittelwert und anhand der Bestimmtheitsmaße (r^2) abgelesen werden (Tab. 51). Geringe Unterschiede zwischen dem Bestimmtheitsmaß (r^2) und dem angepassten Bestimmtheitsmaß (adj. r^2) lassen die angepassten Modelle hinsichtlich des Problems des „overfittings“ als wenig verdächtig erscheinen (Kapitel 2.7.8). Ein relativ hohes r^2 mit Werten > 0,7 findet sich im Mineralboden bei den Modellen für die Austauschkapazität, die austauschbaren Vorräte von Calcium sowie in einzelnen Tiefenstufen von Kalium, Magnesium und Natrium. Im L+Of-Horizont ist ein hohes Bestimmtheitsmaß beim Phosphorgehalt zu finden. Der Verhältnis von RMSE zu Mittelwert ergab bei einigen Variablen hohe Werte, also eine hohe Streuung und daher eine niedrigere Genauigkeit der Vorhersage, trotz hoher r^2, so z.B. beim den Gehalten an austauschbaren Calcium und Magnesium. Die Modelle für das C/N-Verhältnis und den pH-Wert erreichten vergleichsweise niedrige RMSE, d.h. eine größere Genauigkeit bei der Vorhersage.

Tab. 51: Ergebnisse der Anpassung linearer Modelle mit den Prädikorenvariablen BOFO = Bodenformengruppen (Tab. 45), BEST = Bestandestyp, INCL = Hangneigung, HÖHE = Höhe ü. NN, KALK = Kalkung.

Zielgröße	Sign. Einflussfaktor	Mittel	RMSE	r^2	Adj r^2
AKe (Min. 0-10) [µmolc g^{-1}]	BOFO HÖHE	98,6	22,3	0,83	0,80
AKe (Min. 10-30) [µmolc g^{-1}]	BOFO BEST HÖHE KALK LON	64,4	18,0	0,82	0,77
aust. Al (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	BEST HÖHE LON	0,560	0,175	0,62	0,59
aust. Al (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	HÖHE KALK	0,456	0,171	0,56	0,55
Basensättigung oh. Na (Min. 0-10) [%]		14,2	14,9	0,00	0,00
Basensättigung oh. Na (Min. 10-30) [%]	BOFO	9,6	7,7	0,52	0,46
C/N (Min. 0-10)	BEST KALK	24,6	3,5	0,37	0,32
C/N (Min.10-30)	KALK	22,2	4,7	0,19	0,17
C/N (L+Of)	BEST HÖHE LAT LON	24,3	2,3	0,62	0,59
C/N (Oh)	BEST LON	22,5	2,2	0,46	0,42
C (Min. 0-10) [%]	BOFO LON	4,1	1,2	0,64	0,59
C (Min. 10-30) [%]	INCL HÖHE	1,7	0,8	0,46	0,45
C (L+Of) [%]	BEST	40,7	4,6	0,36	0,32
C (Oh) [%]	LAT	27,7	5,6	0,45	0,44
aust. Ca (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	BOFO	0,21	0,26	0,80	0,77
aust. Ca (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	BOFO	0,09	0,10	0,89	0,88
Feinbodenvorrat (Min. 0-10) [t ha^{-1}]	INCL HÖHE LON	942	184	0,59	0,58
Feinbodenvorrat (Min. 10-30) [t ha^{-1}]	INCL HÖHE KALK LON	2104	417	0,67	0,65
Humusvorrat (L+Of) [t ha^{-1}]	LAT LON	52	30	0,23	0,22
Humusvorrat (Oh) [t ha^{-1}]	KALK LAT	75	51	0,23	0,20
aust. Fe (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	INCL HÖHE KALK	0,138	0,096	0,55	0,53
aust. Fe (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	INCL HÖHE KALK LAT	0,053	0,055	0,55	0,53
extr. Al (L+Of) [mg g^{-1}]	BEST	5,6	2,1	0,31	0,27
extr. Al (Oh) [mg g^{-1}]	BEST	10,6	3,3	0,39	0,35
extr. Ca (L+Of) [mg g^{-1}]	KALK	7,5	5,5	0,51	0,50
extr. Ca (Oh) [mg g^{-1}]	KALK	2,7	2,5	0,31	0,29
extr. Fe (L+Of) [mg g^{-1}]		7,8	2,9	0,00	0,00
extr. Fe (Oh) [mg g^{-1}]	KALK	13,9	4,7	0,21	0,19
extr. K (L+Of) [mg g^{-1}]	BEST KALK	1,2	0,3	0,67	0,64
extr. K (Oh) [mg g^{-1}]	BEST KALK	1,5	0,6	0,53	0,49
extr. Mg (L+Of) [mg g^{-1}]	KALK	2,5	2,4	0,46	0,45
extr. Mg (Oh) [mg g^{-1}]	KALK	1,6	1,2	0,37	0,36
extr. Mn (L+Of) [mg g^{-1}]	BEST HÖHE LAT	0,65	0,66	0,34	0,29
extr. Mn (Oh) [mg g^{-1}]	HÖHE KALK LAT	0,18	0,17	0,18	0,14
extr. Na (L+Of) [mg g^{-1}]	LAT	0,12	0,04	0,08	0,07
extr. Na (Oh) [mg g^{-1}]	KALK	0,16	0,07	0,30	0,28
extr. P (L+Of) [mg g^{-1}]	BOFO INCL HÖHE	0,89	0,13	0,64	0,58

Zielgröße	Sign. Einflussfaktor	Mittel	RMSE	r^2	Adj r^2
extr. P (Oh) [mg g^{-1}]	KALK LAT	0,78	0,20	0,41	0,39
extr. S (L+Of) [mg g^{-1}]	LON	1,95	0,33	0,18	0,18
extr. S (Oh) [mg g^{-1}]	LAT	1,72	0,44	0,20	0,19
aust. K (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	BOFO BEST	0,042	0,012	0,88	0,85
aust. K (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	BEST	0,031	0,015	0,39	0,36
aust. Mg (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	BOFO KALK	0,061	0,068	0,65	0,59
aust. Mg (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	BOFO INCL KALK	0,025	0,022	0,90	0,88
aust. Mn (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	HÖHE	0,016	0,022	0,08	0,07
aust. Mn (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	LAT	0,020	0,024	0,19	0,18
N (Min. 0-10) [%]	BOFO LON	0,18	0,06	0,70	0,66
N (Min. 10-30) [%]	INCL HÖHE	0,08	0,03	0,49	0,48
N (L+Of) [%]	LAT LON	1,70	0,22	0,39	0,38
N (Oh) [%]	LAT	1,26	0,26	0,52	0,51
aust. Na (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	HÖHE LAT LON	0,011	0,005	0,22	0,20
aust. Na (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	BOFO	0,009	0,004	0,65	0,60
pH(KCl) (Min. 0-10)	BEST LON	3,4	0,2	0,33	0,28
pH(KCl) (Min. 10-30)	BEST LON	3,7	0,2	0,33	0,29
pH(KCl) (L+Of)	BEST KALK	3,8	0,5	0,61	0,57
pH(KCl) (Oh)	KALK	3,3	0,5	0,22	0,20

Die Ergebnisse der pls-Regression (Partial Least Squares-Regession; Kapitel 2.7.8) zeigten im Vergleich zur „gewöhnlichen“ Methode der kleinsten Quadrate, dass deutlich weniger Modelle angepasst werden konnten, die sich signifikant von dem Interzept-Modell unterschieden (Tab. 52). Bei Interzept-Modellen wurde kein Faktor extrahiert, was bedeutet, dass die Vorhersage auf Grundlage des Gesamtmittelwertes erfolgt. Zu den Zielvariablen, die davon betroffen waren, gehörten im Mineralboden die austauschbaren Elementkonzentrationen von Kalium, Calcium, Mangan (0-10 cm), sowie die Basensättigung und der pH-Wert (0-10 cm). In der Auflage waren davon im Oh-Horizont der pH-Wert und der Mangangehalt betroffen, im L+Of-Horizont die Gehalte von Aluminium, Eisen, Natrium und Schwefel. Bei der Mehrheit der angepassten Modelle wurde ein Faktor extrahiert. Bei wenigen Zielvariablen, dem C/N-Verhältnis des Oh-Horizonts und den austauschbaren Magnesiumgehalten der Tiefenstufe 10-30 cm, waren es zwei Faktoren. Diese beiden Modelle konnten auch mit 62 % und 90 % den höchsten Varianzanteil an der Zielvariablen klären. Bei den Modellen, bei denen nur ein Faktor extrahiert wurde, lag der Anteil an erklärter Varianz der Zielvariablen meistens zwischen 40-60 %. Im Unterschied zum linearen Modell hatten bei der pls-Regression auch die quadrierten Rechtswerte (LATsq) einen Einfluss.

Tab. 52: Anzahl der extrahierten Faktoren (n F.) aus der pls-Regression, erklärte Gesamtvarianz der Prädiktoren (X Var), der Zielvariable (Y Var) und Auflistung von Prädiktoren (in Klammern Prädiktorenklassen), deren Varianz sich zu ≥ 25 % vom Modell erklären lässt.

	n F.	X Var.	Y Var.	Erklärte Varianz > 25 %
AKe (Min. 0-10) [µmolc g^{-1}]	1	18,0	64,5	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
AKe (Min. 10-30) [µmolc g^{-1}]	1	18,1	59,7	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
aust. Al (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	1	18,1	59,4	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
aust. Al (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	1	18,2	61,7	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
Basensättigung (Min. 0-10) [%]	0			
Basensättigung (Min. 10-30) [%]	0			
C/N (Min. 0-10)	1	15,6	34,8	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
C/N (Min. 10-30)	1	15,5	33,5	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
C/N (L+Of)	1	16,6	38,6	BOFO (13) BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
C/N (Oh)	2	24,3	61,9	BOFO (13) BEST (1 2 5) KALK HÖHE LAT LATsq
C (Min. 0-10) [%]	1	17,8	47,6	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
C (Min. 10-30) [%]	1	17,8	42,2	BEST (1 2) KALK INCL HÖHE LAT LATsq
C (L+Of) [%]	1	17,5	27,8	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
C (Oh) [%]	1	18,8	47,6	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
aust. Ca (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	0			
aust. Ca (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	0			
Feinbodenvorrat (Min.0-10) [t ha^{-1}]	1	18,2	61,4	BEST (1 2) KALK INCL HÖHE LAT LATsq
Feinbodenvorrat (Min. 10-30) [t ha^{-1}]	1	18,1	64,1	BEST (1 2) KALK INCL HÖHE LAT LATsq
Humusvorrat (L+Of) [t ha^{-1}]	1	15,4	26,8	BEST (2) KALK HÖHE LAT LATsq
Humusvorrat (Oh) [t ha^{-1}]	0			
aust. Fe (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	1	17,9	46,3	BEST (1 2) KALK INCL HÖHE LAT LATsq
aust. Fe (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	1	17,3	35,9	BEST (1 2) KALK INCL HÖHE LAT LATsq
aust. K (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	0			
aust. K (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	1	18,1	38,4	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
extr. Al (L+Of) [mg g^{-1}]	1	17,5	43,1	BOFO (5) BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
extr. Al (Oh) [mg g^{-1}]	1	17,7	27,6	BOFO (5) BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
extr. Ca (L+Of) [mg g^{-1}]	0			
extr. Ca (Oh) [mg g^{-1}]	1	15,9	24,2	BOFO (12) BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
extr. Fe (L+Of) [mg g^{-1}]	2	23,7	66,6	BOFO (12) BEST (1 2 5) KALK HÖHE LAT LATsq
extr. Fe (Oh) [mg g^{-1}]	1	18,6	46,0	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
extr. K (L+Of) [mg g^{-1}]	1	17,7	39,5	BOFO (5) BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
extr. K (Oh) [mg g^{-1}]	1	18,5	35,6	BOFO (5) BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
extr. Mg (L+Of) [mg g^{-1}]	1	14,1	29,0	BEST (2) KALK HÖHE LAT LATsq
extr. Mg (Oh) [mg g^{-1}]	0			
extr. Mn (L+Of) [mg g^{-1}]	0			

	n F.	X Var.	Y Var.	Erklärte Varianz > 25 %
extr. Mn (Oh) [mg g^{-1}]	1	18,5	34,1	BOFO (5) BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
extr. Na (L+Of) [mg g^{-1}]	1	17,4	44,4	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
extr. Na (Oh) [mg g^{-1}]	1	18,4	46,6	BEST (1 2) KALK INCL HÖHE LAT LATsq
extr. P (L+Of) [mg g^{-1}]	1	13,3	30,5	BEST (1) HÖHE LAT LON LATsq LONsq
extr. P (Oh) [mg g^{-1}]	1	18,3	31,9	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
extr. S (L+Of) [mg g^{-1}]	3	29,6	86,3	BOFO (1 5 12) BEST (1 2 8) KALK HÖHE LAT LON LATsq LONsq
extr. S (Oh) [mg g^{-1}]	1	16,9	40,1	BOFO (12) BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
aust. Mg (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	1	16,7	41,4	BOFO (5) BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
aust. Mg (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	4	32,6	90,2	BOFO (1 11 12) BEST (1 2 6 8) KALK HÖHE LAT LON LATsq LONsq
aust. Mn (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	0			
aust. Mn (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	1	17,6	28,8	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
N (Min. 0-10) [%]	0			
N (Min. 10-30) [%]	1	18,0	50,9	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
N (L+Of) [%]	1	18,1	49,0	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
N (Oh) [%]	1	18,9	55,6	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
aust. Na (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	1	16,1	32,0	BOFO (12) BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
aust. Na (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	1	13,3	44,6	BOFO (12) BEST (2) KALK HÖHE LAT LATsq
pH(KCl) (Min. 0-10)	1	16,6	29,3	BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
pH(KCl) (Min. 10-30)	1	16,6	31,6	BOFO (12 13) BEST (1 2) KALK HÖHE LAT LATsq
pH(KCl) (L+Of)	2	23,5	60,9	BOFO (5) BEST (1 2) KALK INCL HÖHE LAT LATsq
pH(KCl) (Oh)	0			

7.3 Geostatistische Modellierung

Grundsätzlich zeigte es sich, dass die Datenlage als grenzwertig für die Durchführung einer Variogramm-Berechnung zu beurteilen war. Insgesamt ergeben sich für die einzelnen Entfernungsklassen des Variogrammes zu wenige Punktpaare und auch die Anzahl der Entfernungsklassen war recht klein (Abb. 103). Empfohlen wird allgemein ein Mindestwert von 30 Punktepaaren pro Entfernungsklasse (Kapitel 2.7.7 und 2.7.8), Abb. 103 zeigt, dass dieser Wert nur in wenigen Klassen erreicht wurde. Die Anzahl der Abstandsklassen (Lags) musste daher auch mit 10 relativ niedrig gehalten werden.

Im Allgemeinen zeigten die Variogramme eine hohe Streuung der Abstands-klassenmittelwerte (Abb. 104). Dies galt sowohl für die Analyse der Residuen als auch für die Originalwerte. Ein Grund für die große Streuung der mittleren Semivarianz pro Abstandsklasse könnte die Unsicherheit sein, die aufgrund der wenigen Abstandsklassen und der geringen Punktbelegung pro Abstandsklasse entstand. In den meisten Fällen konnten nur Variogramme erstellt werden, bei denen das Nugget/Sill-Verhältnis nahe 1 war. Dies deutete auf einen schwachen räumlichen

Zusammenhang der Werte hin. Der Nugget-Effekt repräsentiert räumliche Variation auf einer kleineren Abstandsebene als durch die Beprobung erfasst wurde (Kapitel 2.7.7). Aufgrund des hohen Nugget/Sill-Verhältnis lassen sich auch keine eindeutigen Aussagen über den räumliche Einflussbereichs der Beprobungspunkte treffen. Bei Variogrammen bei denen die Anpassung einer Variogrammfunktion Nugget/Sill-Verhältnisse von unter 0,5 ergab, zeigte es sich, dass die Kurve im unteren Bereich fast ausschließlich durch den Einfluss der niedrigsten Abstandsklasse geformt wurde und ihr Verlauf und Ursprung als relativ unsicher gelten muss.

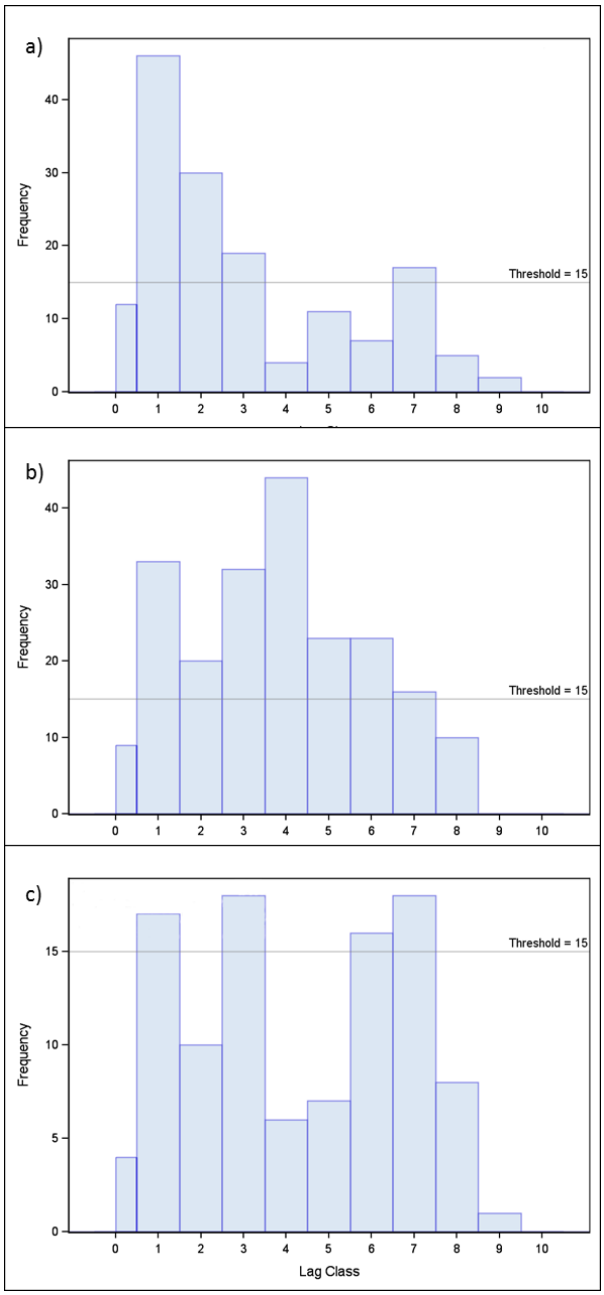

Abb. 103: Häufigkeitsverteilung der Punktepaare in den Abstandsklassen („Lag Class“) für die drei Testgebiete, mit a) Gebirge, b) Hügelland und c) Tiefland. Die Abstandsklassen (Lag Classes) repräsentieren unterschiedliche Distanzen zwischen den Punkten in den Testgebieten.

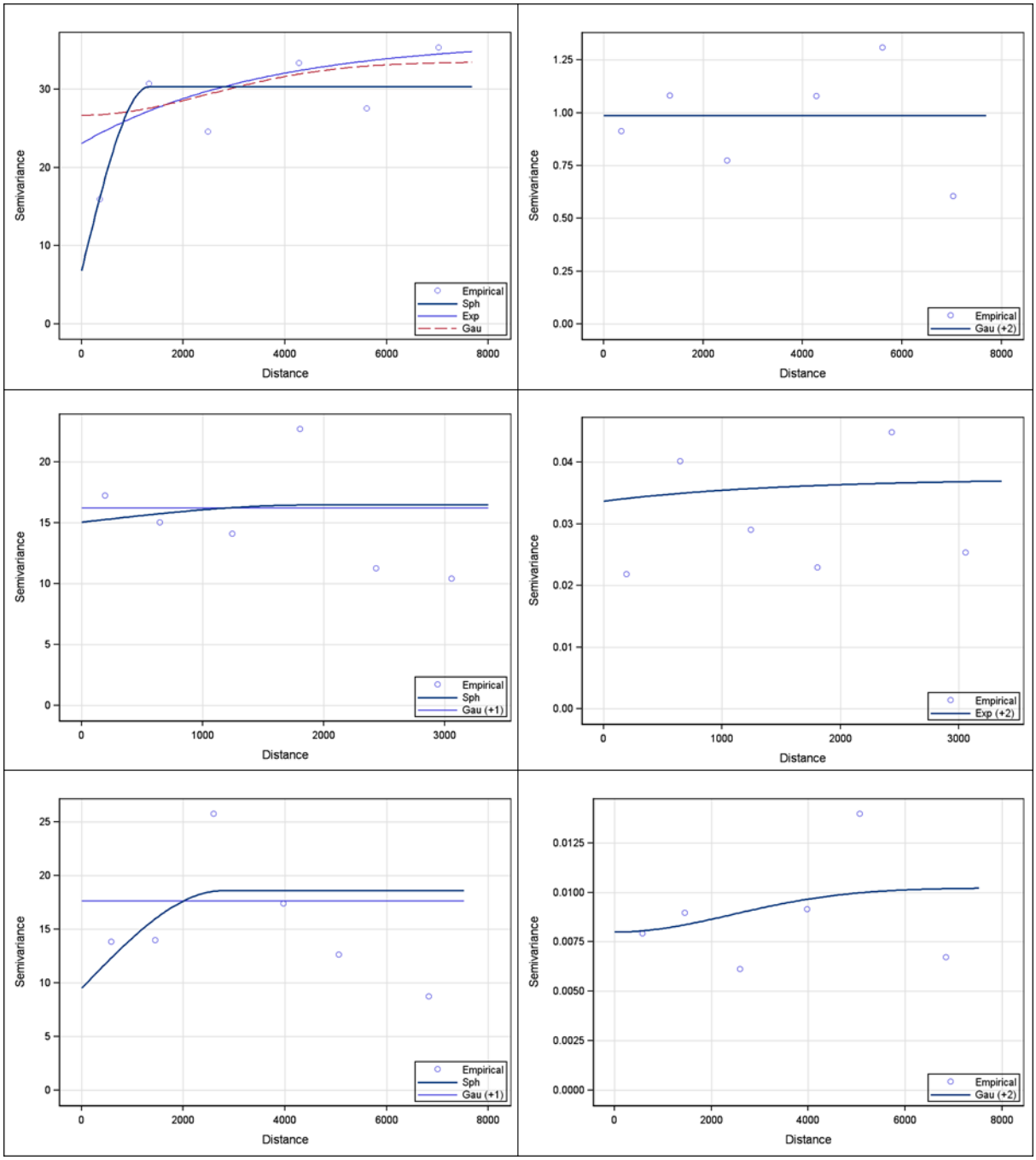

Abb. 104: Variogramme für die Residuen der Kohlenstoffkonzentration des Oh-Horizonts (linke Seite) und des pH-Wertes des Oh-Horizonts (rechte Seite) in den verschiedenen Testgebieten, obere Reihe Gebirge, mittlere Reihe Hügelland, untere Reihe Tiefland. Zu beachten sind Unterschiede in der Skalierung der y-Achsen.

7.4 Vergleich der Regionalisierungsansätze

Die Ergebnisse der Kreuzvaldierung ermöglichen es, die Güte der Vorhersagekraft der verschiedenen Regionalisierungsansätze für die einzelnen Zielvariablen zu vergleichen (Tab. 53). Beim Vergleich der Variablen untereinander ist zu beachten, dass Variable mit einer kleineren Varianz auch kleinere Residuen bei der Modellanpassung haben. Um sich dies zu verdeutlichen, können die Variablen herangezogen werden, bei denen die Anpassung der pls-Regression keinen signifikanten Einflussfaktor ergab und nur ein Interzept-Modell angepasst werden konnte. Das bedeutet, als Vorhersagewert diente für jeden Punkt lediglich der Mittelwert des Gesamtdatensatzes. So ergab z.B. die Anpassung der pH-Werte des Oh-Horizonts einen PMAE (mittlerer prozentualer absoluter Fehler) von 11,9 %, was im Vergleich zu anderen Variablen als sehr gut erschien, obwohl die Werte lediglich durch ihren Mittelwert vorhergesagt werden.

Zu Variablen mit PMAE's von unter 10 % gehört das C/N-Verhältnis und der pH-Wert in allen untersuchten Tiefenstufen, bzw. Auflagehorizonten, sowie der Humusvorrat des Oh-Horizonts und der Feinbodenvorrat des Mineralbodens. Speziell in der L+Of-Auflage konnten die Gehalte der Elemente Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor mit geringer Unsicherheit vorhergesagt werden. Auch hier wurden PMAE's von unter 10 % erreicht. Schwache bis sehr schlechte Ergebnisse wurden im Mineralboden für die austauschbaren Elementgehalte von Mangan, Magnesium, Natrium, Eisen und Calcium erzielt. Hier lagen die PMAE's meistens über 50 %, teilweise über 100 %. Ebenso war die Vorhersage dieser Größen mit einem hohen Bias von über 20 %, bei Mangan über 100 %, behaftet. Die Gesamtaustauschkapazität wiederum konnte mit PMAE's von unter 20 % relativ gut vorhergesagt werden. Auch in der Auflage konnten die Elementgehalte von Magnesium, Mangan und Calcium schlecht vorhergesagt werden.

Beim Vergleich der Verfahren erreichten die drei nicht-kombinierten Verfahren vergleichbare PMAE's (Tab. 53). Allerdings erzielte das Kriging der Originalvariablen die größte Treffgenauigkeit, d.h. der Bias [= systematischer Fehler] (in Tab. 53 nicht dargestellt) war am niedrigsten. Auch bei der mittleren absoluten Abweichung erreichte bei einigen Variablen das Kriging ohne vorhergehende Regression bessere Werte als die Regression. Dies war beim Gesamtgehalt an Mangan im Oh-Horizont (Interzept-Model), aber auch beim austauschbaren Mangan im Mineralboden der Fall. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hierbei Testgebietsweise regionalisiert wurde, während bei den übrigen Verfahren zunächst globale Trends über den Gesamtdatenbestand Sachsens modelliert wurden. Ansonsten unterschieden sich die drei nicht-kombinierten Verfahren nicht wesentlich voneinander. Bei den meisten Variablen konnte durch den Ansatz, auf ein allgemeines lineares Modell noch ein geostatistisches Verfahren aufzusatteln, die Vorhersagekraft gesteigert werden, wie z. B. bei Humusvorrat des Oh-Horizonts. Bei anderen Variablen wiederum, führte das Kriging zu keiner Verbesserung der Vorhersagekraft (z.B. austauschbares Natrium in der Tiefenstufe 0-10 cm).

Ein Beispiel verdeutlicht den Effekt, den die Wahl des Verfahrens auf die Regionalisierung hat (Abb. 105-Abb. 109). Die dargestellte Zielvariable ist das C/N-Verhältnis des Mineralbodens in

einer Tiefe von 0-10 cm für das Testgebiet Gebirge. Bei der pls-Regression (Abb. 105) konnten die extrahierten Faktoren am stärksten die Prädiktoren Bestand, Kalkung und Höhe erklären. Das Modellwahlverfahren beim linearen Modell ergab, dass nur die Prädiktoren Bestand und Kalkung einen signifikanten Einfluss hatten. Da das ganze Testgebiet gekalkt wurde, ergibt die resultierende Karte Unterschiede im C/N-Verhältnis nur dort, wo unterschiedliche Bestandestypen vorliegen (Abb. 106). Insgesamt nehmen die Werte eine größere Spanne ein als bei der pls-Regression. Das Kriging der Residuen hebt beim pls-Verfahren die Werte etwas an (Abb. 107), beim lm-Verfahren bringt das Kriging der Residuen in dem Beispiel keinen Unterschied hervor (Abb. 108). Das Kriging der Werte aus dem Testgebiet hat, wohl aufgrund eines hohen Nugget/Sill-Verhältnisses, den Effekt, dass die Vorhersage mittlere Werte ergab. Hier ist lediglich ein leichter Ost-West Trend erkennbar (Abb. 109).

Bei der Beurteilung welches Regionalisierungverfahren anzuwenden ist, sind verschiedene Aspekte zu beachten. Zunächst erschienen die Ergebnisse der allgemeinen linearen Modelle als unverdächtig gegenüber einer Überanpassung. Weiterhin konnte bei zahlreichen Modellen der pls-Regression kein Faktor extrahiert werden und die Ergebnisse der beiden Regressionsverfahren (pls und lm) unterschieden sich nicht wesentlich voneinander. Darüber hinaus erschien die Durchführung der geostatistischen Modellierung zum einen aufgrund der geringen Probepunktezahl als unsicher, zum anderen fehlte es in der Datenstruktur in der Regel an räumlicher Autokorrelation. Von daher muss geschlussfolgert werden, dass eine Regionalisierung der bodenchemischen Größen auf Grundlage der Anpassung allgemeiner linearer Modelle als sicherste Variante gelten muss. Die teilweise guten Ergebnisse die sich bei Anwendung oder bei Kombination mit dem Kriging-Verfahren erzielen ließen, verleiten zu dem Fehlschluss, dass dieses Verfahren zu bevorzugen ist. Hier muss sich aber die bereits erwähnte Unsicherheit des Kriging-Verfahrens bei bestehender Datenlage vor Augen geführt werden. Die Verbesserung der Vorhersagegüte ist weniger auf die räumliche Autokorrelation zurückzuführen sondern vielmehr darauf, dass bei diesem Verfahren allgemein die lokalen Verhältnisse stärker berücksichtigt wurden, als dies bei der Modellierung globale Trends über ganz Sachsen der Fall sein konnte. Dennoch sollte der Regionalisierungsansatz auf globalen Trends im gesamten Datensatz Sachsens aufbauen. Die Gefahr einer Überanpassung der Modelle kann so verringert und die Vorhersagegüte für wenig beprobte Regionen gesteigert werden. Die Beprobung angrenzender Gebiete kann die Güte der geostatistischen Modellierung auf eine verlässlichere Basis stellen, so dass dann ein kombinierter Ansatz nicht ausgeschlossen wäre.

Tab. 53: PMAE (Mittlere prozentuale absolute Abweichung) der per Kreuzvalidierung der einzelnen Methoden vorhergesagten Werte von den dazu gehörenden Messwerten, mit pls = pls-Regression, lm = lineares Modell, krig = „gewöhnliches " kriging, plskrig = pls-Regression + Kriging, lmkrig = lineares Modell + Kriging, CV = Variationskoeffizient, n = Anzahl der in die Kreuzvalisierung eingegangenen Werte.

	pls	lm	krig	plskrig	lmkrig	CV	n
AKe (Min. 0-10) [µmolc g^{-1}]	14,9	14,9	12,8	8,9	3,5	16,9	20
AKe (Min. 10-30) [µmolc g^{-1}]	21,7	19,9	23,6	10,1	7,8	30,8	39
aust. Al (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	26,4	24,0	20,6	11,1	7,9	42,9	53
aust. Al (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	24,1	26,9	23,4	13,4	20,7	52,1	53
Basensättigung oh. Na (Min. 0-10) [%]	70,9	70,9	70,9	43,3	43,2	114,2	45
Basensättigung oh. Na (Min. 10-30) [%]	47,7	51,3	51,9	11,3	12,3	104,0	42
C/N (Min. 0-10)	7,8	8,1	9,0	4,6	2,9	11,4	25
C/N (Min. 10-30)	11,9	14,5	12,3	6,3	9,8	20,7	54
C/N (L+Of)	9,6	7,6	8,5	6,4	6,2	10,8	36
C/N (Oh)	6,5	5,5	8,6	5,8	4,8	8,7	19
C (Min. 0-10) [%]	23,1	17,8	24,7	16,3	7,7	25,3	21
C (Min.10-30) [%]	38,6	38,6	30,6	23,2	24,5	57,4	54
C (L+Of) [%]	8,3	6,2	10,5	1,1	1,5	13,2	38
C (Oh) [%]	18,0	27,6	16,1	14,2	22,4	28,6	51
aust. Ca (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	99,5	75,6	89,1	54,3	15,1	145,3	41
aust. Ca (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	94,5	83,7	89,7	35,5	14,6	184,3	47
Humus-/Feinbodenvorrat (Min.0-10) [t ha^{-1}]	13,9	12,4	12,8	8,8	7,1	15,3	36
Humus-/Feinbodenvorrat (Min. 10-30) [t ha^{-1}]	12,1	11,3	10,2	11,1	10,5	12,4	23
Humus-/Feinbodenvorrat (L+Of) [t ha^{-1}]	34,4	36,7	35,5	27,6	26,2	43,7	38
Humus-/Feinbodenvorrat (Oh) [t ha^{-1}]	53,7	46,4	61,8	47,6	37,5	82,2	31
aust. Fe (Min.0-10) [mg g^{-1}]	55,0	58,9	39,2	44,3	50,8	70,0	36
aust. Fe (Min.10-30) [mg g^{-1}]	148,4	138,1	93,4	109,3	87,9	159,5	50
extr. Al (L+Of) [mg g^{-1}]	22,2	23,5	23,7	5,3	6,8	27,5	18
extr. Al (Oh) [mg g^{-1}]	19,5	13,5	17,1	18,0	9,2	23,1	19
extr. Ca (L+Of) [mg g^{-1}]	49,6	42,2	38,0	22,6	14,0	104,7	54
extr. Ca (Oh) [mg g^{-1}]	66,8	66,4	67,2	28,5	30,1	150,3	51
extr. Fe (L+Of) [mg g^{-1}]	22,1	22,1	21,0	10,2	10,2	26,2	53
extr. Fe (Oh) [mg g^{-1}]	22,9	28,3	21,4	10,4	17,3	40,3	45
extr. K (L+Of) [mg g^{-1}]	20,7	17,9	40,4	1,2	5,1	44,8	21
extr. K (Oh) [mg g^{-1}]	17,4	21,0	18,1	19,0	16,1	49,3	51
extr. Mg (L+Of) [mg g^{-1}]	59,5	51,0	50,6	21,5	9,2	110,6	49
extr. Mg (Oh) [mg g^{-1}]	44,5	48,4	49,2	17,3	22,6	109,0	52
extr. Mn (L+Of) [mg g^{-1}]	55,4	53,1	80,1	14,2	27,9	119,1	31

	pls	lm	krig	plskrig	lmkrig	CV	n
extr. Mn (Oh) [mg g^{-1}]	99,1	72,4	42,3	80,5	56,8	70,6	33
extr. Na (L+Of) [mg g^{-1}]	19,0	19,0	21,1	7,9	7,9	26,7	39
extr. Na (Oh) [mg g^{-1}]	25,6	30,4	29,0	14,6	20,3	58,4	52
extr. P (L+Of) [mg g^{-1}]	13,4	14,8	14,0	5,2	6,0	25,5	30
extr. P (Oh) [mg g^{-1}]	20,6	25,9	16,7	14,7	18,1	30,7	52
extr. S (L+Of) [mg g^{-1}]	12,6	15,0	13,8	7,5	6,5	17,0	35
extr. S (Oh) [mg g^{-1}]	21,2	25,7	18,4	14,5	16,7	26,1	48
aust. K (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	20,7	23,0	25,7	16,0	17,2	31,9	20
aust. K (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	23,2	20,6	18,8	13,0	6,9	26,9	30
aust. Mg (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	60,9	54,6	66,2	30,1	11,9	145,5	38
aust. Mg (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	40,7	45,6	53,4	10,1	3,3	81,9	39
aust. Mn (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	146,9	93,7	61,6	124,3	63,7	103,4	36
aust. Mn (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	92,0	121,1	67,7	64,4	77,0	111,1	49
N (Min. 0-10) [%]	25,2	17,4	17,5	21,3	9,1	29,6	29
N (Min. 10-30) [%]	36,8	34,0	31,5	22,2	18,2	55,1	53
N (L+Of) [%]	8,4	11,2	8,8	5,0	8,3	13,7	32
N (Oh) [%]	20,8	30,5	15,6	16,5	24,5	31,5	52
aust. Na (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	51,2	49,5	50,6	51,5	47,1	65,6	10
aust. Na (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	75,3	51,8	27,0	63,1	34,9	68,1	14
pH(KCl) (Min. 0-10)	5,6	5,1	5,8	2,2	1,7	8,2	50
pH(KCl) (Min. 10-30)	4,3	4,1	4,5	1,8	1,1	6,4	51
pH(KCl) (L+Of)	10,5	9,4	13,8	2,0	3,1	24,3	50
pH(KCl) (Oh)	11,9	10,4	12,0	10,4	5,2	21,2	49

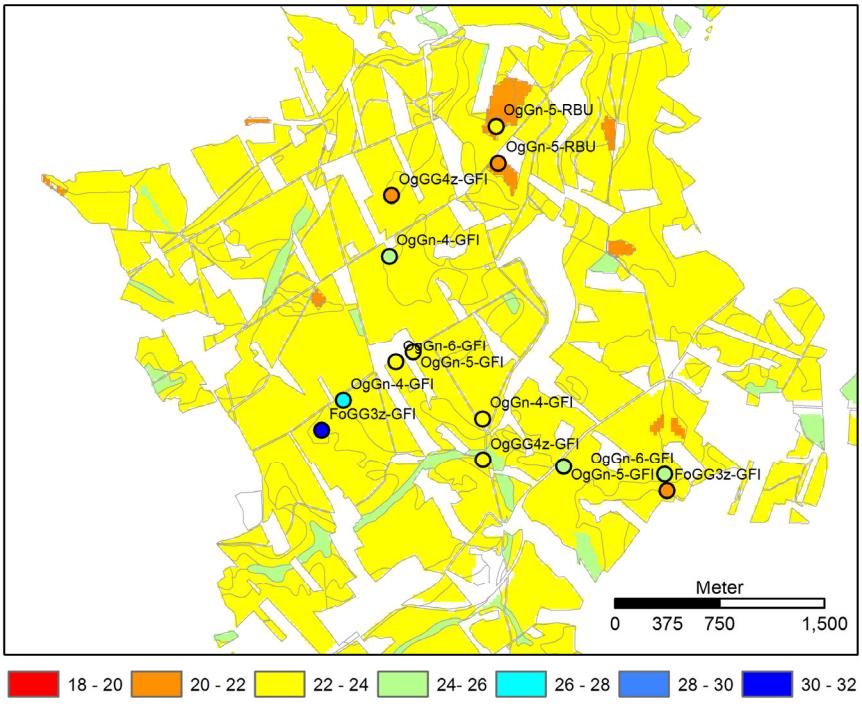

Abb. 105: Vorhersage des C/N-Verhältnisses (0-10 cm) mit pls-Regression im Testgebiet Gebirge (Ausschnitt, ○ = Beprobungspunkte).

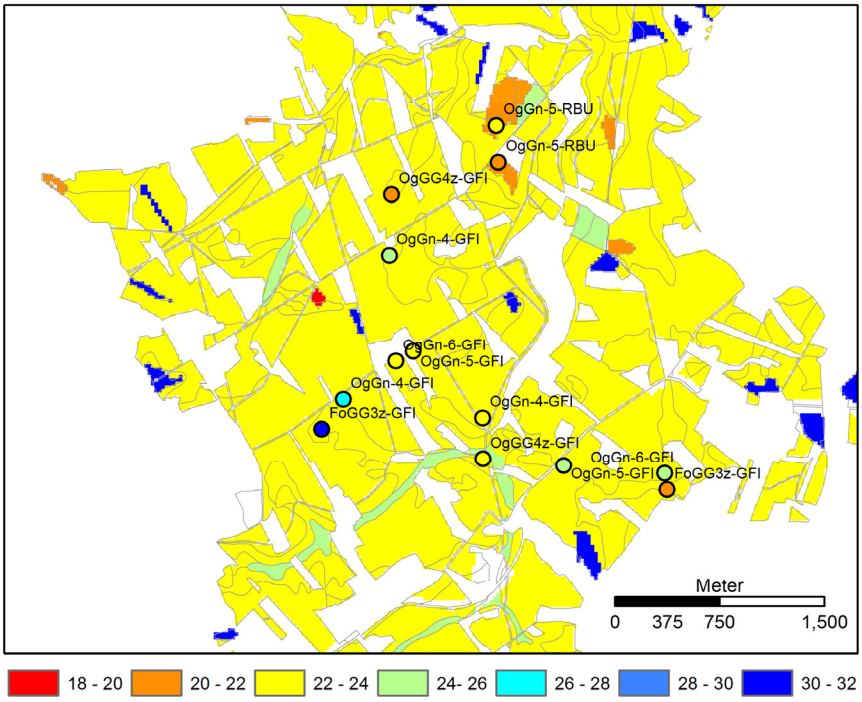

Abb. 106: Vorhersage des C/N-Verhältnisses (0-10 cm) mit dem linearen Modell (LM) im Testgebiet Gebirge (Ausschnitt, ○ = Beprobungspunkte).

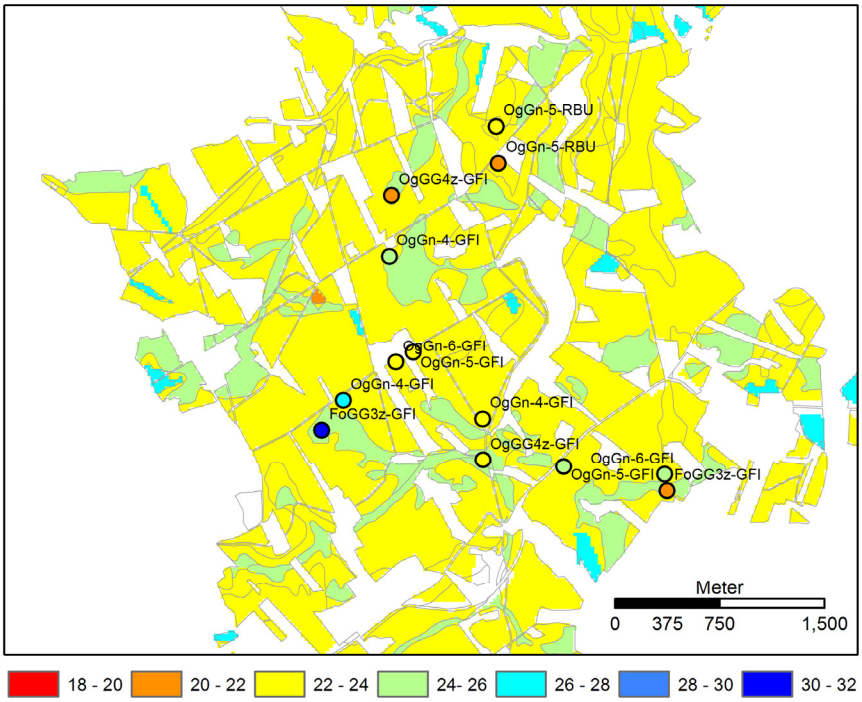

Abb. 107: Vorhersage des C/N-Verhältnisses (0-10 cm) mit pls-Regression und Kriging der Residuen im Testgebiet Gebirge (Ausschnitt, ○ = Beprobungspunkte).

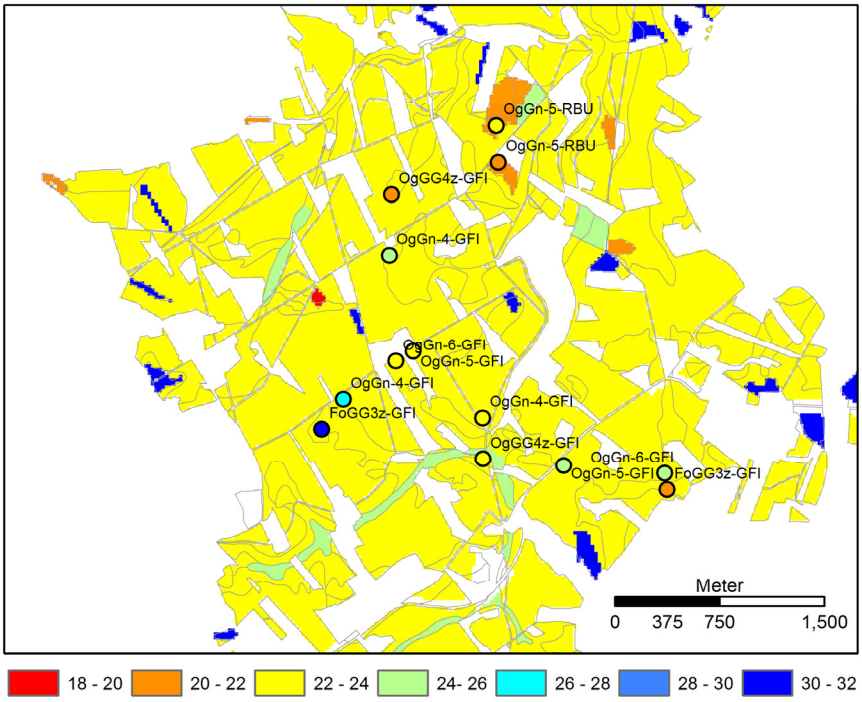

Abb. 108: Vorhersage des C/N-Verhältnisses (0-10 cm) mit dem linearen Modell (LM) und Kriging der Residuen im Testgebiet Gebirge (Ausschnitt, ○ = Beprobungspunkte).

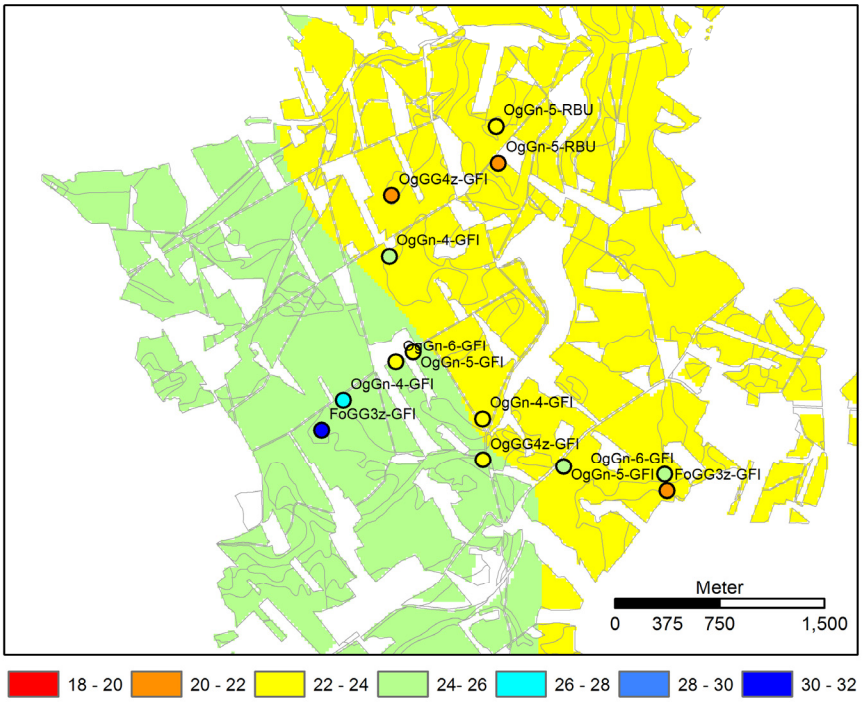

Abb. 109: Vorhersage des C/N-Verhältnisses (0-10 cm) per Kriging-Verfahren im Testgebiet Gebirge (Ausschnitt, ○ = Beprobungspunkte).

7.5 Regionalisierung ausgewählter Messgrößen

Für die Regionalisierung wurde das Verfahren mit dem linearen Model ausgewählt. Um den Effekt der beschriebenen Selektionsmethode (Kapitel 2.7.8) der Prädikoren auf die Vorhersagegüte abschätzen zu können, wurden einfaktorielle Modelle mit den Prädiktoren Bodenformengruppe, Bestandestyp, Kalkung und Höhe angepasste. Die Vorhersagegüte wurde wiederum per Kreuzvalidierung erfasst und den Ergebnissen des Gesamtmodells gegenübergestellt (Tab. 54). Es zeigte sich das bei 35 von 56 Variablen das Gesamtmodel mit am besten abschnitt und bei den übrigen der Unterschied zu dem bestplatzierten einfaktoriellen Model gering war. Für die ausgewählten Variablen wurden für jedes Testgebiet Karten mit Vorhersagewerten erzeugt (Anhang II). Dabei wurden als Vergleich zum Gesamtmodel (Anhang II.A) zusätzlich auch Karten erzeugt, die die Vorhersagewerte aus einfaktoriellen Modellen mit den Prädiktoren Bodenformengruppe (Anhang II.B) und Bestandestyp (Anhang II.C) erhielten. Die dargestellten Größen sind: pH(KCl) (Oh), pH(KCl) (Min. 0-10), C/N (Oh), C/N (Min. 0-10), die Basensättigung (Min. 0-30), die Gesamtvorräte, d.h. austauschbaren Vorräte (Min. 0-30), Mineralboden und extrahierbare Vorräte der Auflage, an Calcium, Magnesium und Kalium sowie die Summe der drei Basen und die Gesamtkohlenstoffvorräte. Die Vorhersage ergab für das C/N-Verhältnis gute Werte (Tab. 54), wobei die Übereinstimmung der Messwerte mit den vorhergesagten Werten im Tiefland eher geringer war als in den beiden übrigen Testgebieten (Anhang: Abb. II-1 bis Abb. II-6). Das C/N-Verhältnis des Oh-Horizonts ließ sich besser vorhersagen als das des Mineralboden 0-10 cm (Tab. 54, Anhang: Abb. II-1 bis Abb. II-6). Die Gesamtvorräte an Kohlenstoff (Anhang: Abb. II-7 bis Abb. II-9) und Calcium (Anhang: Abb. II-10 bis Abb. II-12) wurden relativ gut vorhergesagt. Allerdings tendierten im Tiefland die Vorhersage dazu, die Messwerte zu unterschätzen. Im Tief- und Hügelland wurden niedrige Magnesiumvorräte vorhergesagt, im Bergland hohe, wobei die Messwerte im Tiefland z.T. noch niedriger waren und im Bergland noch höher (Anhang: Abb. II-13 bis Abb. II-15). Die vorhergesagten Kaliumvorräte waren im Tiefland niedrig und im Hügel- und Bergland hoch (Anhang: Abb. II-16 bis Abb. II-18). Der Basenvorrat insgesamt wurde vor allem im Gebirge gut getroffen, im Tiefland dagegen eher überschätzt (Anhang: Abb. II-19 bis Abb. II-21). Bei der Basensättigung konnte nur ein geringer Einfluss der untersuchten Prädiktoren festgestellt werden (Tab. 54). Die Messwerte lagen im Hügelland und Bergland mit z.T. sehr niedrigen Werten unter der Vorhersage (Anhang: Abb. II-22 bis Abb. II-24). Die pH(KCl)-Werte im Oh-Horizont wurden von untersuchten Prädiktoren nur durch den Faktor Kalkung beeinflusst (Tab. 54). Demzufolge wurden für das Testgebiet Bergland höhere Werte vorhergesagt als für die anderen beiden Testgebiete (Anhang: Abb. II-25 bis Abb. II-27). Im Bergland wurden aber auch z.T. sehr hohe pH-Werte im Oh-Horizont gemessen. Im Mineralboden 0-10 cm wurden im Bergland die niedrigsten pH(KCl)-Werte vorhergesagt (Anhang: Abb. II-28 bis Abb. II-30). Insgesamt war die Schwankung der Messwerte relativ hoch.

Insgesamt weisen die regionalisierten Werte von den Messwerten je nach Messgröße Abweichungen auf. Bei Koppelung des Verfahrens (allgemeines lineares Model) mit dem Kriging würden diese Abweichungen nahezu verschwinden (Tab. 53). Hier sei allerdings auf die in

Kapitel 7.4 angestellten Überlegungen verwiesen, die zum Schluss kommen, dass dennoch das hier verwendete Regionalisierungsverfahren zu bevorzugen ist.

Tab. 54: Mittlere absolute Abweichung der per Kreuzvalidierung der einzelnen Methoden vorhergesagten Werte von den dazu gehörenden Messwerten, mit Wert = Mittel der Messwerte, gesamt = Gesamtmodel, Bofo = einfaktorielles Model mit dem Prediktor Bodenformengruppe, Best = einfaktorielles Model mit dem Prediktor Bestandestyp, Kalk = einfaktorielles Model mit dem Prediktor Kalkung, Höhe = einfaktorielles Model mit dem Prediktor Höhe ü. NN.

	Wert	gesamt	Bofo	Best	Kalk	Höhe
AKe (Min. 0-10) [µmolc g-1]	98,1	18,6	18,8	25,4	28,7	39,5
AKe (Min. 10-30) [µmolc g-1]	64,0	17,0	17,5	19,9	22,4	29,8
aust. Al (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	0,56	0,15	0,14	0,15	0,19	0,24
aust. Al (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	0,45	0,13	0,14	0,14	0,16	0,22
Basensättigung oh. Na (Min. 0-10) [%]	14,1	9,0	8,9	9,0	8,9	8,9
Basensättigung oh. Na (Min. 10-30) [%]	9,6	4,7	4,7	5,3	5,3	5,3
C/N (Min. 0-10)	24,7	2,8	2,7	2,8	2,9	3,1
C/N (Min. 10-30)	22,2	3,7	3,4	3,6	3,7	4,0
C/N (L+Of)	24,4	2,2	2,6	2,3	2,5	2,6
C/N (Oh)	22,5	1,7	1,8	1,7	1,9	2,2
C (Min. 0-10) [%]	4,1	1,0	1,0	1,3	1,2	1,4
C (Min. 10-30) [%]	1,7	0,6	0,6	0,9	0,7	0,8
C (L+Of) [%]	40,7	3,6	4,4	3,6	4,2	4,4
C (Oh) [%]	27,7	6,2	4,9	5,3	5,4	6,2
aust. Ca (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	0,21	0,13	0,13	0,21	0,21	0,21
aust. Ca (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	0,09	0,05	0,05	0,09	0,09	0,09
Humus-/Feinbodenvorrat (Min. 0-10) [t ha^{-1}]	945	146	149	186	162	243
Humus-/Feinbodenvorrat (Min.10-30) [t ha^{-1}]	2110	345	335	480	391	621
Humus-/Feinbodenvorrat (L+Of) [t ha^{-1}]	51	26	26	26	24	26
Humus-/Feinbodenvorrat (Oh) [t ha^{-1}]	75	34	38	38	34	38
aust. Fe (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	0,14	0,07	0,07	0,08	0,08	0,10
aust. Fe (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	0,05	0,04	0,06	0,06	0,05	0,06
extr. Al (L+Of) [mg g^{-1}]	5,59	1,60	1,76	1,60	1,76	1,76
extr. Al (Oh) [mg g^{-1}]	10,57	2,61	2,45	2,61	2,88	3,43
extr. Ca (L+Of) [mg g^{-1}]	7,49	3,42	3,95	5,87	3,40	5,84
extr. Ca (Oh) [mg g^{-1}]	2,70	1,50	1,98	1,98	1,49	1,98
extr. Fe (L+Of) [mg g^{-1}]	7,82	2,25	2,24	2,25	2,24	2,24
extr. Fe (Oh) [mg g^{-1}]	13,91	3,80	3,97	3,99	3,80	3,97
extr. K (L+Of) [mg g^{-1}]	1,23	0,24	0,39	0,26	0,33	0,39
extr. K (Oh) [mg g^{-1}]	1,48	0,44	0,43	0,46	0,48	0,66

	Wert	gesamt	Bofo	Best	Kalk	Höhe
extr. Mg (L+Of) [mg g^{-1}]	2,44	1,37	2,23	2,24	1,36	2,23
extr. Mg (Oh) [mg g^{-1}]	1,60	0,70	0,98	0,98	0,70	0,98
extr. Mn (L+Of) [mg g^{-1}]	0,65	0,44	0,53	0,44	0,46	0,53
extr. Mn (Oh) [mg g^{-1}]	0,18	0,11	0,13	0,13	0,11	0,13
extr. Na (L+Of) [mg g^{-1}]	0,11	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
extr. Na (Oh) [mg g^{-1}]	0,16	0,05	0,06	0,05	0,05	0,06
extr. P (L+Of) [mg g^{-1}]	0,89	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15
extr. P (Oh) [mg g^{-1}]	0,78	0,16	0,15	0,16	0,16	0,19
extr. S (L+Of) [mg g^{-1}]	1,94	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
extr. S (Oh) [mg g^{-1}]	1,71	0,41	0,41	0,41	0,37	0,41
aust. K (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	0,042	0,011	0,011	0,014	0,017	0,017
aust. K (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	0,031	0,010	0,009	0,010	0,012	0,014
aust. Mg (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	0,061	0,035	0,037	0,066	0,042	0,066
aust. Mg (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	0,025	0,012	0,013	0,025	0,022	0,025
aust. Mn (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	0,016	0,014	0,015	0,015	0,014	0,015
aust. Mn (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	0,020	0,019	0,019	0,019	0,016	0,019
N (Min. 0-10) [%]	0,174	0,046	0,045	0,060	0,059	0,067
N (Min. 10-30) [%]	0,078	0,024	0,026	0,032	0,029	0,039
N (L+Of) [%]	1,697	0,225	0,171	0,180	0,190	0,228
N (Oh) [%]	1,255	0,316	0,216	0,256	0,251	0,317
aust. Na (Min. 0-10) [mg g^{-1}]	0,011	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004
aust. Na (Min. 10-30) [mg g^{-1}]	0,009	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004
pH(KCl) (Min. 0-10)	3,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
pH(KCl) (Min. 10-30)	3,7	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
pH(KCl) (L+Of)	3,8	0,4	0,5	0,6	0,5	0,7
pH(KCl) (Oh)	3,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4

Literaturverzeichnis

AD-HOC-AG-BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA 5). Stuttgart: Schweizerbart.

AK_STANDORTSKARTIERUNG (2003): Forstliche Standortsaufnahme 6. Auflage. Eching bei München: IHW-Verlag.

AKIN H. UND SIEMES H. (1988): Praktische Geostatistik. Eine Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 304 S.

ALRIKSSON A. UND ERIKSSON H.M. (1998): Variations in mineral nutrient and C distribution in the soil and vegetation compartments of five temperate tree species in NE Sweden. Forest Ecology and Management 108 (3): S. 261-273.

AUGUSTO L. UND RANGER J. (2001): Impact of tree species on soil solutions in acidic conditions. Ann For Sci 58 (1): S. 47-58.

AUGUSTO L., RANGER J., BINKLEY D. UND ROTHE A. (2002): Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. Annals of Forest Science 59 (3): S. 233-253.

AUGUSTO L., TURPAULT M.-P. UND RANGER J. (2000): Impact of forest tree species on feldspar weathering rates. Geoderma 96 (3): S. 215-237.

BACKES J. (1993): Aufbau eines Waldbodeninformationssystems und Ergebnisse der saarländischen Waldbodeninventur. Saarbrücken.

BACKHAUS K., ERICHSON B., PLINKE W., SCHUCHARD-FICHER C. UND WEIBER R. (1987): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 406 S.

BERG B. (1986): Nutrient release from litter and humus in coniferous forest soils - a mini review. Scandinavian Journal of Forest Research 1 (1-4): S. 359-369.

BINKLEY D. UND VALENTINE D. (1991): Fifty-year biogeochemical effects of green ash, white pine, and Norway spruce in a replicated experiment. Forest Ecology and Management 40 (1–2): S. 13-25.

BLOCK J., EICHHORN J., GEHRMANN J., KÖLLING C., MATZNER E., MEIWES K.J., V. WILPERT K. UND WOLFF B. (2000): Kennwerte zur Charakterisierung des ökochemischen Bodenzustandes und des Gefährdungspotentials durch Bodenversauerung und Stickstoffsättigung an Level-II-Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen. Bonn: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 167 S.

COURCHESNE F. UND GOBRAN G.R. (1997): Mineralogical Variations of Bulk and Rhizosphere Soils from a Norway Spruce Stand. Soil Science Society of America Journal 61 (4): S. 1245-1249.

CROZIER C.R. UND BOERNER R.E.J. (1984): Correlations of understory herb distribution patterns with microhabitats under different tree species in a mixed mesophytic forest. Oecologia 62 (3): S. 337-343.

DREVER J.I. (1994): The effect of land plants on weathering rates of silicate minerals. Geochimica et Cosmochimica Acta 58 (10): S. 2325-2332.

DURKA W., SCHULZE E.-D., GEBAUER G. UND VOERKELIUST S. (1994): Effects of forest decline on uptake and leaching of deposited nitrate determined from 15N and 18O measurements. Nature 372 (6508): S. 765-767.

DUTTER R. (1985): Geostatik. Eine Einführung mit Anwendungen. Mathematische Methoden in der Technik Band 2, Stuttgart: Teubner, 64 S.

FRITZ H., ABIY M., KLINGER T. UND MAKESCHIN F. (2009): Zukünftige Entwicklung bodenchemischer Parameter auf ehemals emissionsbeeinflussten Waldstandorten. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz 8: S. 9-20.

GAFA (2007): Handbuch Forstliche Analytik. Eine Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich: Gutachterausschuss Forstliche Analytik.

GÄRDENÄS A.I. (1998): Soil organic matter in European forest floors in relation to stand characteristics and environmental factors. Scandinavian Journal of Forest Research 13 (1-4): S. 274-283.

GOWER S.T. UND SON Y. (1992): Differences in Soil and Leaf Litterfall Nitrogen Dynamics for Five Forest Plantations. Soil Science Society of America Journal 56 (6): S. 1959-1966.

GUNDERSEN P., CALLESEN I. UND DE VRIES W. (1998): Nitrate leaching in forest ecosystems is related to forest floor CN ratios. Environmental Pollution 102 (1, Supplement 1): S. 403-407.

HOFMANN G. (1995): Kiefernökosysteme im Wandel - Vegetationswandel in nordostdeutschen Kiefernwal-dungen durch atmosphärischen Eintrag von Stickstoffverbindungen. Der Wald 45 (8): S. 262-267.

HORN R. (1994): The effect of aggregation of soils on water, gas, and heat transport. In*:* SCHULZE, E.-D. (Ed.) Flux Control in Biological Systems: From Enzymes to Populations and Ecosystems, San Diego: Academic press, Ing., S. 335-364.

KLOSE S. UND MAKESCHIN F. (2004): Chemical properties of forest soils along a fly-ash deposition gradient in eastern Germany. European Journal of Forest Research 123 (1): S. 3-11.

LANDMANN G., BONNEAU M., BOUHOT-DELDUC L., FROMARD F., CHÉRET V., DAGNAC J. UND SOUCHIER B. (1995): Crown Damage in Norway Spruce and Silver Fir: Relation to Nutritional Status and Soil Chemical Characteristics in the French Mountains. In*:* LANDMANN, G., BONNEAU, M. UND KAENNEL, M. (Eds.) Forest Decline and Atmospheric Deposition Effects in the French Mountains: Springer Berlin Heidelberg, S. 41-81.

MATZNER E. UND ULRICH B. (1983): The Turnover of Protons by Mineralization and Ion Uptake in a Beech (Fagus Silvatica) and a Norway Spruce Ecosystem. In*:* ULRICH, B. UND PANKRATH, J. (Eds.) Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems: Springer Netherlands, S. 93-103.

MEENTEMEYER V. UND BERG B. (1986): Regional variation in rate of mass loss of Pinus sylvestris needle litter in Swedish pine forests as influenced by climate and litter quality. Scandinavian Journal of Forest Research 1 (1-4): S. 167-180.

MUYS B. (1995): The influence of tree species on humus quality and nutrient availability on a regional scale (Flanders, Belgium). In*:* NILSSON, L.O., HÜTTL, R.F. UND JOHANSSON, U.T. (Eds.) Nutrient Uptake and Cycling in Forest Ecosystems: Springer Netherlands, S. 649-660.

NIHLGÅRD B. (1969): The microclimate in a beech and a spruce forest - a comparative study from Kongalund, Scania, Sweden. Botaniska Notiser 122: S. 333-352.

NIHLGÅRD B. (1971): Pedological Influence of Spruce Planted on Former Beech Forest Soils in Scania, South Sweden. Oikos 22 (3): S. 302-314.

NORDÉN U. (1994): Influence of broad-leaved tree species on pH and organic matter content of forest topsoils in Scania, South Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research 9 (1-4): S. 1-8.

OVINGTON J.D. (1953): Studies of the Development of Woodland Conditions Under Different Trees: I. Soils pH. Journal of Ecology 41 (1): S. 13-34.

OVINGTON J.D. (1954): Studies of the Development of Woodland Conditions Under Different Trees: The Forest Floor. Journal of Ecology 42 (1): S. 71-80.

RAULUND-RASMUSSEN K., BORGGAARD O.K., HANSEN H.C.B. UND OLSSON M. (1998): Effect of natural organic soil solutes on weathering rates of soil minerals. European Journal of Soil Science 49 (3): S. 397-406.

RAULUND-RASMUSSEN K. UND VEJRE H. (1995): Effect of tree species and soil properties on nutrient immobilization in the forest floor. Plant and Soil 168-169 (1): S. 345-352.

SCHRÖDER W., VETTER L. UND FRÄNZLE O. (1994): Neuere statistische Verfahren und Modellbildung in der Geoökologie. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 348 S.

SCHULZE E.-D., BECK E. UND MÜLLER-HOHENSTEIN K. (2005): Plant Ecology. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 702 S.

SCHULZE G. UND KOPP D. (1995): Anleitung für die forstliche Standortserkundung im nordostdeutschen Tiefland. Teile A, B, C. (=SEA 95). zuständ Minist der Länder Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Sachsen.

SIKORA L.J., YAKOVCHENKO V., CAMBARDELLA C.A. UND DORAN J.W. (1996): Assessing Soil Quality by Testing Organic Matter. In*:* MAGDOFF, F.R., TABATABAI, M.A. UND HANLON, E.A. (Eds.) Soil Organic Matter: Analysis and Interpretation, Madison, WI: Soil Science Society of America, S. 41-50.

STROBEL B.W., BERNHOFT I. UND BORGGAARD O. (1999): Low-molecular-weight aliphatic carboxylic acids in soil solutions under different vegetations determined by capillary zone electrophoresis. Plant and Soil 212 (2): S. 115-121.

ULRICH B. (1988): Ökochemische Kennwerte des Bodens. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 151 (3): S. 171-176.

ULRICH B. (1995): Die Entwicklung der Waldschäden aus ökosystemarer Sicht. Wirkungskomplex Stickstoff und Wald: Umweltbundesamt Berlin 28/95 S. 9–19.

UNECE ICP FORESTS (2006): Sampling and Analysis of Soil. In: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, Manual Part IIIa. Hamburg.

V. ZEZSCHWITZ E. (1985): Qualitätsänderungen des Waldhumus. Forstw Cbl 104 (1): S. 205-220.

WARD J.H. (1963): Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. Journal of the American Statistical Association 58 (301): S. 236-244.

WELLBROCK N. ET AL. (2006): Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen. Berlin: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft und Forsten.

WOLFF B. UND RIEK W. (1996): Deutscher Waldbodenbericht 1996 - Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung in Wald (BZE) 1987-1993. Bonn: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.

ZAR J.H. (1984): Biostatistical analysis. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 717 S.

ZIRLEWAGEN D. (2009): Regionalisierung der bodenchemischen Drift in der Dübener Heide im Zeitraum 1995-2006. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz 8 (21-30).

Thünen Report

Bereits in dieser Reihe erschienene Hefte – *Volumes already published in this series*

1 - 17	siehe http://www.ti.bund.de/de/infothek/publikationen/thuenen-report/
18	Patrick Küpper, Stefan Kundolf und Anne Margarian **Neue Beteiligungs- und Steuerungsprozesse in der ländlichen Entwicklung**
19	Frank Offermann, Claus Deblitz, Burkhard Golla, Horst Gömann, Hans-Dieter Haenel, Werner Kleinhanß, Peter Kreins, Oliver von Ledebur, Bernhard Osterburg, Janine Pelikan, Norbert Röder, Claus Rösemann, Petra Salamon, Jürn Sanders, Thomas de Witte **Thünen-Baseline 2013 – 2023: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland**
20	Gerald Rahmann und Uygun Aksoy (Eds.) **Building Organic Bridges – Volume 1: Argentina – France** **Building Organic Bridges – Volume 2: Germany – India** **Building Organic Bridges – Volume 3: Indonesia – Sri Lanka** **Building Organic Bridges – Volume 4: Sweden – Viet Nam**
21	Claudia Heidecke, Ulrike Hirt, Peter Kreins, Petra Kuhr, Ralf Kunkel, Judith Mahnkopf, Michael Schott, Björn Tetzlaff, Markus Venohr, Andrea Wagner und Frank Wendland Endbericht zum Forschungsprojekt **„Entwicklung eines Instrumentes für ein flussgebietsweites Nährstoffmanagement in der Flussgebietseinheit Weser“** **AGRUM⁺-Weser**
22	Walter Dirksmeyer, Ludwig Theuvsen und Maike Kayser (Hrsg.) **Aktuelle Forschung in der Gartenbauökonomie –** Tagungsband zum 1. Symposium für Ökonomie im Gartenbau
23	Karsten Mohr, Jerzy Suda, Hans Kros, Christian Brümmer, Werner L. Kutsch, Miriam Hurkuck, Elisabeth Woesner, Wim Wesseling **Atmosphärische Stickstoffeinträge in Hochmoore Nordwestdeutschlands und Möglichkeiten ihrer Reduzierung – eine Fallstudie aus einer landwirtschaftlich intensiv genutzten Region**
24	Raphael Albrecht **Ein Ansatz zur Abschätzung der interregionalen Wettbewerbsfähigkeit der Zuckerrübenproduktion – am Beispiel ausgewählter europäischer Regionen**
25	Ute Petersen, Hans-Joachim Weigel **Klimaresilienz durch Agrobiodiversität?** Literaturstudie zum Zusammenhang zwischen Elementen der Agrobiodiversität und der Empfindlichkeit von landwirtschaftlichen Produktionssystemen gegenüber dem Klimawandel
26	Mirko Liesebach (Hrsg.) **FastWOOD II: Züchtung schnellwachsender Baumarten für die Produktion nachwachsender Rohstoffe im Kurzumtrieb** – Erkenntnisse aus 6 Jahren FastWOOD
27	Claus Rösemann, Hans-Dieter Haenel, Ulrich Dämmgen, Annette Freibauer, Sebastian Wulf, Brigitte Eurich-Menden, Helmut Döhler, Carsten Schreiner, Beate Bauer, Bernhard Osterburg **Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2013** **Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2013**

28 Martin T. Bohl, Hervé Ott und Ernst-Oliver von Ledebur
Kurzfristige Dynamik von Preisbildungsprozessen deutscher Agrarrohstoffe - Abschlussbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung für das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

29 Kurt-Jürgen Hülsbergen, Gerold Rahmann (Hrsg.)
Klimawirkungen und Nachhaltigkeit ökologischer und konventioneller Betriebssysteme – Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben, Forschungsergebnisse 2013-2014

30 Horst Gömann, Andrea Bender, Andreas Bolte, Walter Dirksmeyer, Hermann Englert, Jan-Henning Feil, Cathleen Frühauf, Marlen Hauschild, Sandra Krengel, Holger Lilienthal, Franz-Josef Löpmeier, Jürgen Müller, Oliver Mußhoff, Marco Natkhin, Frank Offermann, Petra Seidel, Matthias Schmidt, Björn Seintsch, Jörg Steidl, Kathrin Strohm, Yelto Zimmer
Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)

31 Jan L. Wenker und Sebastian Rüter
Ökobilanz-Daten für holzbasierte Möbel

32 **Ländliche Lebensverhältnisse im Wandel 1952, 1972, 1993, 2012**

Luisa Vogt, Ralf Biernatzki, Michael Kriszan und Wolf Lorleberg
Volume 1 – Dörfer als Wohnstandorte

Simone Helmle und Carmen Kuczera
Volume 2 – Typisch ist das vermeintlich Untypische: Alltag von Dorfbewohnern

Andreas Keil, Charlotte Röhner, Ina Jeske, Michael Godau, Stefan Padberg, Jennifer Müller, Nur Seyfi und Mira Schraven
Volume 3 – Kindheit im Wandel

Stephan Beetz unter Mitarbeit von Alexander Voigt, Anna-Clara Gasch und Sarah Rodriguez-Abello
Volume 4 – Soziale Unterstützungsstrukturen im Wandel

Michaela Evers-Wölk, Britta Oertel, Sie Liong Thio, Carolin Kahlisch und Matthias Sonk
Volume 5 – Neue Medien und dörflicher Wandel

33 Anja-Kristina Techen, Elke Ries, Annett Steinführer
Evaluierung der Gewässerschutzberatung in Hessen im Kontext der EU-Wasserrahmenrichtlinie: Auswirkungen auf Wissen und Handeln von Landwirten

34 Jan T. Benthien, Sabrina Heldner, Martin Ohlmeyer, Christian Bähnisch, Jörg Hasener, Clemens Seidl, Alfred Pfemeter, Christian Kathmann
Untersuchung der Faserqualität von TMP für die MDF-Produktion – Abschlussbericht zum FNR-Vorhaben „Fiber-Impact“ (FKZ: 22013211)

35 Andreas Tietz
Überregional aktive Kapitaleigentümer in ostdeutschen Agrarunternehmen: Bestandsaufnahme und Entwicklung

36 Nicole Wellbrock, Erik Grüneberg, Daniel Ziche, Nadine Eickenscheidt, Marieanna Holzhausen, Juliane Höhle, Rainer Gemballa, Henning Andreae
Entwicklung einer Methodik zur stichprobengestützten Erfassung und Regionalisierung von Zustandseigenschaften der Waldstandorte

Thünen Report 36

Entwicklung einer Methodik zur stichprobengestützten Erfassung und Regionalisierung von Zustandseigenschaften der Waldstandorte

Nicole Wellbrock et al., 2015

Der Anhang ist verfügbar unter:
http://www.blumwald.de/bze/download

THÜNEN

Thünen Report 36
Herausgeber/Redaktionsanschrift

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

www.ti.bund.de

ISBN 9783865761521