

Rheinland-Pfalz



Mitteilungen
aus der Forstlichen Versuchsanstalt
Rheinland-Pfalz

Nr. 35/96

J. Block, O. Bopp, R. Butz-Braun, U. Wunn

Sensitivität rheinland-pfälzischer Waldböden

gegenüber Bodendegradation durch

Luftschadstoffbelastung

ISSN 0931 - 9662 Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz Nr. 35/96

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung
sowie der Übersetzung vorbehalten

Herausgeber: Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz

Verantwortlich: Der Leiter der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz

Dokumentation: Mitt. FVA, Trippstadt
Nr. 35/96, 191 S.

Zu beziehen über die Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Schloß, D-67705 Trippstadt

1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861.

1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861.

1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861.

1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861.

1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861.

1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861. 10th Nov. 1861.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Übersicht	1
Abstract	2
1. Einführung und Zielsetzung.....	3
2. Aufbau einer Waldbodendatenbank.....	6
2.1 Aufgaben und Ziele der Waldbodendatenbank.....	6
2.2 Struktur der Waldbodendatenbank	7
2.3 Funktionalität der Waldbodendatenbank.....	13
2.4 Literatur	14
3. Beziehungen zwischen Bodenparametern, Nadelinhaltsstoffen und Kronenzustand.....	15
3.1 Problemstellung	15
3.2 Datengrundlage.....	16
3.3 Statistische Verfahren.....	16
3.3.1 Kanonische Korrelations- und Redundanzanalyse	17
3.3.2 Multiple Korrelationsanalyse und Regression	18
3.3.3 Ausreißer.....	19
3.3.4 Software.....	19
3.3.5 Hinweise zur Interpretation	19
3.4 Ergebnisse und Diskussion	20
3.4.1 Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Bodenkompartmenten	20
3.4.2 Zusammenhänge zwischen den Bodenkompartmenten und den Nadelspiegelwerten.....	27
3.4.3 Zusammenhänge zwischen dem Kronenzustand und den Bodenkompartmenten sowie Nadelspiegelwerten.....	31
3.5 Zusammenfassende Wertung.....	34
3.6 Literatur	41

4.	Ökochemische Ausstattung wesentlicher Waldboden- substrate und Bewertung ihrer Empfindlichkeit gegenüber Bodendegradation durch Luftschadstoffbelastung	43
4.1	Problemstellung	43
4.2	Ausscheidung von Ausgangssubstratgruppen der Bodenbildung	43
4.3	Ökochemische Charakterisierung der Ausgangssubstrat- gruppen der Bodenbildung.....	45
4.4	Einfluß der Bestockung auf den Bodenzustand	77
4.5	Bewertung der Empfindlichkeit der Ausgangssubstrat- gruppen gegenüber Bodendegradation durch Luftschadstoff- belastung und Ableitung von Behandlungsvorschlägen	82
4.6	Literatur	93
5.	Bewertung der Sensitivität großräumig bodenkundlich kartierter Flächeneinheiten gegenüber fortschreitender Bodenversauerung und Nährelementverarmung	97
5.1	Problemstellung und Zielsetzung	97
5.2	Material.....	99
5.2.1	Bodenprofilaten	99
5.2.2	Kartengrundlage und Kartierungsverfahren.....	99
5.2.3	Das Untersuchungsgebiet	100
5.2.4	Die Kartiereinheiten und ihre Böden.....	102
5.3	Methoden	106
5.3.1	Stratifizierung der Bodenprofile	106
5.3.2	Digitalisierung der Manuskriptkarten der BÜK 200 Hunsrück.....	107
5.3.3	Konzept zur Bewertung von Bodenprofilaten	109
5.3.4	Begründung für die Auswahl und Gewichtung der wertgebenden Kriterien.....	113
5.3.4.1	Versauerungsstatus	113
5.3.4.2	Nährelementstatus.....	119
5.3.4.3	Durchlässigkeit	122
5.4	Bewertung der Sensitivität der Bodengesellschaften gegenüber fortschreitender Bodenversauerung und Nährelementverarmung	124
5.4.1	Versauerungsstatus	127
5.4.2	Nährelementstatus.....	132
5.4.3	Gruppierung der Bodengesellschaften vergleichbarer Sensitivität: Gesamtergebnis	138

5.5	Überprüfung der Validität des Bewertungsverfahrens.....	149
5.5.1	Versauerungsstatus	151
5.5.2	Nährelementstatus.....	153
5.5.3	Bodensensitivität.....	156
5.5.4	Abschließende Wertung und Schlußfolgerungen	158
5.6	Zusammenfassende Diskussion und Schlußfolgerungen.....	162
5.6.1	Konsequenzen aus den Untersuchungsbefunden für die bodenschutzrelevante Bodenkartierung und die boden- kundliche Feldaufnahme.....	162
5.6.2	Bewertung des Verfahrens.....	169
5.6.3	Abschließende Wertung.....	172
5.7	Literatur	174
6.	Zusammenfassung	179
7.	Summary	186

Anhang

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry should be supported by a valid receipt or invoice to ensure transparency and accountability.

2. The second section outlines the procedures for handling discrepancies between the recorded amounts and the actual cash received. It states that any such variance must be investigated immediately and reported to the appropriate authority.

3. The third part of the document details the process for reconciling the accounts at the end of each month. It requires that the total amount recorded in the books must match the total amount shown on the bank statements.

4. The fourth section discusses the role of the internal audit department in monitoring the financial records. It notes that the audit team will conduct regular reviews to identify any potential areas of concern.

5. The final part of the document provides a summary of the key findings and recommendations. It concludes that the current financial controls are generally sound but need to be strengthened in certain areas to prevent future issues.

Page 10

Übersicht

Zur Herleitung von Informationen über die Sensitivität von Waldböden gegenüber Versauerung und Nährelementverarmung sowie über die Verbreitung und Lage in dieser Hinsicht besonders empfindlicher Waldareale wurden alle verfügbaren Analysedaten von Waldbodenprofilen aus Rheinland-Pfalz ausgewertet. Hierzu wurden die Daten von ca. 1300 Bodenprofilen aus der forstlichen Standortkartierung, der landesweiten Waldbodenzustandserhebung und aus dem forstlichen Versuchswesen in einer relationalen Datenbank zusammengeführt.

Soweit vorhanden wurden die Waldbodendaten um Nadelspiegelwerte und Kronenzustandskennwerte ergänzt und mit Hilfe eingehender statistischer Analysen auf Beziehungen zwischen Bodenparametern, Nadelinhaltsstoffen und Kronenzustand überprüft. Zwischen den unterschiedlichen Bodenkompartmenten ergaben sich enge statistische Zusammenhänge, die sich über Gemeinsamkeiten im Versauerungsstatus auch kausal erklären lassen. Unerwartet enge statistische Zusammenhänge wurden auch zwischen Humusaufgabe und Mineralbodenfestphase zum mittleren Nadelverlust des untersuchten Kollektivs festgestellt. Mit einer Verschlechterung des Humuszustandes, zunehmender Versauerung des Mineralbodens und abnehmenden Kalium- und Kalziumgehalten am Austauschergang nimmt der mittlere Nadelverlust des Probebaumkollektivs zu. Diese Befunde sollten allerdings anhand eines umfangreicheren Stichprobenkollektivs überprüft werden.

Weiterhin wurde anhand des umfangreichen Datenmaterials der Waldbodendatenbank die ökochemische Ausstattung wesentlicher rheinland-pfälzischer Waldbodensubstratgruppen differenziert beschrieben. Aus den ökochemischen Charakteristika wurden die Empfindlichkeit der einzelnen Substratgruppen gegenüber Bodenversauerung und Basenverarmung abgeschätzt und differenzierte Behandlungsvorschläge zum Schutz vor weiterer Bodendegradation abgeleitet. Der flächenmäßig bedeutsamste Teil der rheinland-pfälzischen Waldbodensubstrate erwies sich als stark versauert und basenarm. Als objektbezogene Bodenschutzmaßnahmen werden neben Kalkungen auf den stark versauerten Standorten waldbauliche Maßnahmen empfohlen, die vor allem auf eine Einbeziehung der im tieferen Mineralboden vielfach reichlicheren Basenvorräte in den Nährstoffkreislauf des Ökosystems zielen.

Am Beispiel des Hunsrücks wird die Disposition der Waldböden gegenüber weiterer Versauerung und Nährelementverarmung flächenbezogen in Form einer „Sensitivitätskarte“ dargestellt. Hierzu wurden die Daten von 337 Bodenprofilen den Kartiereinheiten (Bodengesellschaften) einer neu bearbeiteten Bodenübersichtskarte (1:200 000) zugeordnet und mit Hilfe eines rechnergestützten Verfahrens anhand der Indikatoren *Versauerungsstatus*, *Nährelementstatus* und *Durchlässigkeit des Unterbodens* die Sensitivität der einzelnen Bodengesellschaften bewertet. Nur etwa ein Viertel der Waldfläche des Hunsrücks nehmen Bodengesellschaften ein, die eine vergleichsweise geringe Sensitivität gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung aufweisen, da sie noch über ausreichende Basenvorräte verfügen. Die Böden dieser Bodengesellschaften sind im Deckschichtenaufbau durch das Vorhandensein einer Mittellage gekennzeichnet. Bei drei Vierteln der Waldfläche des Hunsrücks muß aufgrund der tiefreichenden starken Versauerung und Basenverarmung eine hohe bis sehr hohe Sensitivität gegenüber weiterer Bodendegradation angenommen werden. Hierbei handelt es sich vor allem um Böden der quarzitischen Hochlagen und lößlehmarne Bereiche der Ton-schiefer-Hochflächen.

Sensitivity of forest soils in Rheinland-Pfalz against degradation due to air pollution impacts

Abstract

To gain information concerning the sensitivity of soils towards acidification and nutrient deficiency and about the location of forest areas which are especially vulnerable in this respect, all available analysis data from forest soil samples of Rheinland-Pfalz were evaluated. For this purpose the data of approximately 1300 soil samples which were collected within the framework of silvicultural site mapping and state-wide forest surveys were collected in a relational data base.

To the extent that data were available, needle analyses data and crown condition parameters were added to the forest soil data, and with the help of statistical analyses, the relations between soil parameters, element content of needles and crown condition were investigated. Close statistical correlations were found between the various soil compartments, which can be causally explained by similarities in their acidification status. Unexpected close statistical correlations were also determined between the humus layer and the mineral soil (solid phase) and the mean needle loss of the investigated sample trees. It was found that a deterioration of the humus condition, increasing acidification of the mineral soil and decreasing potassium and calcium contents lead to an increased needle loss of the sample trees. However, these findings should be verified via independent and more comprehensive samples.

Furthermore the comprehensive material of the forest soil data base was used to describe the ecochemical condition of the most essential forest soil groups of Rheinland-Pfalz and to evaluate their sensitivity towards soil acidification and base cation deficiency. The majority of the forest soils of Rheinland-Pfalz turned out to be heavily acidified and base cation deficient. Object-related forest soil protection measures were suggested for each soil group. Besides liming the heavily acidified sites, the main emphasis of the suggested silvicultural measures lies on including the plentiful base cation supplies which are often found in the mineral subsoil into the nutrient cycle of the ecosystem.

By using the Hunsrück as an example, the disposition of the forest soils towards further acidification and nutrient element deficiency was shown in a „sensitivity map“. For this purpose, 337 soil samples were allocated to the map units of a recently updated soil map (scale 1:200 000), and with the help of a computer-aided program the sensitivity of the individual map units was evaluated on the basis of the indicators *acidification status*, *nutrient element status* and *permeability of the subsoil*. Only about one fourth of the Hunsrück forest area consists of map units which show a comparably low sensitivity towards soil acidification and nutrient deficiency, as those map units still have sufficient base cation supplies available. The soils of these map units are characterized by the presence of a „middle layer“ in the slope deposits. For three fourths of the Hunsrück forest area a high to very high sensitivity towards further soil degradation has to be assumed due to the high acidification and base cation deficiency of the entire solum. The soils belonging to this group are mostly found in quartzitic higher regions and areas of the Hunsrück plateau whose loess-loam content is very low.

1. Einführung und Zielsetzung

Die mitteleuropäischen Waldökosysteme unterliegen seit Jahrhunderten gravierenden anthropogenen Einwirkungen. Während bis zu Beginn der modernen Forstwirtschaft vor allem Waldverwüstungen und übermäßige Biomasseentzüge vielerorts eine beträchtliche Bodendegradation auslösten, führen seit der Industrialisierung Luftschadstoffeinträge zu Veränderungen des chemischen Bodenmilieus. Vor allem die Einträge an Schwefel- und Stickstoffverbindungen sowie die hiermit verbundenen Säureeinträge können die Säure/Base-Verhältnisse im Boden und die Nährstoffausstattung der Waldökosysteme nachhaltig beeinträchtigen.

Die Sulfatschwefeleinträge sind durch Emissionsminderungsmaßnahmen vor allem im Kraftwerksbereich merklich gesunken (VOLZ 1994). Trotz dieser deutlichen Erfolge in der Emissionsminderung der Schwefelverbindungen liegen die Schwefeleinträge in die rheinland-pfälzischen Waldökosysteme mit bis zu 40 kg S/ha · Jahr jedoch auch aktuell noch sehr deutlich über den kritischen Frachten (critical loads) zum Schutz der Waldökosysteme vor gravierenden Schäden (NAGEL et al. 1994, BLOCK 1995).

Die Einträge von Nitratstickstoff vor allem aus dem Straßenverkehr und Ammoniumstickstoff hauptsächlich aus landwirtschaftlichen Produktionsprozessen sind bislang nicht merklich reduziert. Mit Eintragsraten von teilweise deutlich über 40 kg N/ha · Jahr werden die kritischen Frachten für Stickstoffeinträge in Rheinland-Pfalz meist weit überschritten (BLOCK 1995).

Bei Anhalten der gegenwärtigen Luftbelastungssituation ist demnach in weiten Bereichen der rheinland-pfälzischen Waldgebiete von einer fortschreitenden Bodenversauerung, weiteren Verarmung an Kationbasen und zunehmender Stickstoffsättigung mit der Gefahr zunehmender Nitratfrachten im Sickerwasser auszugehen. Diese Situation erfordert nicht nur durchgreifende Maßnahmen zur Begrenzung der Schadstoffemissionen, sondern auch wirksame waldbauliche Maßnahmen zur Erhaltung der betroffenen Waldökosysteme und ihrer vielfältigen Funktionen. Zur Steuerung geeigneter Maßnahmen sind insbesondere differenzierte Informationen über die Sensitivität von Waldböden gegenüber weiteren Luftschadstoffeinträgen und insbesondere über die Verbreitung und die Lage in dieser Hinsicht besonders empfindlicher Waldareale erforderlich.

Um derartige Informationen zu erhalten, soll der Informationsgehalt möglichst aller derzeit vorhandenen Waldbodenanalysedaten aus Rheinland-Pfalz genutzt werden.

In einem *ersten Schritt* sollen alle aus der forstlichen Standortkartierung, der landesweiten Waldbodenzustandserhebung sowie aus dem Versuchswesen vorliegenden Waldbodendaten in einer einheitlich strukturierten *Waldbodendatenbank* zusammengeführt und, sofern verfügbar, mit Nadelspiegelwerten und Kronenzustandsangaben ergänzt werden.

Im *zweiten Schritt* wird versucht, mit Hilfe von statistischen Analysen *Beziehungen zwischen Bodenkennwerten, Nadelspiegelwerten und Kronenzustand* zu beschreiben. Hieraus sollen Hinweise auf Ursache-Wirkungsbeziehungen im Waldschadensgeschehen und vor allem auf die Komponenten abgeleitet werden, die zur Beschreibung der Sensitivität der Waldökosysteme gegenüber Luftschadstoffeinträgen besonders bedeutsam sind.

Im *dritten Schritt* soll die *ökochemische Ausstattung wesentlicher Waldbodensubstrate* in Rheinland-Pfalz eingehend beschrieben und im Hinblick auf die Empfindlichkeit der untersuchten Substrate gegenüber Bodendegradation durch Luftschadstoffbelastung bewertet werden.

In einem *vierten Schritt* sollen den Einheiten einer Bodenübersichtskartierung bodenchemische Analysedaten der zugehörigen Aufnahmepunkte zugeordnet und der ökochemische Zustand der einzelnen Kartiereinheiten sowie deren Sensitivität gegenüber Luftschadstoffbelastungen bewertet und kartographisch in Form einer „**Sensitivitätskarte**“ dargestellt werden. Ursprünglich war eine landesweite Herleitung und kartographische Darstellung des Gefährdungspotentials der Waldböden geplant. Allerdings zeigte die konkrete Prüfung des verfügbaren Kartenmaterials, daß nur für den Hunsrück eine geeignete Kartenvorlage vorhanden ist. Daher mußte dieser Teil des Untersuchungsvorhabens als Pilotprojekt auf den Hunsrück beschränkt werden.

Aus den Ergebnissen der einzelnen Arbeitsschritte sollen, differenziert für die einzelnen Waldbodensubstrate bzw. Kartiereinheiten, Hinweise auf Priorität und Art der notwendigen Bodenschutzmaßnahmen abgeleitet werden, soweit es der derzeitige Kenntnisstand über die Zusammenhänge zwischen Luftschadstoffbelastung und Boden- bzw. Ökosystemzustand zuläßt.

Literatur

- BLOCK, J. (1995): Luftschadstoffbelastung rheinland-pfälzischer Waldökosysteme - Entwicklung seit 1984. Allgemeine Forst Zeitschrift 2, S. 85-87
- NAGEL, H.-D., SMIA TEK, G. und WERNER, B. (1994): Das Konzept der kritischen Eintragsraten als Möglichkeit zur Bestimmung von Umweltbelastungs- und Qualitätskriterien. Materialien zur Umweltforschung, Heft 20, 77 S.
- VOLZ, H.-A. (1994): 10 Jahre Depositionsmessungen in Fichtenbeständen. Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Reihe A: Angewandte Wissenschaft, Heft 434, 43 S. und Anhang.

2. Aufbau einer Waldbodendatenbank

von Oliver Bopp

2.1 Aufgaben und Ziele der Waldbodendatenbank

Im Rahmen einer landesweiten Erhebung des Bodenzustandes (BZE) und der Ernährungssituation von Waldbeständen entstand bereits im Juli 1990 an 143 Rasterpunkten im 4 x 12 km Abstand eine Datengrundlage, die aufschlußreiche Erkenntnisse über den Bodenzustand im Land Rheinland-Pfalz lieferte (EG-Förderungs-Nr.: 88.60.DL.0060, vgl. auch BLOCK et al. 1991).

Für weiterführende Untersuchungen

- der Beziehungen zwischen Bodenparametern, Nadelinhaltsstoffen und Kronenzustand (vgl. Kap. 3),
- zur umfassenden Charakterisierung der ökochemischen Ausstattung wesentlicher Ausgangssubstrate der Bodenbildung (vgl. Kap. 4)
- sowie zur Quantifizierung des stofflichen Zustandes bodenkundlich kartierter Flächeneinheiten (vgl. Kap. 5)

ist die Erweiterung des oben genannten Datenbestandes erforderlich.

Ein wesentliches Ziel des vorliegenden Berichtes ist daher, alle aus dem Bereich der Forstverwaltung verfügbaren, neueren Bodendaten zusammenzutragen, einheitlich zu strukturieren und in einer umfangreichen Waldbodendatenbank zu integrieren. Die Waldbodendatenbank soll den Nutzern durch die Bereitstellung differenzierter und aussagekräftiger Informationen über den Bodenzustand in Waldökosystemen bei administrativen und planerischen Aufgaben zur Erhaltung der vielfältigen Bodenfunktionen dienen.

Beim Aufbau der Waldbodendatenbank steht die redundanzfreie Datenspeicherung und die Möglichkeit, durch Selektieroperationen flexibel und rasch auf die komplexen Bodendaten zugreifen zu können, im Mittelpunkt. Darüber hinaus muß die Datenbank so angelegt sein, daß Daten jederzeit editiert sowie später zusätzliche Profildaten problemlos integriert werden können.

2.2 Struktur der Waldbodendatenbank

Zu Beginn der Datenakquisition wurde ein Katalog erstellt, der die wesentlichsten standortsbeschreibenden, bodenphysikalischen und bodenchemischen Merkmale und Meßgrößen enthält. Es wurden nur Bodeneinschläge in die Datenbank aufgenommen, die gewisse Mindestanforderungen erfüllen. Hier sind die Bestimmung der effektiven Kationenaustauschkapazität (MEIWES et al. 1984) und der an der Austauscherbelegung beteiligten Kationen, sowie Merkmale, die die Berechnung von Nährstoffvorräten ermöglichen (z.B. Trockenraumdichte, Skelettgehalt) und die wichtigsten, die Probenorte beschreibenden (z.B. Rechtswert, Hochwert) Titeldaten zu nennen.

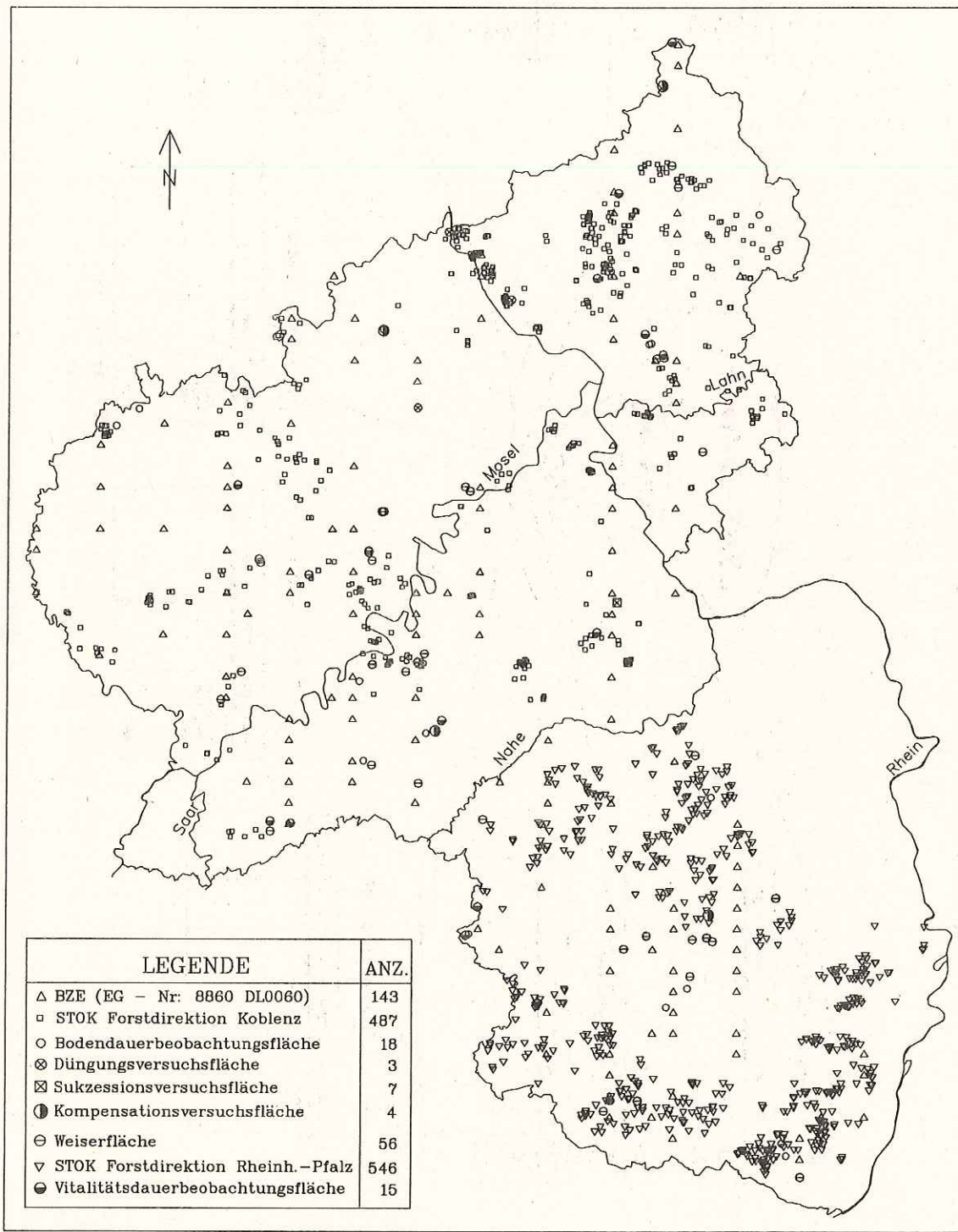
Insgesamt konnten 1279 Bodenprofile mit ausreichendem Datenumfang aus verschiedenen Bereichen der Forstverwaltung akquiriert werden. Einen Überblick über Lage und Verteilung der Bodenprofilorte sowie ihrer Herkunft gibt Karte 2.1. Entsprechend ihrer Zielsetzung bei der Probenahme (z.B. Standortkartierung einzelner Forstbetriebe) liegen die Profildaten im Raum deutlich geklumpt vor. Tabelle 2.1 gibt Auskunft über die je „Projekt“ akquirierte Anzahl der Profile, deren Beprobungsart und die zugeordneten Archivnummern (=ARNR-Schlüssel) zur eindeutigen Identifikation und Verschlüsselung der Profildaten.

Datenherkunft - Projekt -	Anzahl Profile	Beprobungsart	ARNR. Schlüssel
EG-Vorhaben Nr. 88.60.DL.0060	143	tiefenstufenbezogen	1001-1143
Standortsdaten der Forstdirektion Koblenz	487	horizontbezogen	2001-2487
Bodendauerbeobachtungsflächen	18	tiefenstufenbezogen	3001-3018
Düngungsversuchsflächen	3	horizontbezogen	4001-4003
Sukzessionsversuchsflächen	7	horizontbezogen	5004-5012
Kompensationsversuchsflächen	4	horizontbezogen	6001-6004
Weiserflächen	56	horizontbezogen	7001-7056
Standortsdaten der Forstdirektion Rheinhessen-Pfalz	546	horizontbezogen	8001-8546
Vitalitätsdauerbeobachtungsflächen	15	tiefenstufenbezogen	9001-9015
Insgesamt	1279		

Tab. 2.1: Übersicht über Anzahl, Beprobungsart, Verschlüsselung sowie Herkunft aller Bodenprofile der Waldbodendatenbank

Zur rechnergestützten gemeinsamen Auswertung der Profildaten müssen alle in die Datenbank eingehenden Merkmale einheitlich strukturiert sein. Gemäß den Anforderungen einer relationalen Datenbank werden Daten gleicher Struktur und Informationsgehalts in eigenen Tabellen zusammengefaßt. Abbildung 2.1 gibt einen schematischen Überblick über die in der Waldbodendatenbank generierten Tabellen der Primärdaten (Tabellen: TITELDAT, MINERAL, HORIZONT, HUMUS, NADEL) sowie die aus diesen Daten zur Erweiterung des Informationsgehalts der Datenbank abgeleiteten Sekundärdaten (Tabellen: BASEN, VORRAT, KLASSFBF). Die Beziehung (Relation) zwischen den Tabellen wird über ein Schlüsselfeld mit inhaltlich eindeutigen Archivnummern hergestellt (vgl. Tab. 2.1). Eine strukturierte Datenbankabfragesprache (SQL) sorgt für die Kommunikation unter den Tabellen und die Erzeugung von Auswahldatensätzen. Intern übernimmt das Datenbankmanagementsystem (DBMS) die Verwaltung der Tabellen und ihrer Daten (vgl. Abb. 2.1). Durch diesen Aufbau ist bei weitestgehend redundanzfreier Datenhaltung ein flexibler Datenzugriff sowie moderne Datenspeicherung, -editierung und -fortschreibung möglich (BOPP 1995).

Für übergreifende Auswertungen stellt die von Projekt zu Projekt variierende Beprobungsweise ein besonderes Problemfeld dar, da sich uneinheitlich horizont- bzw. tiefenstufenbezogen beprobte Profile nicht unmittelbar zusammenfassen lassen (vgl. Tab. 2.1). Für rasche, alle Datensätze einbeziehende Überblicke wurden aus der Tabelle mit den chemischen Analysedaten, wenn möglich, 3 typische Mineralbodentiefenbereiche ausgewählt. **Tiefenbereich 1** (TB 1) umfaßt die Tiefenstufe 0-5 cm oder, bei horizontweiser Beprobung, den humusreichsten A-Horizont, **Tiefenbereich 2** (TB 2) die Tiefenstufe 10-30 cm bzw. den wichtigsten Hauptwurzelschicht zwischen 10 und 40 cm Mineralbodentiefe (meist Bv-Horizont). **Tiefenbereich 3** (TB 3) beinhaltet die Tiefenstufe 60-90 cm bzw. den Cv- oder einen "verwandten" Horizont meist aus dem Mineralbodentiefenbereich zwischen 60-110 cm. Um möglichst vergleichbare Tiefenbereiche zu erhalten, bleiben Profile, die keine klare Zuordnung zulassen, unberücksichtigt. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Verknüpfung aller Analysedaten mit diesen 3 Tiefenbereichen. Auf diese Weise ist, unabhängig von der Beprobungsart, die Voraussetzung für vergleichende statistische Auswertungen ökochemisch relevanter Kenngrößen geschaffen.



Karte 2.1: Lage, Verteilung und Herkunft der 1279 Bodenprofile der Waldbodendatenbank

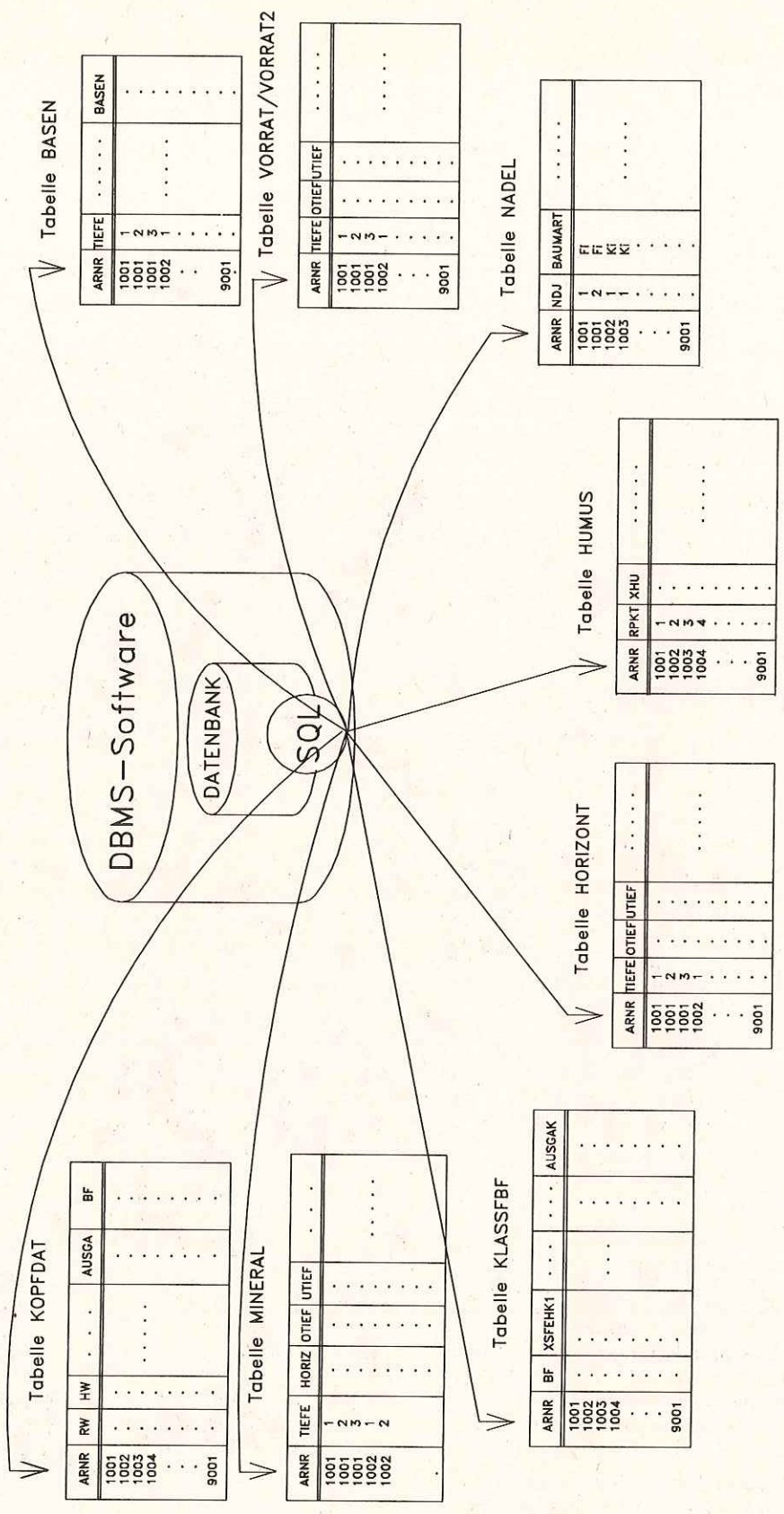


Abb. 2.1: Aufbau und Struktur der Relationen der Waldbodendatenbank

Im folgenden werden Umfang und Inhalt der Tabellen der relationalen Waldbodendatenbank im einzelnen kurz vorgestellt. Eine vollständige Dokumentation aller Tabellen der Waldbodendatenbank einschließlich ihrer Struktur und eine Auflistung sämtlicher aufgenommener Merkmale befindet sich im **Anhang 1**.

Tabelle TITELDATEN: Hier sind die profilbeschreibenden Daten zu allen 1279 Datensätzen gespeichert. Die Anzahl der Datensätze ist mit der Anzahl der Profile identisch, d.h. jede Archivnummer kommt einmal vor. Neben der bereits durch den Profilschlüssel festgelegten Datenherkunft, sind hier profilweise auch die Zuordnungen zu den Ausgangssubstraten der Bodenbildung (vgl. Kap. 4) und zu den Kartiereinheiten der Bodenübersichtskarte (vgl. Kap. 5) abgelegt. Auf der Grundlage dieser Relation erfolgen somit die allermeisten fragestellungsbezogenen Selektieroperationen.

Tabelle MINERAL: Diese Tabelle enthält sämtliche bodenchemischen und bodenphysikalischen Analysedaten mit den Angaben zur Bezugstiefe innerhalb des Mineralbodens. Bedingt durch die vertikal differenzierte, tiefenstufen- bzw. horizontbezogene Probenahme kommt jede Archivnummer, entsprechend der Anzahl der beprobten Bereiche, mehrmals vor. So addieren sich die 1279 Profile zu insgesamt 5307 Datensätzen in der Tabelle MINERAL. Dem Datenfeld mit der Bezugstiefe (z.B. OTIEF, UTIEF; vgl. Anhang 1) kommt bei Selektieroperationen entscheidende Bedeutung zu.

Tabelle HORIZONT: 1103 der insgesamt 1279 Profile sind horizontweise beprobt. Alle Horizontangaben für diese Profile sind in der Tabelle MINERAL enthalten. Für die restlichen 176 Profile mit tiefenstufenbezogener Beprobung sind die wichtigsten horizontbezogenen Angaben in einer eigenen Relation (715 Datensätze) gespeichert und beispielsweise über identische Nummernschlüssel mit den Angaben zum Bodentyp aus der Relation TITELDATEN verknüpfbar. Die Parallelisierung von tiefenstufenbezogenen und horizontbezogenen Analysedaten ist aufgrund stark unterschiedlicher Tiefenbereiche und Mächtigkeiten der beprobten Bodenausschnitte in aller Regel nicht möglich.

Tabelle HUMUS: Leider ist der Datenbestand an Profilen mit analysierter Humusaufgabe bislang nur gering, da in der Vergangenheit der Auflagehumus häufig nicht analysiert wurde. Auf die daraus sich ergebenden Konsequenzen und Problemkreise wird noch

im Verlauf der Kapitel 4 und 5 einzugehen sein. Insgesamt liegen nur zu 326 Profilen Humusanalysen vor. Davon wiederum fehlen bei 74 Profilen die Angaben zur Humusmenge, so daß schließlich Berechnungen zu humusbürtigen Nährelementvorräten nur an 252 Profilen durchgeführt werden konnten.

Tabelle NADEL: Noch geringer ist der Datenbestand an Profilen mit analysierten Nadelinhaltsstoffen. Hier sind derzeit 103 Datensätze zu Kiefer (1. Nadeljahrgang) und Fichte (1. und 3. Nadeljahrgang) vorhanden.

Tabellen VORRAT und VORRAT 2: Diese Tabellen nehmen die austauschbaren Nährelementvorräte (Ca, Mg, K) sowie die Vorräte der Nährelemente Phosphor und Stickstoff auf. Zur Berechnung der Nährelementvorräte in vorgegebenen Tiefenbereichen wurde ein Verfahren (Algorithmus) entwickelt, das für die horizontbezogenen Vorräte aus der Tabelle MINERAL die Vorräte von 0 - 30 cm, 0 - 60 cm und 0 - 90 cm Mineralbodentiefe berechnet (Tabelle VORRAT). In der Tabelle VORRAT 2 sind für gezielte Auswertungen die Vorräte der sich aneinanderreihenden Tiefenbereiche vor ihrer Aufaddierung, d.h. von 0 - 30 cm, 30 - 60 cm und 60 - 90 cm gespeichert. 46 Profile der Waldbodendatenbank sind in ihrem Solum nicht durchgängig beprobt, so daß keine Gesamtvorräte errechnet werden konnten. Daher liegen nur für 1233 Profile vollständige Vorratsdatensätze vor. In der Tabelle VORRAT 2 reduziert sich der Datenumfang, bedingt durch die reduzierte Beprobungstiefe einiger Profile, mit dem Fortschreiten der Mineralbodentiefe (0 - 30 cm = 1233 Datensätze, 30 - 60 cm = 1219 Datensätze, 60 - 90 cm = 1082 Datensätze). Unabhängig von der Beprobungsart ist somit auch bezüglich der Nährelementvorräte die Voraussetzung geschaffen, nahezu alle Profile einbeziehende, vergleichende Auswertungen zu realisieren.

Tabelle BASEN: Um einen ersten Überblick über den stofflichen Zustand der Böden zu gewinnen, ist die Betrachtung der Basensättigung (Anteil Ca + Mg + Na + K an Ake; vgl. Kap. 4 und Kap. 5) besonders geeignet. Dazu werden die 3 ausgewählten typischen Mineralbodentiefenbereiche (vgl. oben, TB1-TB3) mit dem entsprechenden Wert der Basensättigung aus der Tabelle MINERAL verknüpft. Die Tabelle BASEN nimmt unter den Relationen der Waldbodendatenbank eine zentrale Stellung ein, weil für vergleichende Auswertungen problemlos auch Datensätze beliebig anderer

Merkmale und Relationen (z.B. pH-Wert aus MINERAL) mit den hier gespeicherten Tiefenbereichen verknüpft werden können.

Analog zu den Vorrattabellen nimmt die Anzahl der Datensätze mit zunehmender Bodentiefe ab (TB 1 = 1233 Datensätze, TB 2 = 1148 Datensätze, TB3 = 1084 Datensätze).

Tabelle KLASSFBF: Diese Relation enthält alle, anhand von Referenzdaten klassifizierten, wertgebenden Kriterien der drei Indikatoren Nährelementstatus, Versauerungsstatus und Durchlässigkeit (vgl. Kap. 5). Die Tabelle stellt die Grundlage für das im Rahmen des 5. Kapitels vorgestellten rechnergestützten Bewertungsverfahrens dar. Der Datenumfang ist daher derzeit auf die 337 Datensätze der dort untersuchten Bodenprofile aus dem Rheinischen Schiefergebirge begrenzt.

2.3 Funktionalität der Waldbodendatenbank

Der Einsatz einer relationalen Datenbank ist für das Management vielschichtiger Bodendaten optimal und hat sich bei allen Auswertungsschritten ausgezeichnet bewährt. Die Organisation der Daten in den verschiedenen Tabellen gleicher Struktur und gleichen Inhalts ermöglicht bei weitestgehender Redundanzfreiheit einen komfortablen und flexiblen Zugriff auf die Daten. Hinsichtlich Datenmenge und Laufzeitverhalten bei Datenbankabfragen traten keinerlei Beschränkungen oder Hindernisse auf. Bei den häufigen und komplexen Datenselektionen ließen sich problemlos Datenkollektive gezielt extrahieren. Dabei hat sich als besonders günstig herausgestellt, daß Datenselektionen, die Daten verschiedener Tabellen beinhalten, wahlweise auch virtuell erzeugt werden können und somit hinsichtlich Datenverwaltung und Speicherkapazität keinen Mehraufwand darstellen.

Voraussetzung zur synoptischen Bewertung aller Bodenprofilaten ist die Existenz ökologisch vergleichbarer Mineralbodentiefenbereiche. Die zu diesem Zweck ausgeschiedenen drei Tiefenbereiche aus dem humusreichen Oberboden, dem Hauptwurzelbereich und dem mineralischen Unterboden erwiesen sich für die vergleichende Auswertung ebenfalls als gut geeignet. Allerdings steigerte die unterschiedliche Art der Probenahme den Arbeitsaufwand beim Aufbau der Datenbank erheblich, weil bei der horizontweisen Beprobung die entsprechende Aus-

wahl der Tiefenbereiche aufgrund extrem verschiedener Mächtigkeit und Mineralbodentiefe der Horizonte nicht rechnergestützt realisiert werden konnte, sondern alle betroffenen Profile einzeln begutachtet werden mußten. Aus synoptischer Sicht ist daher die Beprobung in fixen Tiefenstufen zu favorisieren.

Zu berücksichtigen ist, daß die Daten der Waldbodendatenbank aus unterschiedlichen, mehr oder minder lang zurückliegenden Erhebungen stammen. Unplausibel erscheinende Daten konnten nur sehr eingeschränkt überprüft werden. Insbesondere Extremwerte sind daher mit Unsicherheiten behaftet. Daher wurde zur Charakterisierung von Kollektiven vor allem der Bereich häufiger Werte um den Median zwischen dem 25er- und 75er-Perzentil herangezogen (BOX-Plots, Kap. 4.3).

Von Vorteil für die im Rahmen des vorliegenden Berichts nachfolgenden Untersuchungen ist, daß alle Bodenproben nach dem gleichen bodenchemischen Verfahren analysiert wurden. Obwohl jeweils unterschiedliche Zielsetzungen bei der Aufnahme der Bodenprofile bestanden, sind die Daten durch ihre Integrität und die Verwendung gleicher Analyseverfahren dennoch vergleichbar.

Zuletzt ermöglicht das hier angewandte, herkunftsabhängige Verschlüsselungssystem nicht nur die problemlose Erweiterung der Datenbestände je „Projekt“, es können auch Bodendaten anderer Herkunft, sofern sie den gestellten Mindestanforderungen genügen, schnell und einfach als „neue Projekte“ in die Waldbodendatenbank aufgenommen werden.

2.4 Literatur

BOPP, O. (1995): Die Waldbodendatenbank der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz. Allgem. Forst Zeitschrift, 2, S. 95 - 96

MEIWES, K.-J., KÖNIG, N., KHANNA, P.K., PRENZEL, J. und ULRICH, B. (1984): Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. Ber. d. Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, Bd. 7, S. 1-67

3. Beziehungen zwischen Bodenparametern, Nadelinhaltsstoffen und Kronenzustand

von Joachim Block und Uwe Wunn

3.1 Problemstellung

Der Zustand von Waldökosystemen kann über eine Vielzahl von physikalischen und chemischen Bodenparametern, Nähr- und Schadstoffgehalten in den Vegetationsorganen und Schätzwerte zum Nadel-/Blattverlust in den Baumkronen beschrieben werden. Um Hinweise auf Ursache-Wirkungsbeziehungen im Waldschadensgeschehen zu erhalten, soll im folgenden versucht werden, die Beziehungen zwischen Bodenparametern, anorganischen Nadelinhaltsstoffen (Nadelspiegelwerten) und dem Kronenzustand zu beschreiben. Insbesondere sollen Hypothesen über folgende Zusammenhänge formuliert werden:

- Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Bodenkompartmenten (Humusaufgabe, Mineralboden in unterschiedlichen Tiefen und unterschiedlichen Phasen - Festphase, Lösungsphase -)
- Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Bodenkompartmenten und Nadelspiegelwerten
- Zusammenhänge zwischen Kronenzustand (Nadelverlust) und Bodenkennwerten sowie Nadelspiegelwerten.

Dargestellt werden soll die Stärke der statistischen Zusammenhänge und der Beitrag der jeweiligen Variablen einer Gruppe an diesem Zusammenhang. Hierauf aufbauend sollen Hypothesen zum Ursache-Wirkungsgefüge Luftschadstoffeinträge - Bodenversauerung - Nährstoffverarmung - Kronenschäden abgeleitet werden. Darüber hinaus werden aus der statistischen Auswertung Hinweise erwartet, welches Kompartiment bzw. welche Variablen innerhalb des jeweiligen Kompartiments zur Beschreibung des Ökosystemzustandes besonders bedeutsam sind.

3.2 Datengrundlage

Für die statistischen Analysen wurden Humus- und Mineralbodendaten der Waldbodendatenbank (vgl. Kap. 2) sowie Analyseergebnisse des wässrigen Bodenextrakts, Nadelanalysebefunde und Nadelverlustschätzungen von Fichten aus dem Immissions-, Nährstoff- und Schadenskataster (vgl. EG-Projekt Nr. 88.60.DL0060) herangezogen. Die in die Auswertung einbezogenen Kennwerte sind im Anhang 2, Tab. 2.1 aufgeführt. Darüber hinaus enthält diese Tabelle Angaben zum Stichprobenumfang sowie zur Variabilität der einzelnen Kenngrößen. Differenzierte Angaben zur Herleitung der Kennwerte (Stichprobendesign, Probenahme, Probenbehandlung, Aufschluß- und Analyseverfahren) sowie zu deren waldökologischer Interpretation enthält der Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 88.60.DL006.0 und BLOCK et al. (1991).

3.3 Statistische Verfahren

Die Bodenkompimente und Nadelspiegelwerte (Variablengruppen) werden mit einer Vielzahl von Kennwerten (Einzelvariablen) beschrieben. Um eine vorurteilsfreie Auswertung zu ermöglichen, wurden alle verfügbaren Kennwerte und neben den Stoffgehalten auch Vorräte und ökochemische Streßkennwerte in die jeweiligen Variablengruppen einbezogen. Nur der Kronenzustand wird mit einer einzigen Variablen (mittlerer Nadelverlust der 24 Stichprobenbäume je Aufnahmepunkt) gekennzeichnet.

Zur Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen jeweils zwei Gruppen mit einer Vielzahl von Einzelvariablen (Bodenkompimente untereinander und zu den Nadelspiegelwerten) wird die kanonische Korrelations- und Redundanzanalyse (vgl. GÄRTNER et al. 1990), zur Beschreibung der Abhängigkeiten des Kronenzustands (einzige Variable: H 1990 mittlerer Nadelverlust) von den Nadelspiegelwerten und den Kennwerten der Bodenkompimente die multiple Korrelationsanalyse angewendet. Zur Unterstützung der Interpretation werden die bivariaten Korrelationen innerhalb der jeweiligen Gruppen und zwischen den Variablen verschiedener Gruppen mit herangezogen (vgl. Anhang 2, Tab. 2.2).

3.3.1 Kanonische Korrelations- und Redundanzanalyse

Mit Hilfe der kanonischen Korrelationsanalyse und der Redundanzanalyse können Zusammenhänge zwischen mehreren Prädiktorvariablen und mehreren Kriteriumsvariablen erfaßt werden. Vorausgesetzt wird, zumindestens approximativ, eine multivariate Normalverteilung bei beiden Variablengruppen. Die meisten vorliegenden Verteilungen sind eingipfelig und links bei Null abgeschnitten. Eine angenäherte Normalverteilung kann meistens angenommen werden. Die Prädiktor- und die Kriteriumsvariablen werden getrennt faktorisiert. Der erste Faktor jeder Variablengruppe wird so rotiert, daß die Korrelation zwischen diesen Faktoren - die kanonische Korrelation - maximal wird. Der damit erklärte Varianzanteil wird danach herauspartialisiert. Die verbleibende Restvarianz wird dann durch Bildung der zweiten kanonischen Korrelation weiter aufgeklärt. Die maximale Anzahl der kanonischen Korrelationen entspricht der Anzahl der Variablen im kleineren Variablensatz. Die Tests von Wilk, Pillai, Hotelling-Lawley und Roy wurden zur globalen Beurteilung der Signifikanz der kanonischen Korrelationen herangezogen. Weiterhin steht ein Testverfahren zur Verfügung, das die Faktoren mit signifikanter kanonischer Korrelation angibt (SAS Institute Inc. 1988). Gewählt wurde bei diesen Tests jeweils die Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 10\%$.

Zur Beurteilung des Beitrags einer einzelnen Variable an einem Faktor der eigenen Gruppe werden die **Faktorladungen** herangezogen. Sie werden als bivariate Korrelationen zwischen den einzelnen Variablen und dem kanonischen Faktor berechnet.

Die **Strukturkoeffizienten** werden definiert als bivariate Korrelationen zwischen den Prädiktorvariablen und den vorhergesagten Kriteriumsvariablen. Eine Prädiktorvariable mit hohem Strukturkoeffizient ist eine Variable, die an der Vorhersage dessen, was mit dem kanonischen Kriteriumsfaktor erfaßt wird (worüber die Ladungen der Kriteriumsvariablen informieren), in hohem Maße beteiligt ist. Da die Strukturkoeffizienten nahezu identische Ergebnisse lieferten wie die Faktorladungen, wurden zur Interpretation nur die Faktorladungen herangezogen.

Redundanzmaße geben eine Abschätzung darüber, wie redundant der eine Variablensatz ist, wenn die Meßwerte der anderen Variablen bekannt sind. Die im allgemeinen asymmetrischen Redundanzmaße werden für alle signifikanten kanonischen Korrelationen ermittelt und zu einem kumulativen Maß aufsummiert. Dadurch ergibt sich für jede Seite ein Gesamtredundanzmaß, das den **Anteil erklärter Varianz** repräsentiert.

Schließlich erlauben die **Interkommunalitäten**, das sind die Summen der quadrierten Korrelationen zwischen jeweils einer Variablen der einen Gruppe und den signifikanten kanonischen Faktoren der anderen Gruppe, Angaben über die Beteiligung jeder einzelnen Variablen am Zusammenhang. Die Interkommunalitäten wurden dann zur Auswertung herangezogen, wenn die korrespondierenden Faktoren jeder Gruppe nicht sinnvoll ökologisch interpretiert werden konnten.

Weitere Details zum angewandten Verfahren enthält WUNN (1995).

Zur ausführlichen Darstellung der kanonischen Korrelationsanalyse und der Redundanzanalyse wird z.B. auf BORTZ (1993) oder HARTUNG und ELPELT (1992) verwiesen.

3.3.2 Multiple Korrelationsanalyse und Regression

Dieses Verfahren erlaubt die Analyse der Beziehung zwischen **einer** Kriteriumsvariablen und mehreren Prädiktorvariablen. Das Ergebnis dieser Analyse ermöglicht eine Vorhersage des Kriteriumswertes. Zur Beurteilung der Beziehung können mehrere Kennwerte herangezogen werden. Der **multiple Korrelationskoeffizient R** entspricht der bivariaten Korrelation zwischen der vorhergesagten und der tatsächlichen Kriteriumsvariablen. Das **multiple Bestimmtheitsmaß R^2** gibt den Anteil der durch die Prädiktorvariablen erklärten Varianz der Kriteriumsvariablen an. Da in der Untersuchung z.T. viele Prädiktorvariablen und ein relativ kleiner Stichprobenumfang vorlagen, wurde R bzw. R^2 unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Freiheitsgrade adjustiert.

Die **Strukturkoeffizienten**, die ebenfalls den Zusammenhang zwischen den Prädiktorvariablen und der vorhergesagten Kriteriumsvariablen beschreiben, ergeben sich rechnerisch als Quotient aus bivariater Korrelation und multiplem Korrelationskoeffizienten. Der Strukturkoeffizient einer Prädiktorvariablen gibt also an, welchen Anteil eine Prädiktorvariable an der vorhergesagten Kriteriumsvarianz besitzt, ohne Berücksichtigung aller anderen Prädiktorvariablen.

Die durch die Regression erhaltenen **standardisierten β -Gewichte** geben einen weiteren Aufschluß über die Beziehung der Variablen. Die Interpretation der β -Gewichte kann jedoch Schwierigkeiten bereiten, da sie durch vorhandene Multikollinearitäten instabil werden

(BORTZ 1993). Aus diesem Grund wurden zur Interpretation im wesentlichen der multiple Korrelationskoeffizient bzw. das adjustierte multiple Bestimmtheitsmaß R^2 und die Strukturkoeffizienten benutzt.

3.3.3 Ausreißer

Bei vielen Variablen wurden jeweils einige wenige extrem hohe Meßwerte beobachtet, die zu unerklärbar hohen Korrelationen führten. Bei diesen Meßwerten wurde einzelfallweise durch Berechnung von 4- σ -Bereichen überprüft, ob es sich um Ausreißer handelt (SACHS 1992, S. 364). Die signifikanten Ausreißer wurden aus der Auswertung herausgenommen.

3.3.4 Software

Die Analysen wurden mit dem Statistikprogrammpaket SAS für Windows, Version 6.08 durchgeführt. Die kanonische Korrelationsanalyse wurde mit der Prozedur CANCELL realisiert, die multiple Korrelationsanalyse wurde mit den Prozeduren REG und STEPWISE gerechnet.

3.3.5 Hinweise zur Interpretation

Wenn zwei korrespondierenden kanonischen Faktoren, im folgenden Faktorkombination genannt, jeweils in ihrer Variablengruppe eine sinnvolle ökologische Bedeutung zugeordnet werden konnte, wurde diese kanonische Beziehung interpretiert.

War eine solche Zuordnung nicht möglich, wurde die entsprechende Faktorkombination nicht interpretiert. Die Ladungen aller signifikanten Faktoren sind im Anhang aufgeführt.

Die Interkommunalitäten wurden zur Bestimmung der einflußreichsten Variablen beider Gruppen verwendet.

3.4 Ergebnisse und Diskussion

3.4.1 Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Bodenkompartmenten

Überprüft wurden mit Hilfe der kanonischen Korrelationsanalyse statistische Zusammenhänge zwischen

- Humusauflage und Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe
 - Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe und Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe
 - Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe und wäßrigem Extrakt des Oberbodens
 - Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe und wäßrigem Extrakt des Unterbodens
- jeweils in beide Richtungen.

Humusauflage - Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe

Die Analyse der Variablengruppen „Humusauflage“ und „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“ weist acht auf dem 10 %-Niveau signifikante kanonische Korrelationen aus. Alle acht Faktorkombinationen erklären zusammen 40 % der Varianz der Variablengruppe „Humusauflage“ bzw. 60 % der Varianz der Variablengruppe „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“, wenn die Meßwerte der jeweils anderen Variablengruppe bekannt sind.

Die erste Faktorkombination zeigt auf Seiten des Mineralbodens hohe positive Faktorladungen der beiden pH-Werte sowie der Gehalte der Komponenten Mg, Ca, K und Mn sowie deren Anteile an der effektiven Austauschkapazität (XS-Werte; Sättigungen) auf (Anhang 2, Tab. 2.3.1a). Hoch negativ geladen sind die Gehalte und Sättigungen der Kationsäuren Al, Fe und H sowie die C/N- und C/P-Verhältnisse. Dem stehen auf Seiten der Humusauflage hohe positive Faktorladungen beim pH-Wert und den Ca-, Mg- und Mn-Gehalten sowie hohe negative Ladungen der Humusmenge und damit gekoppelt der Vorräte an C, N, P, Pb, Cu, Zn und Cd sowie der C/N- und der C/P-Verhältnisse und der C- und N-Gehalte gegenüber (Anhang 2, Tab. 2.3.1b).

Diese korrespondierenden Faktoren beschreiben allem Anschein nach den Versauerungszustand der Humusauflage und des mineralischen Oberbodens. Der Versauerungszustand wird durch die pH-Werte und die Gehalte an Kationbasen gekennzeichnet. Im Mineralboden stehen den Kationbasen mit umgekehrtem Vorzeichen die Gehalte an Kationsäuren gegenüber. Bemerkenswert ist, daß sich Mangan, wenngleich eine Kationsäure, gleichsinnig wie die Kation-

basen verhält. Hierauf wird bei der Betrachtung des nächsten Faktors näher eingegangen. Die Humusmenge und die C/N- und C/P-Verhältnisse sind ein Maß für die Humusqualität und die Umsetzungsaktivität im Ökosystem. Hohe Humusmengen und weite C/N- und C/P-Verhältnisse zeigen eine schlechte Qualität mit nur geringen Umsetzungen der organischen Substanz an. Dementsprechend sind diese Kennwerte negativ mit den pH-Werten und den Kationbasengehalten korreliert.

Der jeweils zweite Faktor weist auf beiden Seiten hohe positive Ladungen für den Mangangehalt aus. Im Mineralboden sind die Mangangehalte gleichsinnig gekoppelt mit den P-, N- und K-Gehalten und gegensinnig mit den Gehalten der Kationsäuren H und Fe sowie den C/N- und C/P-Verhältnissen. In der Humusaufgabe stehen den hohen positiven Faktorladungen für Mangan ebenfalls hoch positive Faktorladungen für die Gehalte an P, K, Fe, Al, Cu, Zn, Cd und den pH-Wert sowie hohe negative Faktorladungen für die C/P- und C/N-Verhältnisse, die Humusmenge sowie die Vorräte an C, N, Si, Zn und Cd zur Seite. Diese Faktorkombination beschreibt anscheinend den Grad der Bodenversauerung über den Manganstatus. Hohe Mangangehalte in der Humusaufgabe und am Austauscher indizieren eine beginnende, noch nicht allzuweit fortgeschrittene Bodenversauerung. Im pH-Bereich zwischen 5 und 4 werden eingebrachte oder im Ökosystem selbst produzierte Säuren durch Manganoxide gepuffert (ULRICH 1981). Hierbei gelangen große Mengen des mobilen Manganions in den Stoffkreislauf der Ökosysteme und dabei auch in die Humusaufgabe. Bei fortschreitender Versauerung wird Mangan nahezu vollständig aus dem Ökosystem mit dem Sickerwasser ausgetragen und die Gehalte in Mineralboden und Humusaufgabe werden sehr klein. Bei pH-Werten über 5 wird Mangan in der Bodenmatrix festgehalten und gelangt nur in sehr geringen Mengen in den Stoffkreislauf (ULRICH 1981). Auch unter diesen Bedingungen sind in der Humusaufgabe und am Austauscher des Mineralbodens nur geringe Manganwerte zu erwarten. Insofern ist die positive Korrelation zwischen den Mangangehalten und den pH-Werten in der Humusaufgabe und im Mineralboden plausibel. Auch die Verbindung hoher positiver Faktorladungen für Mangan mit hohen negativen Faktorladungen für die C/N- und C/P-Verhältnisse sowie die Humusmenge entspricht der Erwartung, da schlechte Humusformen mit weiten C/N- und C/P-Verhältnissen und hoher organischer Auflage meist erst bei weit fortgeschrittener Versauerung auftreten, bei der Mangan bereits weitgehend aus dem Ökosystem ausgewaschen worden ist.

Die dritte Faktorkombination wird auf Mineralbodenseite insbesondere von der Kationenaustauschkapazität und von den Gehalten an Fe, N, P und C hoch positiv und von der Trockenraumdicke sowie den Anteilen von H und Mn am Austauscher negativ geladen. Auf der Humusseite weisen die Fe-, Al-, P- und Mg-Gehalte und -Vorräte hohe positive, die C/P-, C/N-Verhältnisse, Mangangehalte sowie die Basensättigung der Humusaufgabe hohe negative Faktorladungen auf.

Diese Faktorkombination scheint weitgehend unabhängig vom Versauerungszustand den Umfang der Kationenbindungsplätze und den Humuszustand zu kennzeichnen. Der Humusgehalt im Mineralboden, gekennzeichnet durch den Kohlenstoffgehalt, ist, das zeigen auch die bivariaten Korrelationen, sehr eng mit dem N-Gehalt (bivariater Korrelationskoeffizient 0,85, vgl. Anhang 2, Tab. 2.2.3) und den P- und Fe-Gehalten verbunden. Erwartungsgemäß steigt die Kationenbindungsfähigkeit bei steigendem Humusgehalt. Zugleich führt ein hoher Humusgehalt im Mineralboden zu einer Abnahme der Trockenraumdicke und zu geringeren H- und Mn-Anteilen am Austauscher. Die Humusgehalte und Bindungsmöglichkeiten im Mineralboden sind positiv mit den vermutlich aus mineralischen Beimengungen stammenden Fe- und Al-Gehalten der Humusaufgabe und negativ mit den C/N- und C/P-Verhältnissen korreliert. Dies deutet daraufhin, daß bei hohem Mineralbodenhumusgehalt die Humusform besser wird (höhere mineralische Beimengungen aus Bioturbation und engere C/P- und C/N-Verhältnisse).

Für die übrigen Faktoren wurde keine sinnvolle ökologische Interpretation gefunden.

Die Interkommunalitäten zeigen, daß am Zusammenhang zwischen diesen beiden Variablengruppen auf Seiten der Humusaufgabe vor allem die Variablen pH_{KCl} , $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, P, Mn, Mg und C/P und auf Seiten des Mineralbodens insbesondere die Variablen XSMg, $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, pH_{KCl} , Mg, XSMn, XSCa, XSH, P, Ca, Fe, XSF, K und Mn beteiligt sind.

Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe - Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe

Zwischen diesen beiden Variablengruppen weist die Korrelationsanalyse ebenfalls acht signifikante Faktoren aus, die zusammen 54 % der Varianz der Variablengruppe „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“ und 49 % der Varianz der Variablengruppe „Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe“ erklären, wenn jeweils die Meßwerte der anderen Variablengruppe bekannt sind.

Die erste Faktorkombination beschreibt sowohl im Ober- als auch im Unterboden mit hohen positiven Faktorladungen für die pH-Werte, die austauschbaren Ca- und Mg-Gehalte sowie die effektive Kationenaustauschkapazität und negativen Faktorladungen für die Aluminiumsättigung den Versauerungsstatus der Böden (Anhang 2, Tab. 2.3.2 a und b). Erwartungstreu wird der Versauerungsstatus im Oberboden darüber hinaus durch die Gehalte der starken Kationsäuren H und Fe sowie das C/N- und C/P-Verhältnis beschrieben, während im Unterboden alleine die Aluminiumsättigung hohe negative Faktorladungen aufweist.

Faktor zwei weist im Oberboden hohe positive Faktorladungen der C/N- und C/P-Verhältnisse und der Gehalte und Anteile der starken Kationsäuren H und Fe sowie hohe negative Faktorladungen für die Mangangehalte aus. Im Unterboden zeigen die pH-Werte und die Mangangehalte hohe Faktorladungen mit umgekehrtem Vorzeichen. Möglicherweise werden hier Standorte mit bereits fortgeschrittener Versauerung und weitgehender Manganauswaschung im Oberboden und noch sehr geringer Versauerung mit weitgehender Manganfestlegung in der Bodensubstanz im Unterboden beschrieben.

Die dritten Faktoren ähneln sehr stark den ersten Faktoren; allerdings wird hier im Oberboden Kalzium geringer und Magnesium höher gewichtet und im Unterboden kommt Kalium mit hoher positiver Faktorladung hinzu. Diese Faktorkombination betont daher neben dem Versauerungsstatus vor allem die Bodengehalte an Nährstoffkationen.

Faktorkombination vier weist im Ober- und Unterboden hohe positive Faktorladungen für die Kalium-, Kalzium- und Mangansättigungen und hohe negative Ladungen für die C-, N- und P-Gehalte sowie die Aluminiumsättigung aus. Da Kalium und die übrigen Kationbasen auf beiden Seiten die Faktoren positiv und der Kohlenstoffgehalt und die davon beeinflussten N- und P-Gehalte negativ laden, scheint diese Faktorkombination Standorte zu beschreiben, die gegen, d.h. vom Mineralgehalt des Ausgangssubstrats, und nicht aus dem Humusgehalt heraus über höhere Gehalte an Nährstoffkationen verfügen.

Für Faktorkombination fünf ist keine sinnvolle Interpretation erkennbar.

Faktorkombination sechs wird in beiden Tiefenbereichen hoch positiv durch den Natriumgehalt und die Natriumsättigung und hoch negativ durch die Trockenraumdicke geladen. Die Natriumgehalte beschreiben möglicherweise Standorte in Straßennähe oder in exponierten

Lagen mit hohen Meersalzsprayeinträgen. Eine Erklärung für die umgekehrte Wirkungsweise zwischen Natrium und der Trockenraumdichte in dieser kanonischen Beziehung wurde nicht gefunden. In den bivariaten Korrelationen sind derartige Zusammenhänge auch nicht zu erkennen.

Für die beiden übrigen signifikanten Faktorkombinationen sind keine sinnvollen ökologischen Interpretationen ersichtlich.

Die Interkommunalitäten weisen aus, daß der Zusammenhang zwischen den beiden Variablengruppen auf Seiten des Oberbodens durch die Variablen Ca, $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, pH_{KCl} , Mg, K, XSMg, XSH, Mn, AKe und P sowie auf Seiten des Unterbodens durch die Variablen Ca, $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, pH_{KCl} , XSCa, AKe, Mg und Mn maßgeblich beeinflusst wird.

Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe - wäßriger Extrakt des Oberbodens

Zwischen diesen Variablengruppen weist die kanonische Korrelationsanalyse neun Faktoren als signifikant aus. Sie erklären zusammen 50 % der Varianz der Festphase bzw. 47 % der Varianz der Lösungsphase.

Faktorkombination eins beschreibt den Versauerungszustand des Bodens, der auf Seiten der Festphase wiederum durch hohe positive Faktorladungen der pH-Werte, der Mg- und Ca-Gehalte und der AKe sowie negative Faktorladungen für die H- und Fe-Sättigungen sowie die C/N- und C/P-Verhältnisse charakterisiert wird (Anhang 2, Tab. 2.3.3a). Auf Seiten des wässrigen Oberbodenextrakts, als Indikator für die Lösungsphase, sind bei Faktorkombination eins hohe positive Ladungen für die Ca-, Mg- und Na-Gehalte sowie den pH-Wert mit hohen negativen Ladungen für den Aziditätsgrad und den Gehalt an NH_4 , Fe und Al verbunden (Anhang 2, Tab. 2.3.3b). Interessant ist, daß der Ammoniumgehalt zum Aziditätsgrad mit gleichem Vorzeichen, zu den Basengehalten und den pH-Werten dagegen mit entgegengesetztem Vorzeichen verbunden ist. Auch die bivariaten Korrelationen innerhalb der Variablen-Gruppe „wäßriger Oberbodenextrakt“ lassen vergleichsweise hohe positive Korrelationen zwischen NH_4 und allen auf Versauerung hinweisende Variablen und negative Korrelationen zum pH-Wert erkennen. Dies könnte auf eine Einschränkung der Nitrifikation bei starker Versauerung hinweisen.

Bei den zweiten Faktoren wurde kein interpretierbares Muster in den Faktorladungen erkannt.

Faktorkombination drei kennzeichnet wie Faktorkombination eins den Versauerungszustand des Mineralbodens, allerdings weniger durch die Basengehalte als vielmehr durch den Mangansstatus und die Anteile starker Kationsäuren am Austausch. Es zeigt sich in der Mineralbodenfestphase wiederum eine Kombination aus hohen Faktorladungen für H, Fe, C/N und C/P sowie mit Vorzeichenwechsel für Mn und die pH-Werte. Die Aluminiumsättigung steht hier mit gleichem Vorzeichen an der Seite der Mangangehalte und pH-Werte. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, daß im obersten Mineralboden bei weit fortgeschrittener Versauerung Al bereits wiederum durch H und Fe vom Austauscher verdrängt wird und höhere Al-Sättigungen in diesem Tiefenbereich, wie der Mangangehalt, eine noch nicht allzuweit fortgeschrittene Versauerung kennzeichnen. Auf Seiten der Lösungsphase sind hohe positive Faktorladungen für Fe, Al und PO_4 gekoppelt mit hohen negativen Ladungen für Mn, NO_3 und den Mg/Al sowie Ca/Al-Verhältnissen. Eine zunehmende Versauerung der Festphase ist demnach anscheinend mit geringen Mangangehalten und geringen, das heißt ökologisch ungünstigeren Werten der Streßindikatoren Mg/Al und Ca/Al verbunden. Der Nitratgehalt in der Lösungsphase nimmt im Gegensatz zum Ammoniumgehalt mit zunehmender Versauerung ab. Dies könnte ebenfalls auf eine gebremste Nitrifikation in versauerten Böden hindeuten.

Aus den Mustern der Faktorladungen der übrigen Faktoren konnten keine Hinweise auf ökologisch interpretierbare Zusammenhänge gewonnen werden.

Anhand der Interkommunalitäten ist zu erkennen, daß am Zusammenhang zwischen den beiden Variablengruppen auf Seiten der Festphase im wesentlichen die Variablen XSH, Ca, pH_{CaCl_2} , K, Mg, XSK, XSCa, pH_{KCl} , H, AKe, XSAI, XSMg und XSMn sowie auf Seiten des wässrigen Extrakts die Variablen Aziditätsgrad, Ca, Na, Fe, Ca/Al und K beteiligt sind.

Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe - wäßriger Extrakt des Unterbodens

Die kanonische Korrelationsanalyse zwischen den Variablen der Mineralbodenfestphase und der Lösungsphase im Unteren Mineralbodenbereich weist sechs signifikante Faktoren aus, die 35 % der Varianz der Variablen der Festphase bzw. 38 % der Varianz der Variablen der Lösungsphase erklären.

Faktor eins kombiniert jeweils hohe positive Ladungen insbesondere für den Kaliumgehalt und die Kationenaustauschkapazität und eingeschränkt, das heißt mit merklich geringeren Faktorladungen, auch für Ca, Mg und Mn in der Festphase mit einer sehr hohen positiven La-

dung für Na sowie eingeschränkt auch für Mg, Ca, Ca/Al, Mg/Al, Cl, SO₄-S und pH in der Lösungsphase (Anhang 2, Tab. 2.3.4a und b). Dem stehen negative Faktorladungen für die Aluminiumsättigung in der Festphase sowie für den Aziditätsgrad im wässrigen Extrakt gegenüber. Die sehr hohe Ladung für Natrium in der Lösungsphase in Kombination mit Ladungen gleichen Vorzeichens für die Basenkationen am Austauscher und in der Lösungsphase könnten darauf hinweisen, daß mit diesem Faktor Standorte mit Stauwassereinfluß beschrieben werden. So wurde im Rahmen der landesweiten Waldbodenzustandserhebung beobachtet, daß in Böden mit Stauwassereinfluß häufig sehr hohe Natriumkonzentrationen im wässrigen Extrakt mit hohen Gehalten an Kationbasen am Austauscher und in der Lösungsphase des unteren Bodenbereichs vorkommen. Dies wurde auf einen „Rückstau“ der durch Versauerungsvorgänge im Oberboden freigesetzten Kationbasen oberhalb des Sd-Horizonts der Pseudogleye zurückgeführt (BLOCK et al. 1991).

Faktorkombination zwei ließ keine interpretierbaren Muster bei den Faktorladungen erkennen. Faktor drei weist in der Festphase nur für die Mangangehalte und Mangansättigungen höhere Faktorladungen aus. Diese sind mit gleichem Vorzeichen mit den Kalziumgehalten und den pH-Werten des wässrigen Extrakts verbunden. Dies bestätigt wiederum, daß höhere Anteile an austauschbarem Mangan ökologisch günstigere, weil weniger versauerte Bodenverhältnisse anzuzeigen scheinen.

Demgegenüber beschreibt Faktorkombination vier möglicherweise basenreichere Verhältnisse, bei denen Mangan in der Festphase gebunden wird und nicht in nennenswertem Umfang in die Bodenlösung gelangt. Bei diesem Faktor sind nämlich hohe positive Faktorladungen für die Kationbasen Kalzium und Magnesium in der Mineralbodenfestphase mit negativen Faktorladungen für Mangan in der Lösungsphase kombiniert.

Faktorkombination fünf deutet auf einen Zusammenhang zwischen der Versauerung des Austauschers und dem Sulfatgehalt im wässrigen Bodenextrakt hin. Hohen positiven Ladungen der austauschbaren Kationsäuren H und Fe stehen hohe, ebenfalls positive Ladungen für den Sulfatgehalt der Lösungsphase bei jeweils negativen Faktorladungen für die pH-Werte gegenüber.

Das Ladungsmuster des Faktors sechs wird wiederum auf beiden Seiten durch Mangan geprägt. Eine plausible Erklärung für die Kombination des Mangans mit Natrium in der Fest-

phase und mit den beiden Stickstoffparametern in der Lösungsphase konnte nicht gefunden werden.

Die Interkommunalitäten weisen auf Seiten der Festphase die Komponenten XSAI, XSCa, K, XSMg, AKe, Ca und Mg sowie auf Seiten der Lösungsphase die Komponenten Na, pH, Ca, Mg, SO₄S und Ca/Al als diejenigen Variablen aus, die am Zusammenhang zwischen den beiden Gruppen am stärksten beteiligt sind.

3.4.2 Zusammenhänge zwischen den Bodenkompartmenten und den Nadelspiegelwerten

Überprüft werden mit Hilfe der kanonischen Korrelationsanalyse Zusammenhänge zwischen den Variablengruppen „Humusauflage“, „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“, „Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe“, „Nährstoffvorräte im Mineralboden bis 60 cm Tiefe“, „wäßriger Extrakt des Oberbodens“ und „wäßriger Extrakt des Unterbodens“ auf der einen Seite und der Variablengruppe „Nadelspiegelwerte“ auf der anderen Seite.

Humusauflage - Nadelspiegelwerte

Zwischen diesen beiden Variablengruppen weist die kanonische Korrelationsanalyse drei Faktoren als auf dem 10 %-Niveau signifikant aus. Diese erklären zusammen 27 % der Varianz der Nadelspiegelwerte.

Der jeweils erste Faktor zeigt sowohl auf Seiten der Humusauflage als auch auf Seiten der Nadelspiegelwerte hohe positive Ladungen für den Bleigehalt, auf Humusseite gekoppelt mit dem Phosphor- und Kalziumgehalt (jeweils umgekehrtes Vorzeichen) und auf Nadelspiegelseite gekoppelt mit dem Silizium-, Stickstoff- und Mangangehalt (gleiches Vorzeichen) sowie dem Kalziumgehalt (umgekehrtes Vorzeichen) (Anhang 2, Tab. 2.3.5a und b). Die mit diesem Faktor beschriebene Beziehung zwischen dem Bleigehalt in der Humusauflage und in den Nadeln dürfte auf einer gemeinsamen Ursache, der erhöhten atmosphärischen Deposition von Blei auf Nadeln und Humusauflage in der Nähe von Bleiemittenten (z.B. Straßen, Keramikindustrie, Abraumhalden ehemaligen Bergbaus etc.) beruhen. Eine kausale Verbindung zu den übrigen, hochgeladenen Komponenten konnte nicht aufgedeckt werden, zumal die bivariaten

Korrelationen nur Verbindungen zwischen Blei und Eisen sowie Blei und Kupfer, nicht aber zu den in diesem Faktor zusammengestellten Komponenten aufzeigen (vgl. Anhang 2, Tab. 2.2.2)

Die zweite Faktorkombination weist auf Humusseite hohe positive Ladungen für die Komponenten Zn, Fe, Mg, Cd, pH_{KCl} , K, $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, Cu und Mn sowie hohe negative Ladungen für die Komponenten C/P, Humusmenge, C-Vorrat, N-Vorrat und C/N auf. Auf Nadelspiegelseite stehen dem hohe positive Faktorladungen für Cd, Ca, Pb, Asche, Fe, Zn und Mn gegenüber. Diese Faktorkombination beschreibt auf Seiten der Humusaufgabe die Humusqualität. Höhere Werte der positiv geladenen Parameter deuten auf eine bessere Humusqualität hin, gekennzeichnet durch geringe Versauerung (höhere pH-Werte) und höhere Gehalte an den Nährelementen Zn, Fe, Mg und K sowie des mit den vorstehenden Elementen bivariat positiv korrelierten Cadmiums. Bei den negativ geladenen Parametern zeigen hohe Werte demgegenüber einen schlechten Humuszustand mit weiten C/P und C/N-Verhältnissen und hoher organischer Auflage und damit sehr eng positiv korrelierten hohen C- und N-Vorräten in der Humusaufgabe auf. Eine Verbesserung der Humusqualität (hohe Werte der positiv geladenen Parameter, geringe Werte der negativ geladenen Parameter) ist mit einer Zunahme der Gehalte der Nährelemente Ca, Fe, Zn und Mg, aber auch der Schwermetalle Cd und Pb in den Nadeln verbunden.

Die dritte Faktorkombination ist auf Humusseite durch hohe positive Faktorladungen für den Mangangehalt und den Manganvorrat gekennzeichnet. Alle anderen Faktorladungen sind in diesem Faktor weniger als halb so groß. Auch auf Nadelspiegelseite besitzt Mangan die höchste positive Ladung, gefolgt von Cadmium, Kalzium und Natrium und verbunden mit einer hohen negativen Faktorladung für Schwefel. Diese Faktorkombination beschreibt mit dem Manganstatus zugleich auch den Versauerungsstatus des Ökosystems. Wie bereits im vorstehenden Kapitel ausgeführt, indizieren Mangangehalte in der Humusaufgabe eine beginnende, noch nicht allzuweit fortgeschrittene Bodenversauerung, bei der große Mengen des mobilen Manganions in den Stoffkreislauf der Ökosysteme und dabei auch in die Nadeln gelangt. Dementsprechend ist die positive Korrelation zwischen den Mangangehalten und -vorräten in der Humusaufgabe zum Kalziumgehalt in den Nadeln plausibel. Der Vorzeichenwechsel zum Schwefelgehalt der Nadeln deutet an, daß Schwefel hier nicht als Indikator für eine ausreichende Schwefelversorgung, sondern eher als Indikator für einen ungünstigen Humuszustand anzusehen ist.

Mineralbodenfestphase 0-5 cm Tiefe - Nadelspiegelwerte

Die kanonische Korrelationsanalyse dieser beiden Variablengruppen weist drei signifikante Faktoren aus. Diese erklären zusammen wie bei der vorstehend beschriebenen Gruppe 27 % der Varianz der Nadelspiegelwerte, wenn die Meßwerte der Variablen auf Seiten der Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe bekannt sind.

Faktorkombination eins beschreibt auf Seiten des Mineralbodens mit hohen positiven Ladungen für die pH-Werte, die Kationbasen Ca, Mg und K sowie für Mn und hohe negative Ladungen für die Kationsäuren H und Fe den Versauerungszustand (Anhang 2, Tab. 2.3.6a). Dem stehen auf Seiten der Nadelspiegelwerte hohe positive Faktorladungen bei Ca, Cd, Asche, Zn und Mg sowie hohe negative Faktorladungen bei N und S gegenüber (Anhang 2, Tab. 2.3.6b). Bei zunehmender Versauerung sinken demnach die Ca-, Cd-, Zn- und Mg-Gehalte und steigen die N- und S-Gehalte der Nadeln an. Auch hier scheinen höhere Schwefelgehalte in den Nadeln eher mit einem ungünstigeren Bodenzustand verbunden zu sein.

Für die beiden anderen Faktorenkombinationen wurden keine sinnvollen ökologischen Interpretationen gefunden.

Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe - Nadelspiegelwerte

Zwischen diesen beiden Variablengruppen weist die kanonische Korrelationsanalyse vier Faktoren als signifikant aus. 28 % der Varianz der Variablengruppe „Nadelspiegelwerte“ werden durch die Variablen der Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe erklärt.

Die erste Faktorkombination beschreibt auf Mineralbodenseite den Versauerungszustand des tieferen Mineralbodens über den Gehalt an Kationbasen und Kationsäuren. Hoch positiv geladen sind neben dem $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Wert die Gehalte und Anteile an der effektiven Kationenaustauschkapazität der Komponenten K, Ca und Mg; hoch negativ geladen ist die Aluminiumsättigung (Anhang 2, Tab. 2.3.7a). Dem stehen auf Nadelspiegelseite hohe positive Ladungen bei Cd, Ca, Si, Zn und Asche sowie hohe negative Ladungen für Mn gegenüber (Anhang 2, Tab. 2.3.7b). Bei zunehmenden Gehalten des tieferen Mineralbodens an austauschbaren Kationbasen und dementsprechend abnehmender Aluminiumsättigung steigen demnach die Cd-, Ca-, Si-, Zn- und Aschegehalte in den Nadeln an, während die Mangangehalte abnehmen.

Für die Muster der Faktorladungen der drei übrigen signifikanten Faktorkombinationen wurde keine sinnvolle ökologische Erklärung gefunden.

Nährstoffvorräte im Mineralboden bis 60 cm Tiefe - Nadelspiegelwerte

Die kanonische Korrelationsanalyse dieser beiden Variablengruppen weist vier signifikante Faktoren aus. Allerdings werden nur 13 % der Varianz der Nadelspiegelwerte durch die Variablen der Nährstoffvorräte erklärt. Auch bei den bivariaten Korrelationen wurden keine Korrelationskoeffizienten über 0,5 ermittelt. Für keinen der vier Faktoren konnte aus dem Faktorladungsmuster ein sinnvoller ökologischer Zusammenhang zwischen den Variablengruppen erkannt werden (vgl. Anhang 2, Tab. 2.3.8a und b).

Wäßriger Extrakt des Oberbodens - Nadelspiegelwerte

Die kanonische Korrelationsanalyse dieser beiden Variablengruppen weist drei Faktoren als signifikant aus: 21 % der Varianz der Nadelspiegelwerte werden durch die Variablen des wäßrigen Extraktes des Oberbodens erklärt.

Faktorkombination eins beschreibt auf Seiten des wäßrigen Bodenextrakts über hohe positive Ladungen bei den Komponenten pH, Ca, Ca/Al, Mg, Mg/Al und hohe negative Ladungen beim Aziditätsgrad und den Komponenten NH₄, Mn und Al den Versauerungszustand der Lösungsphase des Oberbodens (Anhang 2, Tab. 2.3.9a). Auf Seiten der Nadelspiegelwerte wird der erste Faktor durch Ca und Mg hoch positiv und durch N, S und Cu hoch negativ geladen. Bei zunehmender Versauerung steigen demnach die N, S und Cu-Gehalte in den Nadeln, während die Ca- und Mg-Gehalte abnehmen.

Für die Kombination der Faktorladungsmuster der jeweils zweiten Faktoren wurde keine ökologische Interpretation gefunden.

Faktorkombination drei wird auf Seiten des wäßrigen Oberbodenextrakts durch die Komponenten DOC, Al, Mn, Na und Aziditätsgrad hoch positiv sowie durch die Komponenten Ca/Al und eingeschränkt auch Mg/Al hoch negativ aufgeladen. Mit diesem Faktor wird der Gehalt des wäßrigen Extrakts an gelöstem organischem Kohlenstoff besonders betont. Da dieser mit Versauerungsmerkmalen positiv korreliert ist, weist hier ein hoher gelöster Kohlenstoffgehalt auf einen eher ungünstigen Oberbodenzustand hin. Insofern ist erklärbar, daß dieser Faktor

auf Seiten der Nadelspiegelwerte mit einer hohen negativen Faktorladung für Kalium verbunden ist.

Wäßriger Extrakt des Unterbodens - Nadelspiegelwerte

Die zwischen diesen beiden Variablengruppen signifikanten Faktoren erklären zusammen nur 14 % der Varianz der Nadelspiegelwerte. Für beide Faktorkombinationen wurden keine sinnvollen ökologischen Interpretationen gefunden (vgl. Anhang 2, Tab. 2.3.10a und b).

3.4.3 Zusammenhänge zwischen dem Kronenzustand und den Bodenkompartmenten sowie Nadelspiegelwerten

Überprüft werden mit Hilfe der multiplen Korrelations- und Regressionsanalyse Zusammenhänge zwischen den bereits in Kapitel 3.4.2 aufgeführten sechs Bodenkompartmenten und den Nadelspiegelwerten auf der einen Seite und dem mittleren Nadelverlust der 24 Probestämme je Aufnahmepunkt auf der anderen Seite.

Humusaufgabe - mittlerer Nadelverlust

Das adjustierte multiple Bestimmtheitsmaß der Beziehungen zwischen der Variablengruppe „Humusaufgabe“ und der Kriteriumsvariablen „mittlerer Nadelverlust“ beträgt 0,60. Die Variablen des Bodenkompiments „Humusaufgabe“ erklären also mehr als die Hälfte der Varianz des mittleren prozentualen Nadelverlustes des untersuchten Fichtenkollektives. Die Strukturkoeffizienten zeigen hohe positive Werte für die C/N- und C/P-Verhältnisse sowie den Kohlenstoffgehalt und hohe negative Werte für den Eisen-, Silizium-, Aluminium- und Magnesiumgehalt (Anhang 2, Tab. 2.4a).

Die C/N-, C/P-Verhältnisse sind ein Indikator für den Humuszustand (v. ZEZSCHWITZ 1980). Um so weiter die Verhältnisse, desto stärker sind die Stoffkreisläufe entkoppelt. Der C-Gehalt dürfte um so größer sein, desto geringer die Vermischung von organischer und mineralischer Substanz z.B. durch Bioturbation ist. Eisen, Silizium und Aluminium in der Humusaufgabe stammen wohl insbesondere aus der Einmischung mineralischer Substanz in die Humusaufgabe. Der Vorzeichenwechsel zwischen dem C-Gehalt und dem Fe-, Si- und Al-Gehalten ist daher durchaus plausibel.

Magnesium ist ein wesentliches Nährelement. Zudem ist der Magnesiumgehalt der Humusauf-
lage eng mit dem Versauerungszustand des Bodens verbunden (vgl. Kap. 3.4.1). Daher ist die
negative Korrelation zwischen dem Magnesiumgehalt der Humusauf-
lage und dem mittleren Nadelverlust erwartungsgemäß.

Die vorliegenden Analysen deuten daraufhin, daß mit einer Verschlechterung des Humuszu-
standes, gekennzeichnet durch weitere C/P- und C/N-Verhältnisse, höhere C- und geringere
Fe-, Si-, Al- und Mg-Gehalte der mittlere Nadelverlust des untersuchten Fichtenkollektivs
zunimmt.

Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe - Nadelverlust

Die Variablen des Bodenkompartmentes „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“ erklären
42 % der Varianz der Variablen „mittlerer Nadelverlust“. Hohe positive Strukturkoeffizienten
ergeben sich für die Variablen H, XSH und C/N, hohe negative Strukturkoeffizienten für die
Variablen $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$, pH_{KCl} und XSK (Anhang 2, Tab. 2.4b). Je stärker die Versauerung, ge-
kennzeichnet durch abnehmende pH-Werte und höhere H^+ -Gehalte und -Sättigungen am
Austauscher, sowie je geringer die Kaliumsättigung und je weiter das C/N-Verhältnis, desto
höher scheint der Nadelverlust der untersuchten Fichten zu sein.

Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe - Nadelverlust

Die Variablen der tieferen Mineralbodenfestphase erklären mit 36 % noch einen beträchtli-
chen Teil der Varianz des Nadelverlustes. Vorzeichen und Reihenfolge der Strukturkoeffizien-
ten entsprechen in etwa derjenigen der Beziehung zwischen dem Oberen Mineralboden und
dem Nadelverlust (Anhang 2, Tab. 2.4c). Hinzu kommen mit positivem Vorzeichen hohe
Koeffizienten für die austauschbaren Fe- und Al-Gehalte sowie hoch negative Strukturkoeffi-
zienten für die Ca-Sättigung des Austauschers. Auch hier gibt die Analyse einen Hinweis auf
zunehmende Nadelverluste bei zunehmender Versauerung.

Nährstoffvorräte im Mineralboden bis 60 cm Tiefe - Nadelverlust

Die Nährstoffvorräte erklären mit 8 % nur einen unbedeutenden Anteil der Varianz des mittleren Nadelverlustes.

Wäßrige Bodenextrakte - Nadelverlust

Die multiplen Korrelationen zwischen dem wäßrigen Extrakt des Oberbodens und dem wäßrigen Extrakt des Unterbodens zum mittleren Nadelverlust sind jeweils nicht signifikant.

Nadelspiegelwerte - Nadelverlust

Die Variablen­gruppe Nadelspiegelwerte erklärt 45 % der Varianz des mittleren Nadelverlustes. Den höchsten Beitrag hierzu hat der Kaliumgehalt der Nadeln, mit merklichem Abstand im Betrag der Strukturkoeffizienten gefolgt vom Asche-, Aluminium-, Zink- und Cadmiumgehalt (Anhang 2, Tab. 2.4e). Alle diese Komponenten sind negativ mit dem mittleren Nadelverlust korreliert; bei abnehmenden Gehalten in den Nadeln nimmt der Nadelverlust des untersuchten Probestaumkollektivs also zu.

Kalium ist ein wesentliches Nährelement. Allerdings liegen die in dem hier zugrunde liegenden Fichtenkollektiv angetroffenen Kaliumgehalte in den Nadeln mit 3350 bis 7800 ppm im Bereich ausreichender bis guter Versorgung. Insofern ist der gefundene, vergleichsweise enge Zusammenhang zum Nadelverlust unerwartet. Bei der Überprüfung auf Scheinkorrelationen wurde eine Korrelation des Kaliumgehalts in den Nadeln zum Baumalter festgestellt (bivariater Korrelationskoeffizient: -0,36). Wird dieser Alterseinfluß herauspartialisiert, sinkt die bivariate Korrelation zwischen dem Kaliumgehalt der Nadeln und dem mittleren Nadelverlust von -0,45 auf -0,29 sehr deutlich. Entsprechend verringert sich das adjustierte multiple Bestimmtheitsmaß von 45 % auf 28 %.

Von den übrigen, den Zusammenhang zwischen den Nadelspiegelwerten und dem Nadelverlust bestimmenden Komponenten korreliert der Aschegehalt sehr eng mit dem Kalziumgehalt der Nadeln. Wie die kanonischen Korrelationsanalysen zwischen den Bodenkompartmenten und den Nadelspiegelwerten aufgezeigt haben, sind der Aschegehalt, der Cadmium- und auch der Zinkgehalt der Nadeln eng mit dem Versauerungszustand des Bodens verbunden. Von daher ist die negative Korrelation dieser Komponenten mit dem Nadelverlust erklärbar. Zink ist

zudem ein wesentliches Nährelement. Im untersuchten Fichtenkollektiv liegen mehr als ein Viertel der vorgefundenen Zinkgehalte unter der Mangelgrenze von 30 ppm (vgl. ZÖTTL und HÜTTL 1985). Dies deutet auf eine weitverbreitete, sehr schwache Zinkversorgung der Fichten hin. Insofern ist eine negative Korrelation zwischen dem Zinkgehalt der Nadeln und dem Nadelverlust plausibel. Das gleiche gilt für den Kupfergehalt. Auch dieser Spurennährstoff liegt mit Gehalten von 2 - 4,6 ppm häufig sehr nahe an der Mangelgrenze.

Eine Erklärung für den Zusammenhang zwischen dem Aluminiumgehalt der Nadeln und dem Nadelverlust konnte nicht gefunden werden.

3.5 Zusammenfassende Wertung

Die Ergebnisse der kanonischen Korrelationsanalysen zeigen, daß zwischen den unterschiedlichen Bodenkompartmenten mit erklärten Varianzen zwischen 35 und 60 % (vgl. Abb. 3.1) enge statistische Zusammenhänge bestehen, die sich aus den Mustern der Faktorladungen vielfach auch kausal deuten lassen. Aus der Interpretation der Faktorladungsmuster wird deutlich, daß die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Bodenkompartmenten vor allem in Gemeinsamkeiten des Versauerungszustandes begründet sind. So läßt sich bei allen untersuchten Gruppenbeziehungen zwischen den Bodenkompartmenten mindestens eine Faktorkombination finden, die auf beiden Seiten den Versauerungszustand beschreibt.

Im Kompartiment „Humusauflage“ wird der Versauerungsstatus vor allem über die pH-Werte sowie die Ca-, Mg-, K- und Mn-Gehalte und, mit Vorzeichenwechsel, die Humusmenge sowie die C/N- und C/P-Verhältnisse charakterisiert. Mit geringerer Versauerung, d.h. höheren pH-Werten, sind höhere Gehalte der Spurennährstoffe Zn, Fe und Cu, aber auch höhere Cd-Gehalte verbunden. Dieser Befund ist plausibel, da diese Spurenelemente nur bei höheren pH-Werten stabile Komplexe bilden und bei Versauerung aus der Humusauflage verstärkt ausgewaschen werden (SCHULTZ 1987, DVWK 1988).

In der Festphase des oberen Mineralbodens wird der Versauerungsstatus vor allem durch die pH-Werte sowie die Gehalte der Kationbasen Ca und Mg und, mit Vorzeichenwechsel, die Gehalte der Kationsäuren H und Fe angezeigt. Häufig treten zur ersten Gruppe die austauschbaren Kalium- und Mangangehalte sowie die Kationenaustauschkapazität, zur zweiten Gruppe

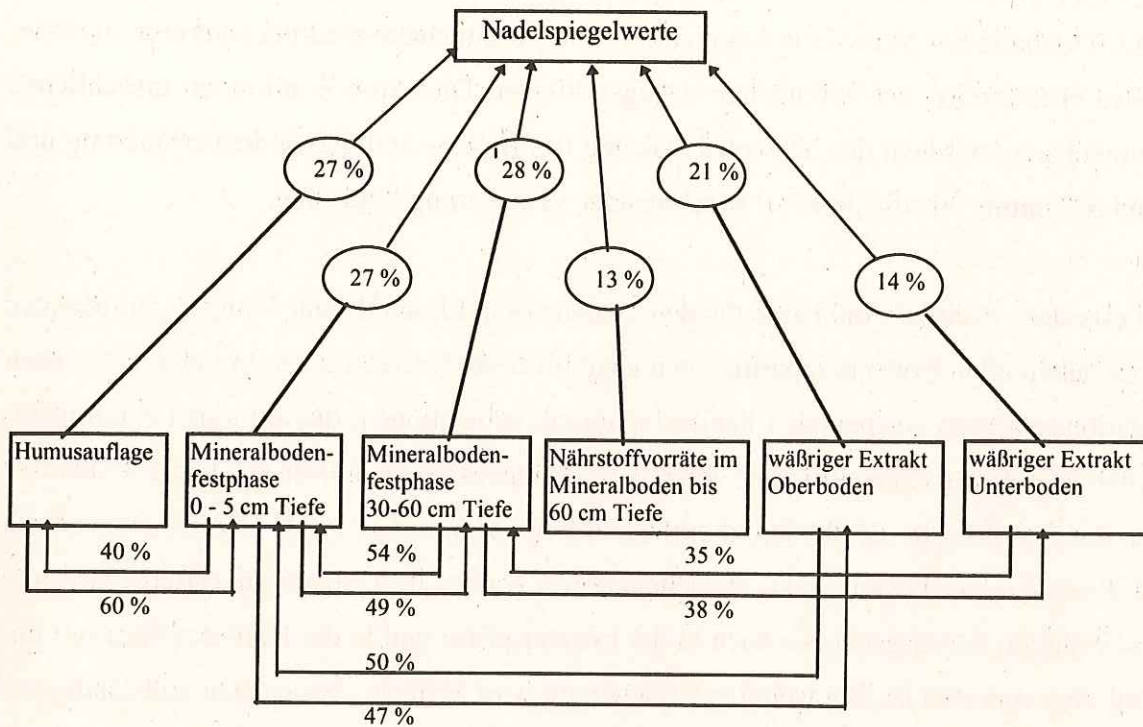


Abb. 3.1: Statistischer Zusammenhang zwischen den Variablengruppen der Bodenkompimente und der Nadelspiegelwerte; angegeben sind die durch die jeweils signifikanten Faktoren der kanonischen Korrelationsanalyse erklärten Varianzen

die C/N- und C/P-Verhältnisse hinzu. Der austauschbare Aluminiumgehalt wird dagegen im Mineralboden des Tiefenbereichs 0-5 cm nicht eindeutig zugeordnet, vermutlich, da geringe austauschbare Aluminiumgehalte sowohl eine geringe Versauerung (Austauscher überwiegend durch Ca und Mg belegt), als auch eine besonders weit fortgeschrittene Versauerung (Austauscher überwiegend durch H und Fe belegt) indizieren können.

In der Festphase des tieferen Mineralbodens ist Aluminium dagegen ein eindeutiger Versauerungsweiser. Eine Verdrängung der Aluminiumionen durch H- und Fe-Ionen tritt hier anscheinend noch nicht in nennenswertem Umfang auf. Daher ersetzt Al in diesem Bodenkompiment in den entsprechenden Faktoren auf der „Säureseite“ die Komponenten H und Fe. Auf der „Basenseite“ zeigen im oberen und unteren Mineralboden die gleichen Komponenten den Versauerungszustand an.

Im wässrigen Extrakt sowohl des Oberbodens als auch des Unterbodens wird der Versauerungsstatus durch den pH-Wert, die Ca- und Mg-Gehalte sowie die Ca/Al- und Mg/Al-

Verhältnisse und, mit Vorzeichenwechsel, dem Aziditätsgrad beschrieben. Häufig stehen der ersten Gruppe die Na-, Mn- und NO_3N -Gehalte und dem Aziditätsgrad die Fe-, Al-, NH_4N - und SO_4S -Gehalte zur Seite. Die Ammonium- und Sulfatgehalte sind bei stärkerer Versauerung also eher größer, der Nitratgehalt dagegen kleiner. Dies könnte auf einen ursächlichen Zusammenhang zwischen der Schwefelbelastung des Bodens und der Bodenversauerung und auf eine gehemmte Nitrifikation bei zunehmender Versauerung hindeuten.

Eine besondere Rolle als Indikator für den Bodenzustand kommt dem Mangan zu. Mangan zeigt zwischen allen Bodenkompartmenten enge bivariate Korrelationen. In den kanonischen Korrelationsanalysen ergeben sich häufig Faktorenkombinationen, die auf einen Zusammenhang der jeweiligen Kompartimente über den „Manganstatus“ hinweisen. Diese indikative Bedeutung des Mangans dürfte darauf zurückzuführen sein, daß es in pH-Bereichen zwischen 5 und 4 verstärkt in Lösung geht, als sehr mobiles Kation im Ökosystem verteilt wird und dann sowohl am Austausch, als auch in der Lösungsphase und in der Humusaufgabe mit hohen Anteilen vertreten ist. Bei weiterer Versauerung wird Mangan aber nahezu vollständig aus dem Ökosystem ausgewaschen und kommt in allen Ökosystemkompartimenten dann nur noch in sehr geringen Gehalten vor. Hohe Mangangehalte zeigen daher eine eher geringe Versauerung, geringe Mangangehalte dagegen bereits eine weit fortgeschrittene Versauerung an.

Die Variablen der unterschiedlichen Bodenkompimente erklären nach den Befunden der kanonischen Korrelationsanalysen zwischen 13 und 28 % der Varianz der Nadelspiegelwerte (vgl. Abb. 3.1). Überraschend ist, daß nicht nur die Humusaufgabe und der oberste Mineralbodenbereich, sondern auch die „Mineralbodenfestphase in 30 bis 60 cm Tiefe“ hohe Erklärungsbeiträge liefern und daß zwischen den Variablen der wäßrigen Bodenextrakte und den Nadelspiegelwerten weit weniger enge Zusammenhänge bestehen als zwischen der Mineralbodenfestphase und den Nadelspiegelwerten.

Der vergleichsweise hohe Beitrag der Variablengruppe „Mineralbodenfestphase in 30 - 60 cm Tiefe“ zur Erklärung der Varianz der Nadelspiegelwerte dürfte darauf zurückzuführen sein, daß sich die Waldböden in diesem Tiefenbereich stark differenzieren. Während der obere Mineralbodenbereich durch Versauerung und Nährelementauswaschung stark in Richtung „versauert, verarmt an Nährstoffkationen“ homogenisiert ist, unterscheiden sich die Standorte im Tiefenbereich 30 - 60 cm in ihrem ökochemischen Zustand erheblich stärker (vgl. BLOCK et al. 1991). Bei einheitlich versauertem Oberboden dürfte dem Tiefenbereich 30 - 60 cm daher für die Nährstoffversorgung der Bäume eine erhebliche Bedeutung zukommen. Auch

wenn die Wurzelverteilung einen engeren Zusammenhang der Nadelspiegelwerte mit dem stärker durchwurzelten Oberboden erwarten ließ, ist der hohe Beitrag des Mineralbodenbereichs 30 bis 60 cm daher durchaus erklärbar.

Der wäßrige Bodenextrakt sollte den leicht löslichen Ionenpool und damit die Lösungsphase charakterisieren, die unmittelbar mit den Pflanzenwurzeln in Kontakt steht. Daher ist der Befund der kanonischen Korrelationsanalyse unerwartet, daß der Zusammenhang zwischen den Variablengruppen der wäßrigen Bodenextraktion zu den Nadelspiegelwerten schwächer ist als diejenigen zwischen den Variablengruppen der Bodenfestphase, die insbesondere den austauschbaren Ionenpool charakterisieren, zu den Nadelspiegelwerten. Dieser Befund kann als Hinweis gewertet werden, daß der wäßrige Extrakt die Bodenlösungsphase nur unzureichend charakterisiert. Dies kann darauf beruhen, daß durch die Probenaufbereitung (Homogenisierung, Trocknung) und die anschließende Extraktion Stoffe freigesetzt werden, die in situ den Wurzeln nicht zur Verfügung stehen. So stellte HILDEBRAND (1991) beim Vergleich von Quasi-Gleichgewichtslösungen natürlich gelagerter und homogener Bodenkörper fest, daß natürliche Aggregatoberflächen sehr stark an wasserlöslichen Nährstoffkationen verarmt sein können und bei der Zerstörung der Aggregate im Zuge der herkömmlichen Probenaufbereitung wesentliche Informationen für die Diagnose des Bodenzustandes verloren gehen. Die in der hiesigen Untersuchung festgestellte Beobachtung nur schwacher Zusammenhänge zwischen den Variablen des wäßrigen Bodenextrakts und den Nadelspiegelwerten unterstützt die Forderung von HORN (1989), Analysen zur Beschreibung der Nährstoffverfügbarkeit nicht an homogenisierten, sondern an ungestörten Bodenproben vorzunehmen.

Überraschend gering ist auch der Zusammenhang zwischen den Nährstoffvorräten im Mineralboden und den Nadelspiegelwerten, was nicht nur an den kanonischen Korrelationen, sondern auch an den nur geringen bivariaten Korrelationen zu erkennen ist (vgl. Anhang 2, Tab. 2.2.15). Da diese Kennwerte die Bodennährstoffverhältnisse über den Hauptwurzelraum integrieren, war eine engere Beziehung zu den Nährstoffgehalten der Nadeln erwartet worden. Allem Anschein nach werden die Nadelspiegelwerte stärker von Parametern beeinflusst, die den Versauerungszustand des Bodens beschreiben, als von der Gesamtmenge der zur Verfügung stehenden Nährstoffe im Boden. Denkbar ist auch, daß der Zusammenhang deshalb so schwach ist, da nur die im Mineralboden, nicht aber die in der Humusaufgabe befindlichen

Nährelementvorräte berücksichtigt wurden und die Gesamtmenge der verfügbaren Nährstoffe daher nur unzureichend charakterisiert wird.

Die bei den kanonischen Korrelationsanalysen berechneten Faktorkombinationen deuten daraufhin, daß die Zusammenhänge zwischen Bodenkompartmenten und Nadelspiegelwerten vor allem aus dem Versauerungsstatus der Ökosysteme resultieren. Bei zunehmender Bodenversauerung, gekennzeichnet durch die bereits bei der Erläuterung des Zusammenhangs zwischen den Bodenkompartmenten aufgeführten Kennwerte, nehmen die Gehalte an Ca, Mg, K, Zn, Cd und Mn ab und die Gehalte an N und S zu. Cadmium verhält sich hier also gleichsinnig wie die basischen Nährstoffe. Der Mangangehalt in den Nadeln ist stets eng mit dem Mangangehalt in den Bodenkompartmenten korreliert. Die Zunahme des Schwefelgehalts bei zunehmender Bodenversauerung deutet auf die Rolle von Schwefelverbindungen als Versauerungsursache hin. Bemerkenswert ist, daß auch der Stickstoffgehalt der Nadeln mit zunehmender Versauerung steigt. Ohne anthropogenen Einfluß sind hohe Stickstoffgehalte in den Nadeln eher auf basenreicheren Standorten zu erwarten. Daher kann der beobachtete Zusammenhang als Hinweis auf die Rolle der Stickstoffverbindungen bei der Bodenversauerung gewertet werden.

Die multiple Korrelationsanalyse weist enge statistische Zusammenhänge zwischen der Humusaufgabe und der Mineralbodenfestphase in beiden Tiefenbereichen auf der einen Seite und dem mittleren Nadelverlust des untersuchten Kollektivs auf der anderen Seite aus (Abb. 3.2). Die Strukturkoeffizienten zeigen an, daß mit einer Verschlechterung des Humuszustandes, zunehmender Versauerung des Mineralbodens und abnehmenden Kalium- und Kalziumgehalten am Austauscher der mittlere Nadelverlust des Probebaumkollektivs zunimmt. Die statistischen Zusammenhänge lassen sich also durchaus auch kausal erklären.

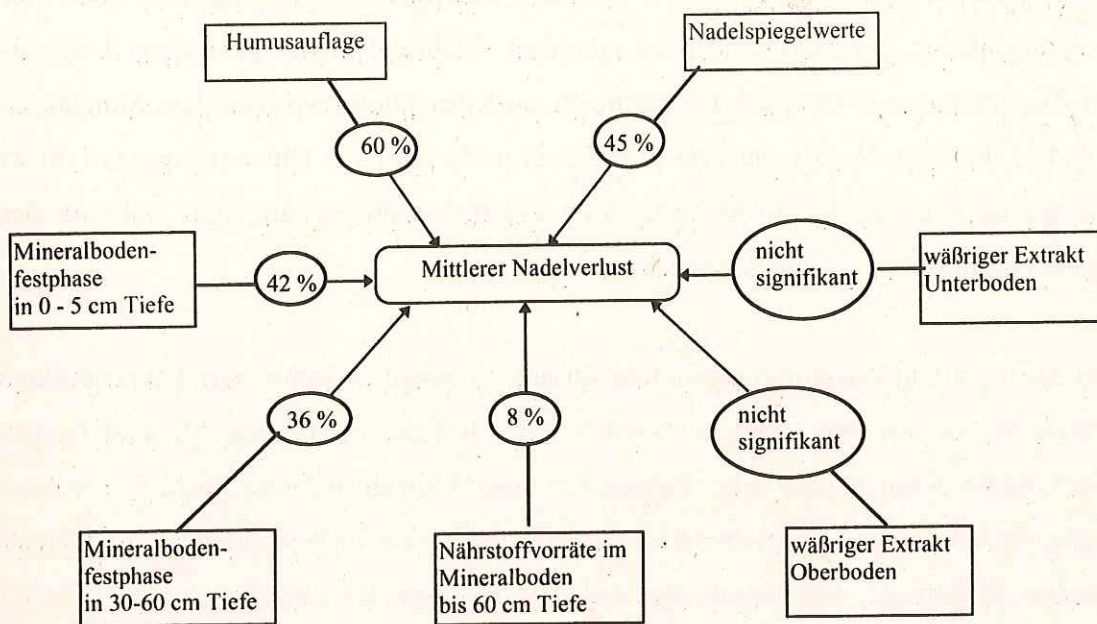


Abb. 3.2: Statistischer Zusammenhang zwischen Variablengruppen der Bodenkompartimente und der Nadelspiegelwerte zum Nadelverlust; angegeben sind die adjustierten Bestimmtheitsmaße der multiplen Korrelationsanalyse

Allerdings decken sich die festgestellten Zusammenhänge nur teilweise mit den Befunden einer von GÄRTNER et al. (1990) in Hessen durchgeführten Untersuchung. Dort wurden Kronenzustandsansprachen sowie Boden- und Nadelanalysen an einem 147 Aufnahmepunkte umfassenden Bionetz einer umfassenden multivariaten statistischen Analyse unterzogen. In der hessischen Untersuchung ergab sich wie in der hiesigen, daß die Beschaffenheit der Humusauflage einen deutlichen Einfluß auf den Nadelverlust von Fichten hat. Demgegenüber konnte dort, anders als in der hiesigen Untersuchung, kein Zusammenhang zwischen den Elementgehalten des Ah- und A/B-Horizontes und dem Nadelverlust festgestellt werden. Da die Elementspektren sowie die angewandten Analyseverfahren sich bei beiden Untersuchungen sehr deutlich unterscheiden und insbesondere die Variablen C/N, C/P, C und Si, die sich in der hiesigen Studie als bedeutsam erwiesen haben, in der hessischen Untersuchung nicht erfaßt wurden, unterscheiden sich die am Zusammenhang beteiligten Komponenten wesentlich. Während nach der hessischen Untersuchung vor allem die Zink-, Calcium-, Cadmium- und Kaliumgehalte sowie der pH-Wert der Humusauflage den Nadelverlust beeinflussen, sind es nach der hiesigen Untersuchung vor allem die C/N- und C/P-Verhältnisse sowie die auf Bioturbation hinweisenden Silizium-, Eisen- und Aluminiumgehalte in der Humusauflage.

Ein signifikanter Zusammenhang zeigte sich in der hessischen Untersuchung wie in der hiesigen auch zwischen den Nadelspiegelwerten und dem Nadelverlust. Allerdings sind auch hier deutliche Unterschiede in den Befunden zu erkennen. Während in der hessischen Untersuchung der Zusammenhang vor allem aus der positiven Korrelation zwischen dem Mangengehalt der Nadeln und dem Nadelverlust resultiert, trägt in der hiesigen Untersuchung vor allem der Kaliumgehalt der Nadeln am stärksten zum Gesamtzusammenhang bei, während der Mangengehalt nicht mit dem Nadelverlust korreliert ist.

Die in der hiesigen Untersuchung ermittelten Zusammenhänge zwischen der Humusaufgabe und der Mineralbodenfestphase zum mittleren Nadelverlust des Fichtenkollektivs sind unerwartet straff, da der Kronenzustand der Bäume von einer Vielzahl weiterer, nicht in der Analyse enthaltener Parameter beeinflusst werden dürfte. Hier sind insbesondere die Parameter Bestandesalter, Höhenlage, Exposition, Bestandesdichte, Lage der Einzelbäume im Bestand (Bestandesrand, an Lücken, abgeschirmt in geschlossenen Bestandesteilen), soziale Stellung der Einzelbäume, Nutzungsgeschichte des Standortes, Bestandesgeschichte und waldbauliche Behandlung aufzuführen. Das Datenmaterial wurde daher eingehend auf Scheinkorrelationen überprüft. Die Häufigkeitsverteilungen der Variablen gaben hierzu keine Hinweise. In den Prädiktorvariablen-Gruppen wurden Ausreißer vor der Analyse eliminiert. Die Kriteriumsvariable „mittlerer Nadelverlust“ weist zwar mit 0 - 34 % nur eine geringe Spanne aus - stark geschädigte Bestände fehlen -, zeigt aber über diesen Wertebereich eine gleichmäßige Verteilung.

Überprüft wurde auch, ob Scheinkorrelationen aufgrund gemeinsamer Ursache bestehen. So wäre denkbar, daß stärker geschädigte Stichprobenpunkte vor allem in den Hochlagen der Mittelgebirge liegen. Hier könnte zum Beispiel die Klimaungunst als gemeinsame Ursache für stärkere Kronenverlichtung, ungünstige Humusform und stärkere Bodenversauerung wirken. Es zeigte sich allerdings, daß die Höhenlage weder mit dem mittleren Nadelverlust noch mit den Bodenparametern nennenswert korreliert ist. Dementsprechend wirkte sich ein Herauspartialisieren des Einflusses der Höhenlage auf die Ergebnisse der multiplen Korrelationsanalyse nur unwesentlich aus.

Weiterhin wurde überprüft, ob zufallsbedingt auf den stärker versauerten Standorten in größeren Anteilen **ältere** Bestände erfaßt wurden als auf den weniger versauerten und hierdurch eine Scheinkorrelation zustande kommt. Das Bestandesalter hat erfahrungsgemäß einen erheblichen Einfluß auf den Kronenzustand. Im vorliegenden Kollektiv ergab sich ein bivariater Korrelationskoeffizient von +0,67 zwischen Alter und mittlerem Nadelverlust. Ein Herauspartia-

lisieren des Alterseinflusses bewirkte allerdings keine sehr wesentliche Veränderung in den korrelativen Beziehungen zwischen den Bodenparametern und dem Nadelverlust. Die relative Bedeutung der einzelnen Parameter am Gesamtzusammenhang blieb im wesentlichen unverändert.

Insofern konnten keine Hinweise auf das Vorliegen von Scheinkorrelationen gefunden werden. Dennoch dürfen die Befunde vor allem angesichts des sehr geringen Stichprobenumfangs nur als erste Hinweise auf mögliche Kausalzusammenhänge gewertet werden. Es erscheint dringend angeraten, die Ergebnisse anhand unabhängiger und umfangreicherer Stichprobenkollektive, z.B. aus der bundesweiten Bodenzustandserhebung, zu überprüfen.

3.6 Literatur

- BLOCK, J., BOPP, O., GATTI, M., HEIDINGSFELD, N., ZOTH, R. (1991): Waldschäden, Nähr- und Schadstoffgehalte in Nadeln und Waldböden in Rheinland-Pfalz. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz Nr. 16/91, 133 S.
- BORTZ, J. (1993): Statistik für Sozialwissenschaftler. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 753 S.
- DVWK (1988): Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.: Filtereigenschaften des Bodens gegenüber Schadstoffen Teil 1: Beurteilung der Fähigkeit von Böden, zugeführte Schwermetalle zu immobilisieren. Merkblätter 212.
- FIEDLER, H. J. und RÖSLER H. J. (1988): Spurenelemente in der Umwelt. Enke Verlag Stuttgart (Hrsg.), 278 S.
- GÄRTNER, E.J., URFER, W., EICHHORN, J., GRABOWSKI, H. und HUSS, H. (1990): Die Nadelverluste mittelalter Fichten in Hessen in Abhängigkeit von Nadelinhaltsstoffen, Bodenelementgehalten und Standortfaktoren. Forschungsberichte der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt, Bd. 10, 192 S.
- HARTUNG, J. und ELPELT, B. (1992): Multivariate Statistik - Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. Oldenburg, München
- HILDEBRAND, E.E. (1991): Die chemische Untersuchung ungestört gelagerter Waldbodenproben - Methoden und Informationsgewinn. Kernforschungszentrum Karlsruhe, KFK-PEF, 201 S.
- HORN, R. (1989): Die Bedeutung der Bodenstruktur für die Nährstoffverfügbarkeit. Kali-Briefe (Büntehof) 19/7, S. 505-515.
- SAS INSTITUTE INC. (1988): SAS/STAT User's Guide, Release 6.03 Edition, Cary, NC, 1028 S.
- SACHS, L. (1992): Angewandte Statistik. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 7. Auflage.
- SCHULTZ, R. (1987): Vergleichende Betrachtung des Schwermetallhaushalts verschiedener Waldökosysteme Norddeutschlands. Bericht des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, Reihe A, Band 32, 217 S.
- ULRICH, B. (1981): Ökologische Gruppierung von Böden und ihrem chemischen Bodenzustand. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 144, S. 289-305.

WUNN, U. (1995): Möglichkeiten und Grenzen der kanonischen Korrelationsanalyse zur Beschreibung der Beziehung zwischen Bodenparametern, Nadelinhaltsstoffen und Kronenzustand. Tagungsbericht der Sektion Forstliche Biometrie und Informatik im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten Freising, im Druck.

ZEZSCHWITZ, E. v. (1980): Analytische Kennwerte typischer Humusformen westfälischer Bergwälder. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 143, S. 692-700.

ZÖTTL, H.W. und HÜTTL, R. (1985): Schadsymptome und Ernährungszustand von Fichtenbeständen im südwestdeutschen Alpenvorland. Allgemeine Forstzeitschrift 40, S. 197-199

4. Ökochemische Ausstattung wesentlicher Waldboden- substrate und Bewertung ihrer Empfindlichkeit gegen- über Bodendegradation durch Luftschadstoffbelastung

von Joachim Block¹, Oliver Bopp¹ und Rüdiger Butz-Braun²

4.1 Problemstellung

Die in Rheinland-Pfalz vorkommenden Ausgangssubstrate der Bodenbildung besitzen eine sehr unterschiedliche chemische und mineralogische Zusammensetzung (BLOCK et al. 1991, BUTZ-BRAUN 1993) und dürften in der Verwitterbarkeit und in Umfang und Art der bei der Verwitterung freigesetzten Nährelemente erheblich variieren. Es ist daher davon auszugehen, daß die verschiedenen Ausgangssubstrate der Bodenbildung den derzeitigen ökochemischen Zustand der Waldböden prägen und vor allem ihr Basengehalt ihre Disposition gegenüber fortschreitender Bodenversauerung erheblich beeinflußt.

Aus einer differenzierten Beschreibung der ökochemischen Ausstattung der bedeutsamen rheinland-pfälzischen Waldbodensubstrate und einer Bewertung ihrer Empfindlichkeit gegenüber Bodendegradation sind daher wesentliche Informationen über die Notwendigkeit und zur Steuerung von Bodenschutz- und gegebenenfalls Restaurationsmaßnahmen zu erwarten.

4.2 Ausscheidung von Ausgangssubstratgruppen der Bodenbildung

Alle 1279 Ende 1994 in der Waldbodendatenbank erfaßten Bodenprofile wurden in das Schlüsselverzeichnis der Ausgangssubstrate der Bodenbildung Rheinland-Pfalz (Anhang 3) eingeordnet. Die ersten beiden Kennziffern des 4-stelligen Schlüssels stimmen mit dem entsprechenden Schlüssel der Arbeitsanleitung zur bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) (BML 1994) überein. Die beiden hinteren Kennziffern modifizieren die Hauptgruppen nach den für Rheinland-Pfalz wesentlichen Substraten. In der Regel wurde ein oberes, häufig allochthones Ausgangssubstrat und ein unteres, meist autochthones Ausgangssubstrat unterschieden. Die vorgenommene Einordnung der Waldbodenprofile ergab 169

¹ Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz

² Firma Butz-Braun & Partner, Tonmineralogische Beratung, 35274 Kirchhain

Kombinationen aus oberem und unterem Ausgangssubstrat. Da bei der geringen Besetzung der Mehrzahl dieser Kombinationen eine getrennte Auswertung ihrer bodenchemischen Eigenschaften nicht in Betracht zu ziehen war, wurden diese Kombinationen von oberem und unterem Ausgangssubstrat in 16 Gruppen zusammengefaßt, die eine ähnliche chemisch-mineralogische Grundaustattung erwarten ließen (Tab. 4.1).

Gruppen Nr.	Bezeichnung	Anzahl Profile
1	Lehmige Substrate basischer Vulkanite	52
2	Lehmige Substrate saurer und intermediärer Vulkanite	34
3	Substrate aus Bims	45
4	Substrate aus carbonathaltigem Material	40
5	Lehmige Substrate aus/über Schluffsteinen, Schieferton, Ton	75
6	Lehmige Substrate aus/über Tonschiefer und Tonschiefer mit Grauwacke-wechsellagerungen des Rheinischen Schiefergebirges	250
7	Sandige und lehmige Substrate aus/über Sandstein	134
8	Sandige und lehmige Substrate aus/über Sandstein, Grauwacken und sonstige quarzreiche Substrate innerhalb des Rheinischen Schiefergebirges	92
9	Sandige Substrate aus/über Mittlerem Buntsandstein	145
10	Löße und in situ teilentbaste Löße	28
11	Decklehme größerer Mächtigkeit, minderer Beeinflußung durch das darunterliegende geologische Ausgangsgestein	42
12	Auelehme, Schwemmlösse und carbonathaltige Fluß- und Bachablagerungen	35
13	Überwiegend carbonatfreie Sedimente pleistozäner Terrassen und holozäner Hochflutablagerungen im nördlichen Oberrheinischen Tiefland	54
14	Substrate der Terrassensedimente der Kerb- und Durchbruchtäler	36
15	Sandige Substrate der Schwemmsandfächer	85
16	Flug- und Dünensande	15

Tab. 4.1: Gruppen der Ausgangssubstrate der Bodenbildung - Rheinland-Pfalz

Wenn eine ausreichende Besetzung mit Profilen vorlag, wurden möglichst homogene, d.h. gleichen geologischen Untergrund enthaltene Gruppen gebildet. Dies konnte insbesondere bei den Gruppen 3 (Bims), 6 (Devonischer Tonschiefer), 9 (Mittlerer Buntsandstein), 10 (Löß), 15 (Schwemmsandfächer der Pfälzerwaldbäche) und 16 (Flug- und Dünensand in der Vorderpfälzischen Rheinebene) realisiert werden. Demgegenüber umfassen die Gruppen 4 (carbonathaltige Substrate), 5 (Schluffsteine, Schieferton, Ton), 7 (Sandsteine außerhalb des Rheinischen Schiefergebirges) eine Vielzahl geologisch unterschiedlicher Substrate und sind in dieser Hinsicht deutlich inhomogener.

Grundsätzlich zusammengefaßt wurden die bei der Vergabe der Profilkennziffern noch unterschiedenen Deck- und (alten) Verwitterungslehme. Reine Verwitterungslehme sind selten. Vor allem in Mittelgebirgsräumen ist das autochthone Verwitterungsmaterial meist durch Fließvorgänge mit allochthonem Material vermischt. Eine getrennte Auswertung bezüglich der austauschbaren Basengehalte zeigte keine wesentlichen Unterschiede zwischen den als Verwitterungslehme und den als Decklehme angesprochenen Standorten bei gleichem Untergrundmaterial. Daher wurden Deck- und Verwitterungslehme bei gleichem autochthonen Ausgangssubstrat zusammengefaßt.

Insgesamt konnten 1162 Waldbodenprofile den 16 Gruppen zugeordnet werden. Die übrigen 117 in der Waldbodendatenbank erfaßten Profile waren entweder Ausgangssubstraten zuzuordnen, die mit nur sehr wenigen Profilen besetzt waren und daher nicht ausgewertet werden konnten (z.B. Moore), oder sie waren aufgrund unzureichender Angaben in den Profilbeschreibungen nicht eindeutig einem Ausgangssubstrat oder einer Ausgangssubstratgruppe zuzuordnen.

4.3 Ökochemische Charakterisierung der Ausgangssubstratgruppen der Bodenbildung

Alle wesentlichen bodenchemischen Befunde der 16 Ausgangssubstratgruppen sind im Anhang 3 (Tab. 3.1-3.28) in Form von Perzentiltabellen zusammengefaßt. Aufgeführt sind neben den Minimal- und Maximalwerten die 10er-, 25er-, 50er- und 90er-Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung der jeweiligen Kennwerte getrennt für die einzelnen Substratgruppen und die drei in Kapitel 2.2 beschriebenen Mineralbodentiefenbereiche.

Besonders wesentlich erscheinende Kenngrößen wurden ergänzend hierzu in Form von Boxplots dargestellt (Anhang 3, Abb. 3.1-3.10). Die Länge der Box ist durch den Abstand zwischen dem 25er- und 75er-Perzentil definiert. Die waagrechte Linie in der Box markiert den Median. Die Linien unterhalb und oberhalb der Box reichen entweder bis zum kleinsten oder größten Datenwert, oder maximal bis zum 1,5-fachen des durch die Box definierten Wertebereichs. Die Punkte außerhalb der Linien zeigen bezüglich der Wertemenge extreme Meßgrößen an (SCHULTE et al. 1991).

Von besonderem Interesse ist auch die Lage der Versauerungsfront¹ (vgl. Kap. 5) in den einzelnen Substratgruppen und hier vor allem, ob sie sich noch innerhalb des wurzelerreichbaren Bodenraums befindet oder diesen Bereich bereits durchschritten hat. Daher wurde in Tabelle 3.29 (Anhang 3) die Häufigkeit der Lage der Versauerungsfront in verschiedenen Bodenbereichen getrennt für die einzelnen Substratgruppen aufgeführt.

Weiterhin enthalten die Tabellen 3.30 und 3.31 des Anhang 3 Häufigkeitsverteilungen der Humusformen und der Waldbestockung, die an den zu der jeweiligen Substratgruppe zugeordneten Profilen angetroffen wurden.

Wie insbesondere bei Betrachtung der Boxplots deutlich wird, weisen die ökochemischen Charakteristika der einzelnen Ausgangssubstratgruppen meist sehr große Spannen auf, die sich in der Regel deutlich überlappen. Weite Spannen sind auch in den Ausgangssubstratgruppen zu beobachten, die hinsichtlich ihres geologischen Untergrundes sehr homogen sind, wie z.B. die Gruppen 3, 6, 9 und 10. Dies dürfte im wesentlichen auf der auch innerhalb der einzelnen Gruppen noch sehr hohen Variabilität in der Mineralausstattung und auf den z.B. durch Unterschiede in Exposition, Hanglage und Nutzungsgeschichte sehr verschiedenen Bodenentwicklungsbedingungen der einzelnen Standorte der Substrate beruhen. Zu berücksichtigen ist aber auch, daß die vorliegenden Daten aus unterschiedlichen, mehr oder minder lang zurückliegenden Erhebungen stammen. Unplausibel erscheinende Daten konnten daher nur sehr schwer überprüft werden. Insbesondere Extremwerte sind daher mit Unsicherheiten behaftet. Demzufolge wurde zur nachfolgenden Charakterisierung der einzelnen Substratgruppen vor allem der Bereich häufiger Werte um den Median zwischen dem 25er- und 75er-Perzentil herangezogen.

Die ökochemische Bewertung der Untersuchungsbefunde erfolgte im wesentlichen nach den von MEIWES et al. (1984) aufgeführten Kriterien zur Beurteilung der Elastizität von Böden hinsichtlich Säuretoxizität und Nährelementbereitstellung und nach den im Entwurf (14.06.1994) der 5. Auflage der Forstlichen Standortsaufnahme enthaltenen Bewertungsrahmen für den chemischen Bodenzustand und den Nährstoffgehalt. Da diese Kriterien auch zur Bewertung der Befunde der bundesweiten Waldbodenzustandserhebung (BZE) und teilweise auch der europaweiten Bodenzustandserhebung herangezogen werden, ist eine Vergleichbarkeit der hiesigen Untersuchung mit diesen großräumigen Erhebungen gewährleistet.

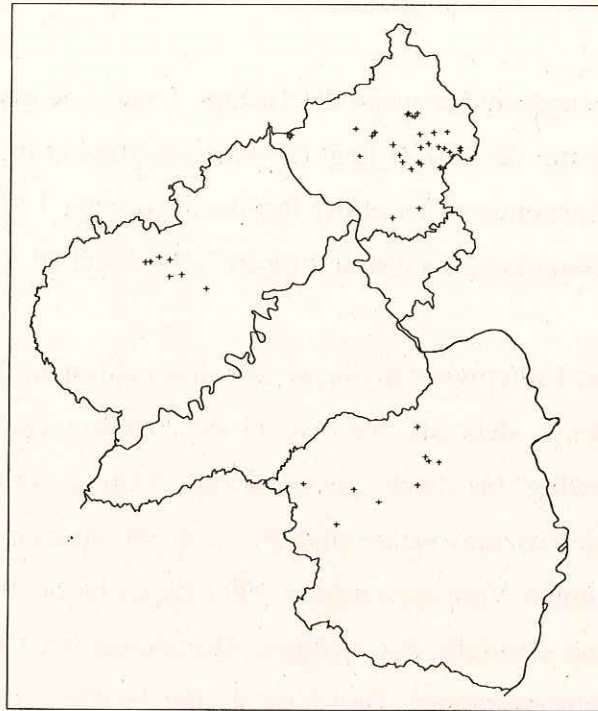
¹ Der Begriff „Versauerungsfront“ kennzeichnet die Umkehrzone hoher Sättigung mit Kationsäuren in eine hohe Sättigung des Austauschers mit Kationbasen (vgl. ULRICH und MALESSA 1989)

Gruppe 1: Lehmige Substrate basischer Vulkanite

Diese Gruppe umfaßt Verwitterungslehme aus Basalt, in geringem Umfang auch aus Melaphyr und Diabas. Zum Teil ist das autochthone Material durch allochthone Decklehme überlagert. Zwei Drittel der 52 Profile dieser Gruppe befinden sich im Westerwald und im angrenzenden Mittelsieg-Bergland, die übrigen im Saar-Nahe-Berg- und Hügelland sowie in der Ost- und Westeifel (Karte 4.1).

Mineralogisch bestehen die Gesteine im wesentlichen aus Plagioklasen (Labradorit), Pyroxenen (Augit), Amphibolen und Olivineinsprenglingen. Die Anteile an Fe, Mg und Ca sind verhältnismäßig hoch. Durch Verwitterung sind große Teile der Basalte und der Basalttuffe zu

smektitreichen Tonen umgewandelt worden, die den Bodenbereich über den basischen Vulkaniten prägen. Smektiten enthalten ebenfalls hohe Anteile an basischen Kationen.



Karte 4.1: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 1

Die $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte der dieser Substratgruppe zugeordneten Profile sind im oberen Mineralboden meist dem Aluminiumpufferbereich, im mittleren Mineralboden meist dem Austauscherpufferbereich und im unteren Mineralboden jeweils zur Hälfte dem Austauscherpufferbereich und dem Silikatpufferbereich zuzuordnen.

Die effektive Kationenaustauschkapazität (AKe) ist im allgemeinen hoch (25- bis 75-Perzentilbereich, oberer Mineralboden 111 - 176, mittlerer Mineralboden 72 - 210 und unterer Mineralboden 104 - 309 $\mu\text{mol IÄ/g}$). Die Basensättigung ist mit einigen wenigen Ausnahmen im mittleren und unteren Mineralboden hoch. So erreichen im mittleren Mineralboden 75 % der Profile eine Basensättigung über 40 %, im unteren Mineralboden sogar eine Basensättigung von über 90 %. Im oberen Mineralboden weisen aber immerhin 25 % der Profile geringe Basensättigungen von unter 20 % auf.

In allen Tiefenbereichen liegt eine hohe bis sehr hohe Magnesiumsättigung des Kationenaustauschers vor. Die 25er-Perzentile betragen 4,4 % im oberen Mineralboden, 10,1 % im mittlere-

ren und 24 % im unteren Mineralboden und liegen damit an der Spitze aller 16 Substratgruppen.

Demgegenüber weist die Gruppe 1 nur eine geringe Kaliumsättigung auf. An mehr als drei Viertel der Profile liegt die Kaliumsättigung im mittleren und unteren Bodenbereich unter 2 %, an einem Viertel der Profile sogar unter 1 % und ist damit geringer als die der ansonsten basenärmeren Substratgruppen 7, 9, 15 und 16.

Die Kaliumvorräte liegen allerdings aufgrund der hohen AKe deutlich über dem Gesamtkollektiv. Mehr als drei Viertel der Profile weist mit über 400 kg K/ha bis 90 cm Tiefe als „mäßig“ bis „hoch“ einzuordnende Kaliumvorräte auf.

Die Kalziumvorräte sind mit wenigen Ausnahmen hoch bis sehr hoch. An 75 % der Profile wurden Vorräte von über 4000 kg Ca/ha bis 90 cm Tiefe ermittelt. Die Magnesiumvorräte sind ebenfalls mit wenigen Ausnahmen hoch bis sehr hoch und liegen an der Spitze aller Substratgruppen. Drei Viertel aller Profile verfügen über Magnesiumvorräte von über 1400 kg/ha (bis 90 cm Mineralbodentiefe).

Der Stickstoffvorrat befindet sich mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 5800 bis 10800 kg N/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe im mittleren Bereich.

Die Phosphorvorräte im Mineralboden liegen überwiegend zwischen 1900 und 7400 kg/ha (25- bis 75-Perzentilbereich; bis 90 cm Mineralbodentiefe). Sie sind damit im Vergleich zu anderen Substratgruppen relativ hoch.

Die Versauerungsfront befindet sich an mehr als drei Viertel der Profile innerhalb der obersten 60 cm des Mineralbodens, bei zehn Probenorten allerdings bereits tiefer als 120 cm.

Die erhebliche Differenzierung im Versauerungsstatus der Profile dieser Substratgruppe dürfte im wesentlichen in Art und Mächtigkeit der allochthonen Deckschichten begründet sein. Sofern stärkermächtige Deckschichten dem autochthonen Verwitterungsmaterial aufgelagert sind, dürfte die Pufferfähigkeit gegenüber Säurebelastungen vermindert und die Versauerung bereits weiter fortgeschritten sein. Sollte das basische Vulkangestein dagegen bis unmittelbar unterhalb der Oberfläche anstehen, ist von sehr hohen Basengehalten und nur geringer Versauerungsausprägung auszugehen.

An zwei Dritteln der Bodenprofile dieser Ausgangssubstratgruppe waren Mineralbodenhumusformen (L-Mull bis mullartiger Moder), an den übrigen Moderhumusformen (feinhumusarmer Moder bis rohhumusartiger Moder) anzutreffen. Die ungünstigeren Humusformen dürften auf diesem basenreichen Ausgangssubstrat im wesentlichen mit dem Nadel-

holzanbau zu begründen sein. Immerhin sind ein Drittel der beprobten Standorte dieser Ausgangssubstratgruppe mit Nadelholz (nahezu ausschließlich Fichte) bestockt.

Gruppe 2: Lehmige Substrate saurer und intermediärer Vulkanite

In dieser Gruppe sind Verwitterungslehme aus Porphyrit sowie jeweils einige Profile aus Andesit, Trachyt und Phonolith zusammengefaßt. Vier Fünftel der 32 Profile liegen im Wuchsgebiet Saar-Nahe-Berg- und Hügelland und dort vor allem im Glan-Alsenz-Berg- und Hügelland (Karte 4.2).

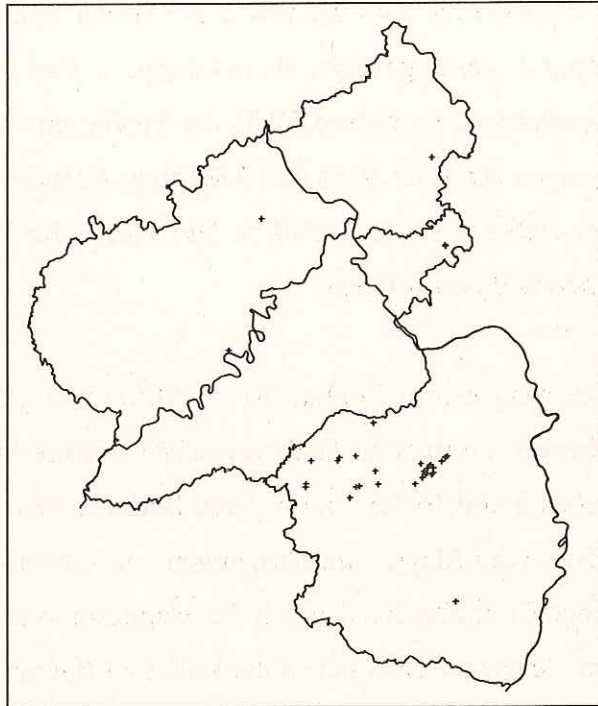
Mineralogisch bestehen die sauren Vulkanite aus Quarz, Kalifeldspat, Plagioklas, Biotit, seltener Hornblende oder Pyroxen. Intermediäre Vulkanite enthalten gegenüber sauren deutlich weniger Quarz bei höheren Feldspat- (Kalifeldspat und Plagioklas) und Hornblendeanteilen.

Die sauren und intermediären Vulkanite

unterscheiden sich von den basischen durch höhere SiO_2 -Gehalte, bei entsprechend niedrigeren Anteilen an Ca, Mg und Fe. Bei der Verwitterung können zwar auch, wie bei den basischen Vulkaniten, nährstoffreiche Smektite entstehen, die allerdings, sofern überhaupt vorhanden, seltener auftreten. Der SiO_2 -Gehalt verändert sich unter den gegebenen pedoklimatischen Bedingungen bei der Verwitterung kaum, so daß auch der Verwitterungslehm der sauren bis intermediären Vulkanite Si-reicher ist als der der basischen Vulkanite. Je höher der Si-Anteil eines Gesteins ist, umso langsamer verläuft die Verwitterung, so daß saure Vulkanite langsamer verwittern als intermediäre und diese wiederum langsamer als basische.

An etwas mehr als der Hälfte der Beprobungsorte wurden Mineralbodenhumusformen, ansonsten Moderhumusformen angetroffen. Da an 44 % der Probenorte Nadelholzbestände stocken, dürfte auch hier der überraschend hohe Anteil von ungünstigen Humusformen aus der nicht an den Standort angepaßten Bestockung resultieren.

Die pH-Werte liegen in dieser Gruppe, wie zu erwarten, etwas niedriger als in Gruppe 1. Im obersten Mineralboden reichen sie deutlich in den Eisen-Aluminium-Pufferbereich hinein. Im mittleren und unteren Mineralbodenbereich dominieren pH-Werte im Aluminium- und Aus-



Karte 4.2: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 2

tauscherpufferbereich; der Silikatpufferbereich wird nur bei etwa einem Fünftel der Profile erreicht.

Die effektive Kationenaustauschkapazität ist merklich geringer als bei Gruppe 1. Im mittleren Tiefenbereich weist die Hälfte der Profile eine AKe von $< 65 \mu\text{mol IÄ/g}$ auf. Die Basensättigung ist etwas geringer als in Gruppe 1, aber insgesamt meist noch als hoch bis sehr hoch zu bezeichnen. So weisen 50 % der Profile im mittleren und unteren Mineralboden Basensättigungen von über 50 % auf. Allerdings liegt das 25-Perzentil im Tiefenbereich 2 bei 12 % und im Tiefenbereich 3 bei 14 %. Ein Viertel der Profile verfügt demnach nur über eine unzureichende Basensättigung.

Die Magnesiumsättigung ist im Mittel weniger als halb so groß als in Gruppe 1. Dennoch überwiegen in allen Tiefenbereichen mittlere bis hohe Magnesiumsättigungen (Mediane zwischen 5 und 16 %). Im mittleren Bodenbereich wurden allerdings an etwas mehr als 25 % der Profile mit Magnesiumsättigungen von < 2 teilweise auch < 1 % nur eine geringe bis sehr geringe Elastizität hinsichtlich der Magnesiumversorgung ermittelt.

Im Gegensatz dazu liegen die Kaliumsättigungen deutlich höher als in Gruppe 1 und meist im Bereich mittlerer bis hoher Elastizität hinsichtlich der Kaliumversorgung (Mediane zwischen 3,4 und 2,3 %). Die Kaliumvorräte sind in der Gruppe 2 allerdings aufgrund der deutlich geringeren AKe niedriger als in der Gruppe 1. Mit einem Median von 284 kg K/ha bis 90 cm Tiefe dürfte mehr als die Hälfte der Profile in dieser Gruppe in den Bereich sehr geringer bis geringer Kaliumvorräte im Wurzelraum einzuordnen sein. Allerdings weisen ein Viertel der Profile auch hohe bis sehr hohe Kaliumwerte auf. Die Vorräte an austauschbarem Kalzium sind zwar deutlich niedriger als in Gruppe 1, aber dennoch überwiegend als „mittel“ bis „sehr hoch“ zu bezeichnen (Median: 2000 kg/ha, 75 Perzentil 12600 kg/ha; jeweils bis 90 cm Mineralbodentiefe). Mit einem 25-Perzentilwert von nur 321 kg/ha ist der Kalziumvorrat an einem Viertel der Profile allerdings auch nur „gering“.

Die Magnesiumvorräte sind ebenfalls sehr deutlich geringer als in der Gruppe der basischen Vulkanite. Auffällig ist ein deutlicher Sprung zwischen dem Median (245 kg Mg/ha bis 90 cm Tiefe) und dem 75-Perzentil (3062 kg Mg/ha). Die Magnesiumvorräte sind demnach in der Hälfte der Profile sehr gering bis gering, an der anderen Hälfte dagegen hoch bis sehr hoch.

Der Stickstoffvorrat der 34 Profile dieser Substratgruppe variiert erheblich. Der 25- bis 75-Perzentilbereich erstreckt sich von 2000 bis 7200 kg N/ha bis 90 cm Tiefe. Ein Viertel der Standorte erwiesen sich mit Stickstoffvorräten von unter 2 t N/ha bis 90 cm Tiefe als ausge-

sprochen stickstoffarm. Auch die Phosphorvorräte sind in dieser Gruppe deutlich niedriger als in Gruppe 1. Ein Viertel der Profile weist mit unter 600 kg P/ha bis 90 cm Tiefe auffällig niedrige P-Vorräte auf.

Die Versauerungsfront verläuft bei der Hälfte der Profile oberhalb von 60 cm, bei einem Drittel allerdings auch bereits unter 120 cm bzw. unterhalb der Beprobungstiefe.

Auch in dieser Gruppe dürfte die starke ökochemische Differenzierung von der Ausprägung allochthoner Deckschichten und darüberhinaus vom SiO₂-Gehalt des autochthonen Vulkan-
gesteins abhängen.

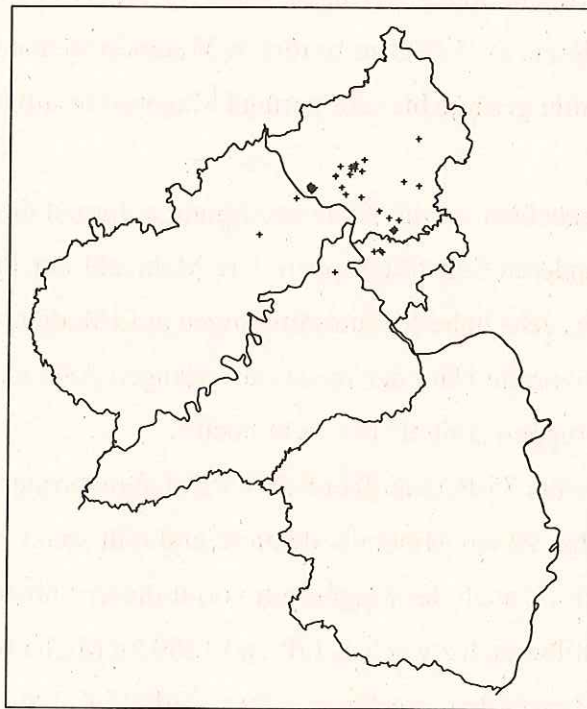
Gruppe 3: Substrate aus Bims

Dieser Ausgangssubstratgruppe wurden Profile mit Bimsüberschüttungen überwiegend auf Tonschiefer, Tonschieferverwitterungslehmen und Decklehmen im Westerwald und im Taunus zugeordnet (Karte 4.3).

Bimssteine sind hochporöse Laven (natürliche Schaumgläser, Gesteinsgläser), die bevorzugt aus sauren und intermediären Gesteinsschmelzen entstanden sind. Daher besteht ein unmittelbarer Zusammenhang zu den Gesteinen der Gruppe 2 (saure und intermediäre Vulkanite). Bims wird von Verwitterungs-Agentien schneller an-

gegriffen als die entsprechenden, kristallisierten Minerale, deren hyalines Äquivalent sie darstellen. Da der Bims teilweise nur mit einer Mächtigkeit von wenigen Dezimetern auftritt, spielt das darunterliegende Verwitterungsmaterial bzw. Ausgangsgestein je nach Mächtigkeit des Bims eine wichtige Rolle.

An vier Fünfteln der 45 Profile dieser Substratgruppe wurden Mineralbodenhumusformen angetroffen.



Karte 4.3: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 3

Die pH-Wert-Verteilung liegt etwa in der Mitte zwischen der beiden vorgenannten Gruppen. Im oberen Mineralboden dominieren pH-Werte im Aluminiumpufferbereich, im unteren Mineralboden im Austausch- und Silikatpufferbereich.

Vermutlich aufgrund der grusigen Beschaffenheit des anstehenden Bimsmaterials ist die AKe vor allem im mittleren und tieferen Mineralboden im allgemeinen niedriger als in Gruppe 2. Die Basensättigung weist einen sehr starken Tiefengradienten auf. Während im unteren Mineralboden hohe bis sehr hohe Basensättigungen von meist deutlich über 50 % vorherrschen, verfügt der obere und mittlere Mineralbodenbereich an etwa der Hälfte der Profile mit unter 20 % nur eine geringe Basensättigung. An einem Viertel der Profile sind in diesem Bereich Basensättigungen von unter 12 % zu finden.

Auch die Magnesiumsättigung des Austauschers zeigt einen starken Tiefengradienten. Im unteren Mineralboden verfügen etwa 90 % der Profile über eine hohe bis sehr hohe Magnesiumsättigung (> 5 %), im mittleren Mineralbodenbereich weisen dagegen mehr als die Hälfte der Profile geringe bis sehr geringe Magnesiumsättigungen auf (Median: 1,9 %).

Demgegenüber ist die Kaliumsättigung aufgrund des Kaliumreichtums des Bims höher als in allen anderen Substratgruppen. Die Mehrzahl der Profile weist in allen drei Tiefenbereichen hohe bis sehr hohe Kaliumsättigungen auf (Median > 4 %). Dementsprechend fallen auch die Kaliumvorräte trotz der meist nur geringen AKe an drei Viertel der Standorte in die Bewertungsgruppen „mittel“ bis „sehr hoch“.

Der 25- bis 75-Perzentilbereich des Kalziumvorrates erstreckt sich von knapp 800 auf 5900 kg Ca/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe und fällt somit in die Bewertungsgruppen mittel bis hoch. Ähnlich ist auch der Magnesiumvorrat dieser Substratgruppe einzuwerten, dessen 25- bis 75-Perzentilbereich zwischen 170 und 1200 kg Mg/ha bis 90 cm Tiefe liegt.

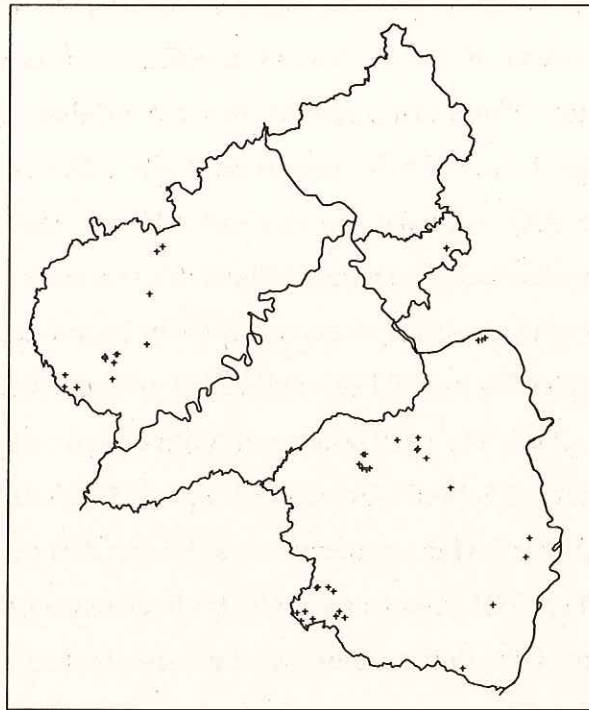
Die Bimsböden verfügen über auffällig hohe Stickstoffvorräte. Der 25- bis 75-Perzentilbereich erstreckt sich von 8600 bis 15400 kg N/ha bis 90 cm Bodentiefe.

Der Phosphor-Vorrat liegt mit 1400 bis 4200 kg P/ha bis 90 cm Tiefe (25- bis 75-Perzentilbereich) zwischen den P-Vorräten der beiden erstgenannten Gruppen.

Die Versauerungsfront verläuft an zwei Dritteln der Standorte oberhalb 60 cm Bodentiefe, also noch innerhalb des Hauptwurzelbereichs der Waldbäume.

Gruppe 4: Substrate aus carbonathaltigem Material

Diese Gruppe umfaßt Terrae calcis und Verwitterungslehme aus devonischem Massenkalk, Muschelkalk, Mergelkalk und Mergelton, carbonathaltige Lehme und Tone über permischen Sandsteinen, Schluffsteinen und Tonsteinen sowie carbonathaltige Sande des Tertiärs und des Keupers. Die Hälfte der 40 Profile dieser Ausgangssubstratgruppe liegt auf der Westricher Hochfläche des Wuchsgebietes Saarländisch-Pfälzisches Muschelkalkgebiet und dem Glan-Alsenz-Berg- und Hügelland. Die übrigen verteilen sich auf das Bitburger Gutland, die Westeifel, den Taunus, die Vorderpfälzische Rheinebene und das Rhein Hessisch-Pfälzische Tafel- und Hügelland (Karte 4.4).



Karte 4.4: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 4

Die wichtigsten Minerale dieser Substratgruppe sind Calcit und Dolomit. Als Tonminerale treten hauptsächlich Smektite auf.

Die wichtigsten Minerale dieser Substratgruppe sind Calcit und Dolomit. Als Tonminerale treten hauptsächlich Smektite auf.

Trotz des basenreichen Ausgangssubstrats wurden an einem Drittel der Profile Nadelholzbestände angetroffen.

Drei Viertel der untersuchten Standorte weisen Mineralbodenhumusformen auf.

Die pH-Werte reichen im oberen und mittleren Mineralboden vom Aluminium- bis zum Carbonatpufferbereich. Der untere Mineralboden befindet sich bis auf wenige Ausnahmen im Carbonatpufferbereich.

Die effektive Kationenaustauschkapazität weist eine extreme Spanne auf. So erstreckt sich der 25- bis 75-Perzentilbereich im mittleren Mineralboden von 68 bis 334 $\mu\text{mol IÄ/g}$. Vor allem im unteren Mineralboden sind die Austauschkapazitäten überwiegend hoch bis sehr hoch.

Die Basensättigung ist mit wenigen Ausnahmen in allen Tiefenbereichen sehr hoch. Sie überschreitet an allen Profilen im tieferen Mineralboden 50 %, meist liegt sie dort bei 100 %.

Die Magnesiumsättigung ist meist mittel bis sehr hoch. Die 25-Perzentile liegen im oberen und mittleren Mineralboden bei 5 bzw. 6 %. Im tieferen Mineralboden ist allerdings eine Rei-

he von Profilen mit nur geringen Magnesiumsättigungen zu finden. Dies ist möglicherweise auf eine übermäßige Belegung des Austauschers mit Kalzium zurückzuführen. Aus dem gleichen Grund dürfte die Kaliumsättigung als überwiegend gering bis sehr gering einzustufen sein. Im tieferen Mineralboden liegen die Kaliumsättigungen an mehr als der Hälfte der Profile unter 1 %. Beim Kaliumvorrat ergibt sich dagegen ein anderes Bild. Verbunden mit der hohen AKe sind die Vorräte mit 840 bis 1800 kg K/ha bis 90 cm Tiefe (25- bis 75-Perzentilbereich) überwiegend hoch bis sehr hoch.

Der Vorrat an austauschbarem Kalzium ist auf den Kalkstandorten naturgemäß hoch bis sehr hoch. Der 25- bis 75-Perzentilbereich erstreckt sich von 13800 bis 57200 kg Ca/ha bis 90 cm Tiefe. Auch die austauschbaren Magnesiumvorräte sind mit wenigen Ausnahmen hoch bis sehr hoch (25- bis 75-Perzentilbereich: 1600 bis 10500 kg Mg/ha bis 90 cm Tiefe).

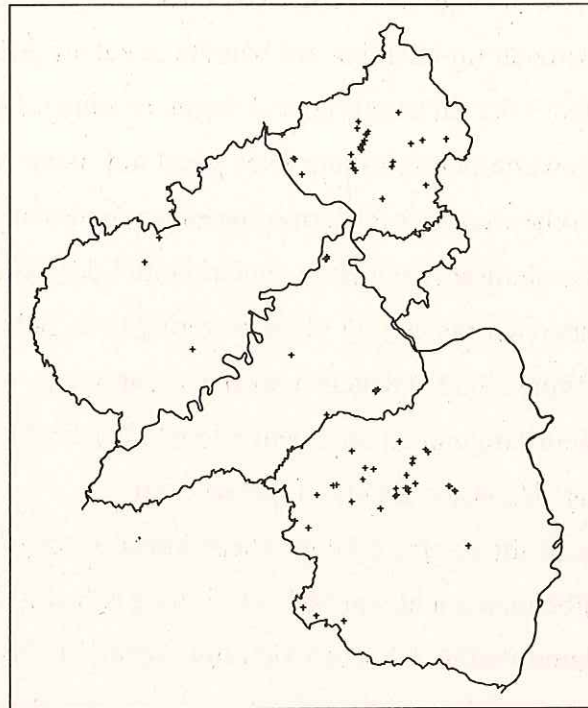
Der 25- bis 75-Perzentilbereich des Stickstoffvorrates beläuft sich auf 4100 bis 11000 kg N/ha bis 90 cm Tiefe und ist als mittel bis hoch einzuwerten. Das 10er-Perzentil ist mit 1,6 t/ha sehr niedrig. Dies dürfte allerdings im wesentlichen auf die Flachgründigkeit einiger Standorte zurückzuführen sein.

Der Phosphorvorrat ist mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich zwischen 2300 und 4300 kg P/ha sehr hoch.

Die Versauerungsfront liegt mit sehr wenigen Ausnahmen oberhalb von 60 cm Tiefe.

Gruppe 5: Lehmige Substrate aus/über Schluffsteinen, Schiefer-ton, Ton

Diese Gruppe setzt sich überwiegend aus Deck- und Verwitterungslehmen über/aus tertiären Tonen vor allem im Westerwald, nicht tektonisch überprägten Tonen, Ton- und Schluffsteinen des Perms im Saar-Nahe-Berg- und Hügelland sowie aus Abtragungsmaterial intermediärer Vulkanite des Saar-Nahe-Beckens zusammen (Karte 4.5). Die Böden dieser Substratgruppe verfügen über einen verhältnismäßig hohen Tonmineralgehalt, wobei allerdings nährstoffärmere Tone (Kaolinite) vorherrschen.



Karte 4.5: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 5

Die Humusform reicht an den 75 Profilen dieser Substratgruppe vom Mull bis zum Rohhumus. An knapp mehr als der Hälfte der Profile wurden Mineralbodenhumusformen angetroffen, aber bereits an 11 der 75 Profile rohhumusartiger Moder und Rohhumus. An etwa der Hälfte der Profile stockt Nadelholz, überwiegend Fichte. An den mit laubholzbestockten Standorten dominieren Eichenbestände.

Die pH-Werte der Profile dieser Substratgruppe liegen im oberen und mittleren Mineralbodenbereich überwiegend im Eisen-Aluminium- und im Aluminium-Pufferbereich, im unteren Mineralboden im Aluminium- und Austausch-Pufferbereich. Die effektive Kationenaustauschkapazität ist mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 75 bis 121 $\mu\text{mol IÄ/g}$ im Oberen, 51 bis 72 $\mu\text{mol IÄ/g}$ im mittleren und 74 bis 127 $\mu\text{mol IÄ/g}$ im unteren Mineralbodenbereich überwiegend als „mittel“ zu bewerten.

An knapp der Hälfte der Standorte ist im oberen Mineralbodenbereich und an fast drei Vierteln der Standorte im mittleren Mineralbodenbereich die Basensättigung nur gering ($< 20\%$). Demgegenüber konnten im unteren Mineralbodenbereich drei Viertel der Standorte mit Basensättigungen über 40 % den Stufen „mittel“ bis „hoch“ zugeordnet werden.

Die Sättigung des Austauschers mit austauschbaren Protonen und austauschbarem Eisen (XSH + XSFe) zeigt bei Werten von über 2 bis 5 % in humusarmen Horizonten eine sehr geringe Elastizität im Hinblick auf Säuretoxizität an (MEIWES et al. 1984). In den Tiefenbereichen 2 und 3 der Substratgruppe 5 waren an einem Drittel bis der Hälfte der Standorte dieser Schwellenwerte überschritten. Dies weist auf akute Versauerungsvorgänge und eine weitgehende Erschöpfung der Puffermechanismen in diesen Profilen hin.

Die Magnesiumsättigung ist an einem Drittel der Standorte dieser Gruppe im mittleren Mineralbodenbereich nur gering bis sehr gering (< 2 % bzw. < 1 %), an fast allen Standorten im unteren Mineralboden dagegen hoch bis sehr hoch.

Die Kaliumsättigung ist an einem Viertel aller Profile mit unter 2 % in allen Tiefenbereichen als gering, ansonsten als mittel zu bewerten.

Auch die Kaliumvorräte fallen überwiegend in den Bereich mittel bis hoch; der 25- bis 75-Perzentilbereich reicht von 560 bis 1370 kg K/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe.

Die Kalziumvorräte bewegen sich mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 1200 bis 6100 kg Ca/ha ebenfalls meist im mittleren bis hohen Bereich. Die Magnesiumvorräte sind mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 700 bis 2700 kg sogar überwiegend als hoch bis sehr hoch zu bezeichnen.

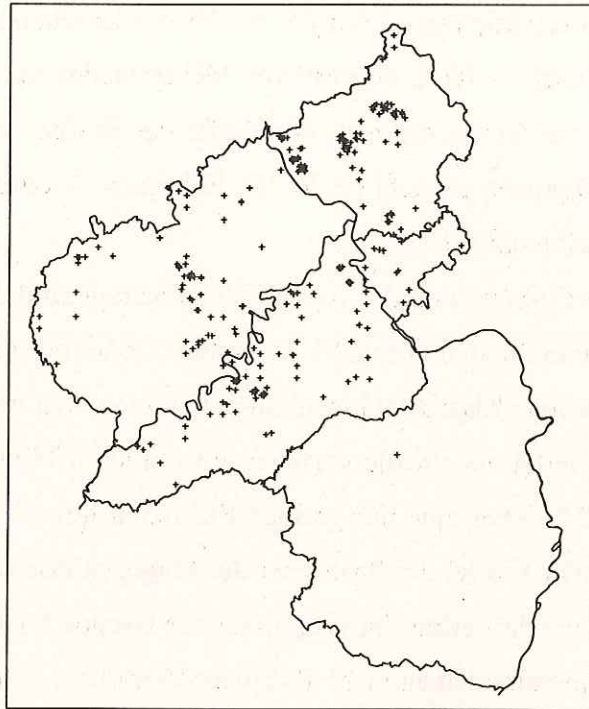
Die N-Vorräte liegen überwiegend zwischen 4500 und 9000 kg N/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe und damit im mittleren Bereich. Jeweils 10 % der Profile weisen geringe bzw. hohe N-Vorräte auf.

Die P-Vorräte sind mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 1300 bis 3000 kg P/ha überdurchschnittlich hoch.

Die Versauerungsfront verläuft bei einem Drittel der Profile noch oberhalb von 60 cm Mineralbodentiefe, d.h. noch innerhalb des Hauptwurzelschichtes der Bäume. An nahezu der Hälfte der Profile dieser Substratgruppe liegt die Versauerungsfront allerdings bereits unter 120 cm Tiefe bzw. unterhalb der Beprobungstiefe.

Gruppe 6: Lehmige Substrate aus/über Tonschiefer und Tonschiefer mit Grauwackewechselagerungen des Rheinischen Schiefergebirges

In dieser Gruppe sind Deck- und Verwitterungslehme über/aus Tonschiefer und Tonschiefer mit Grauwackewechselagerungen des Rheinischen Schiefergebirges zusammengefaßt. Die geologischen Ausgangsgesteine dieser Gruppe stammen aus dem Paläozoikum. Im Gegensatz zu den Ausgangsgesteinen der Gruppe 5, die lediglich diagenetisch verfestigt sind, sind die Ausgangsgesteine der Gruppe 6 tektonisch überprägt, d.h. die Schichten sind gefaltet und die Tonsteine grundsätzlich geschiefert (Tonschiefer).



Karte 4.6: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 6

Die 250 Profile dieser Gruppe sind über den gesamten rheinland-pfälzischen Teil des Rheinischen Schiefergebirges verteilt (Karte 4.6).

Die Humusform reicht wie in der vorstehend besprochenen Gruppe von Mull bis Rohhumus mit Schwerpunkt bei Moderhumusformen. An mehr als der Hälfte der Profile stockt Fichte, an einem Drittel Laubholz, wobei davon zu jeweils einem Drittel Buche, Eiche und sonstiges Laubholz vertreten ist.

Die pH-Werte weisen auf eine bereits weit fortgeschrittene Versauerung der Standorte dieser Gruppe hin. Der obere Mineralboden befindet sich überwiegend im Eisen-Aluminium-Pufferbereich (75-Perzentil des $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$: 3,8). An einigen Profilen reicht der pH-Wert sogar in den Eisenpufferbereich hinein. Der mittlere und untere Mineralbodenbereich liegt überwiegend im Aluminiumpufferbereich (25- bis 75-Perzentilbereich: pH 3,8 bis 4,0 bzw. 3,9 bis 4,2).

Die effektive Kationenaustauschkapazität ist mit 25- bis 75-Perzentilbereichen von 70 bis 130 $\mu\text{mol IÄ/g}$ im oberen Mineralboden, 50 bis 70 $\mu\text{mol IÄ/g}$ im mittleren Mineralboden und 40 bis 70 $\mu\text{mol IÄ/g}$ im unteren Mineralboden als gering bis mittel zu bezeichnen. Vor allem der

untere Mineralboden verfügt demnach über eine deutlich geringere Austauschkapazität als in der vorgenannten Gruppe.

Die Basensättigung ist mit 25- bis 75-Perzentilbereichen von 9 bis 23 % im oberen Mineralboden und 6 - 10 % im mittleren Mineralboden nur gering. Im Gegensatz zur Gruppe 5 werden nur an etwas mehr als der Hälfte der Profile im unteren Mineralboden ausreichende Basensättigungen erreicht (> 20 %). Bei einem Viertel der Profile liegt sie auch in diesem Tiefenbereich unter 10 %.

Die H+Fe-Sättigung des Austauschers beträgt an der Hälfte der Profile im mittleren und unteren Mineralboden über 2 %, an einem Viertel der Profile sogar über 5 %. Dies weist auf eine sehr geringe Elastizität hinsichtlich Säuretoxizität und auf akute Versauerungsvorgänge hin.

Drei Viertel der Profile verfügen im mittleren Mineralboden mit Magnesiumsättigungen von unter 2 % über eine nur geringe Elastizität hinsichtlich der Magnesiumversorgung. An mehr als einem Viertel der Profile ist die Magnesiumsättigung in diesem Tiefenbereich mit unter 1 % sogar sehr gering. Im Gegensatz zur Gruppe 5 ist die Magnesiumausstattung auch im unteren Mineralboden an mehr als einem Viertel der Standorte nur sehr schwach.

Auch die Kaliumsättigung ist an der Hälfte der Profile im oberen und mittleren Mineralbodenbereich nur gering. Hohe Kaliumausstattungen von über 4 bis 8 % finden sich nur an einem Zehntel der Profile.

Dementsprechend sind auch die Kaliumvorräte mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 230 bis 580 kg K/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe nur gering bis mäßig. An nahezu einem Viertel der Profile fallen die Kaliumvorräte in die Gruppe „sehr gering“.

Auch die Kalziumvorräte sind mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 190 bis 940 kg Ca/ha nur als gering bis mäßig, an mehr als einem Viertel der Profile sogar als nur sehr gering zu bezeichnen.

Das gleiche gilt für die Magnesiumvorräte, deren 25- bis 75-Perzentilbereich von 50 bis 410 kg Mg/ha reicht.

Die Basenvorräte der Gruppe 6 stellen sich demnach deutlich schwächer dar als die der vorstehend genannten Gruppen.

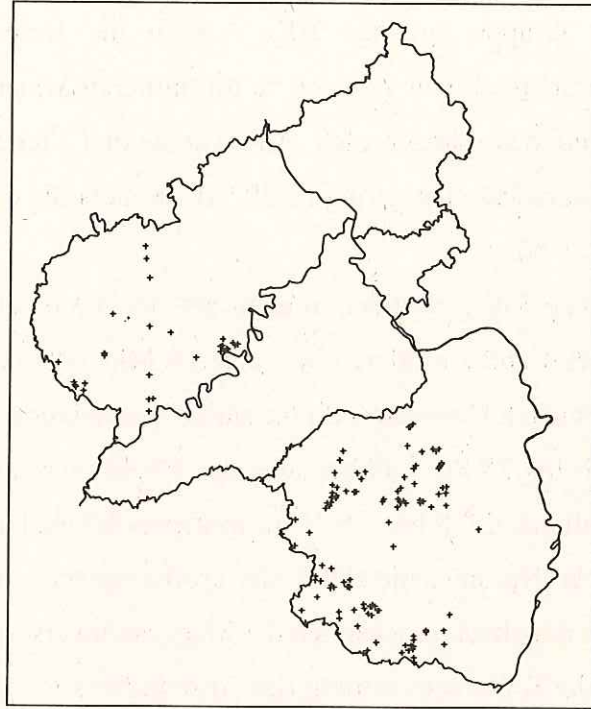
Die Stickstoffvorräte liegen mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 5300 bis 9300 kg/ha im mittleren Bereich. Das 90er Perzentil erreicht allerdings 12700 kg/ha. Dies deutet daraufhin, daß eine Reihe von Standorten über hohe N-Vorräte verfügt.

Die P-Vorräte liegen mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 650 bis 2050 kg P/ha bis 90 cm Tiefe etwa im Durchschnitt des Gesamtkollektivs.

An zwei Dritteln der Profile lag die Versauerungsfront unterhalb von 120 cm Mineralbodentiefe bzw. unterhalb der Beprobungstiefe. Auch dies zeigt, daß in dieser Substratgruppe die Versauerung meist weit fortgeschritten ist.

Gruppe 7: Sandige und lehmige Substrate aus/über Sandstein

Zu dieser Gruppe gehören Böden, die aus Sandsteinen vornehmlich des Oberen und Unteren Buntsandsteins sowie des Perms entstanden sind. Böden aus Mittlerem Buntsandstein wurden dagegen einer gesonderten Gruppe (Ausgangssubstratgruppe 9) zugeordnet. Da die Sandsteine des Oberen und Unteren Buntsandsteins sowie des Perms häufig mit Schluff- und Tonsteinen wechsellagern, sind die Böden häufig lehmiger als die, die auf Sandsteinen des Mittleren Buntsandsteins anstehen. Die Mineralgarnitur der Böden der Gruppe 7 besteht



Karte 4.7: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 7

besteht größtenteils aus Quarz neben geringeren Anteilen an Feldspäten. Als Tonminerale treten vornehmlich Vermiculite, Chlorite, Illite und Kaolinite auf. Im Saar-Nahe-Becken können basische Vulkanite den Mineralgehalt positiv beeinflussen.

80 % der erfaßten 134 Profile dieser Substratgruppe befinden sich im Pfälzerwald, dort vor allem im Wasgau und im nördlichen Pfälzerwald, auf der Westlicher Hochfläche und im Saar-Nahe-Berg- und Hügelland. Die übrigen Profile verteilen sich auf das Moseltal, das Gutland und die West- und Osteifel (Karte 4.7).

58 % der dieser Substratgruppe zugeordneten Bodenprofile weisen Mineralbodenhumusformen auf. Nur an einem Zehntel der Standorte wurden rohhumusartiger Moder und Rohhumus festgestellt. Das vergleichsweise häufige Vorkommen von günstigen Humusformen dürfte im wesentlichen auf die Bestockung zurückzuführen sein. Mehr als die Hälfte der Stichprobepunkte weist eine Laubholzbestockung vornehmlich mit Buche und in erheblichem Umfang auch mit Eiche auf.

Der Mineralboden ist demgegenüber deutlich versauert. Über alle drei Tiefenbereiche hinweg überwiegen pH-Werte im Eisen-Aluminium-Pufferbereich. 10 % der Standorte entfallen im Oberboden bereits auf den Eisenpufferbereich.

Die effektive Kationenaustauschkapazität ist in dieser Substratgruppe überwiegend merklich schwächer als in allen vorstehend beschriebenen Gruppen. Mit 25- bis 75-Perzentilbereichen von 20 bis 50 $\mu\text{mol IÄ/g}$ im mittleren und tieferen Mineralboden fällt die Hälfte der Standorte in die Gruppe „geringe AKe“. Auch die Basensättigung ist mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 7 bis 16 % im mittleren Mineralboden und von 8 bis 30 % im unteren Mineralboden sehr schwach. An mehr als drei Viertel der Standorte ist die Basensättigung im Hauptwurzelbereich gering ($< 20\%$), an mehr als einem Viertel der Standorte sogar sehr gering ($< 7\%$).

Die H+Fe-Sättigung liegt an mehr als einem Viertel der Standorte im nicht mehr stärker humusbeeinflussten mittleren und unteren Mineralbodenbereich über 2 %. Auch hieraus lassen sich demnach Hinweise auf eine starke Versauerung dieser Standorte ableiten.

Die 25- bis 75-Perzentilbereiche der Magnesiumsättigung betragen 2,4 bis 6,8 % im oberen Mineralboden, 0,8 bis 2,6 % im mittleren Mineralboden und 1,1 bis 11 % im unteren Mineralboden. Nur etwa die Hälfte der Profile weisen zumindest im Unterboden noch eine ausreichende Elastizität hinsichtlich der Magnesiumversorgung auf.

Auch die Kaliumausstattung des Austauschers ist sehr schwach. Etwa ein Viertel der Profile liegen in allen Tiefenbereichen im Bereich geringer bis sehr geringer Elastizität (Kaliumsättigung $< 2\%$). Dementsprechend sind auch die Kaliumvorräte mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 200 bis 610 kg/ha nur gering bis mäßig, an einem Viertel der Standorte sogar nur sehr gering. Das gleiche gilt auch für die Kalziumvorräte, die mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 170 bis 765 kg ebenfalls nur schwach sind.

Der 25- bis 75-Perzentilbereich der Magnesiumvorräte reicht von 30 bis 220 kg Mg/ha und zeigt damit ebenso nur eine sehr geringe bis mäßige Magnesiumbevorratung an.

Im Vergleich zu den 6 vorstehend beschriebenen Gruppen hebt sich die Ausgangssubstratgruppe 7 vor allem durch wesentlich geringere Basenanteile am Austauscher des tieferen Mineralbodens und durch geringere Vorräte an Nährstoffkationen ab.

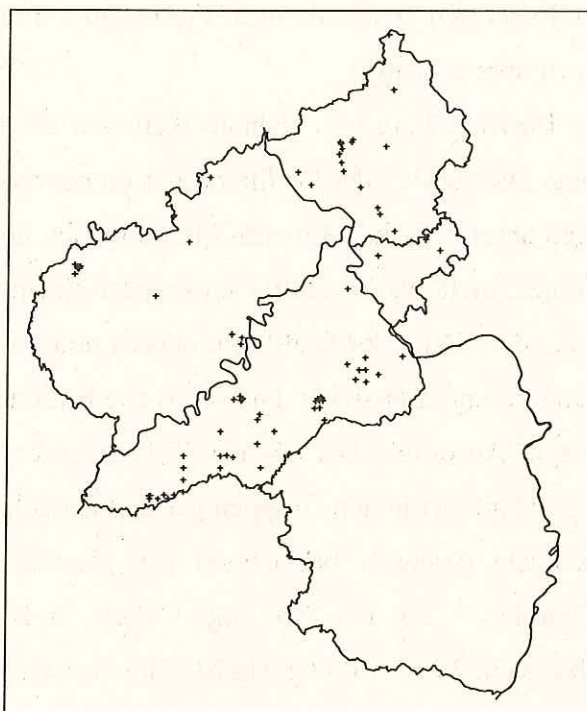
Die Stickstoffvorräte im Mineralboden bis 90 cm Tiefe sind mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 2700 bis 5900 kg N/ha überwiegend als gering bis mittel zu bezeichnen. Hohe Vorräte ($> 10\text{ t/ha}$) wurden nur an einem Zehntel der Standorte festgestellt.

Die Phosphorvorräte liegen mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 1000 bis 2000 kg P/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe in etwa im Durchschnitt des Gesamtkollektivs.

An vier Fünfteln der Standorte liegt die Versauerungsfront bereits unterhalb von 120 cm Mineralbodentiefe bzw. unterhalb der Beprobungstiefe. Auch dies zeigt die weitfortgeschrittene Versauerung der Mehrzahl der Standorte dieser Substratgruppe an.

Gruppe 8: Sandige und lehmige Substrate aus/über Sandstein, Grauwacke und sonstige quarzreiche Substrate innerhalb des Rheinischen Schiefergebirges

Diese Gruppe enthält Deck- und Verwitterungslehme über/aus Grauwacken, devonischen Sandsteinen und devonischen Quarziten. Sie unterscheidet sich von Gruppe 6 vor allem durch den deutlich höheren Quarzanteil am Ausgangssubstrat der Bodenbildung. Mehr als die Hälfte der 92 erfaßten Profile dieser Substratgruppe befinden sich im Hunsrück und dort vor allem im Soonwald und im Hoch- und Idarwald. Die übrigen Profile verteilen sich auf die sonstigen Bereiche des rheinland-pfälzischen Teils des Rheinischen Schiefergebirges (Karte 4.8).



Karte 4.8: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 8

Zwei Drittel der dieser Gruppe zugeordneten Profile weisen eine ungünstige Auflagehumusform vom feinhumusreichen Moder bis zum Rohhumus auf. An der überwiegenden Zahl der Profile stocken Fichtenbestände und nur an knapp 30 % der Profile Laubholz.

Die 25- bis 75-Perzentilbereiche der pH_{CaCl_2} -Werte reichen im oberen Mineralboden von 3,1 bis 3,6, im mittleren Mineralboden von 3,8 bis 4,2 und im unteren Mineralboden von 3,9 bis 4,2. Die Oberböden befinden sich damit im wesentlichen im Aluminium-Eisen-Pufferbereich, der mittlere und untere Mineralboden im Aluminium-Pufferbereich.

Die effektive Kationenaustauschkapazität ist mit 25- bis 75-Perzentilbereichen von 87 bis 139 $\mu\text{mol IÄ/g}$ im oberen Mineralboden, 46 bis 65 $\mu\text{mol IÄ/g}$ im mittleren Mineralboden und 25 bis 64 $\mu\text{mol IÄ/g}$ im unteren Mineralboden den Gruppen gering bis mittel zuzuordnen.

Hinsichtlich der Basensättigung sind ein Viertel aller Profile dieser Gruppe als „sehr basenarm“ zu bezeichnen (Basensättigung $< 7\%$). Mehr als zwei Drittel der Profile weisen über den gesamten Mineralbodenbereich eine Basensättigung $< 20\%$ auf. Hinsichtlich der Basensättigung stellt sich diese Gruppe ungünstiger dar als alle übrigen 15 Gruppen.

Die weitfortgeschrittene Versauerung dieser Substratgruppe wird auch in der H+Fe-Sättigung deutlich. So weisen mehr als drei Viertel aller Profile im mittleren Mineralboden H+Fe-Sättigungen über 2% auf.

Auch die Bereitstellung von Nährstoffkationen aus dem Boden ist überwiegend gering bis sehr gering. Die Hälfte aller Profile besitzt im oberen und unteren Mineralboden Magnesiumsättigungen unter 2% . Im Mittleren Mineralboden liegen sogar drei Viertel aller Profile unter dieser Grenze, mehr als die Hälfte sogar unter einem Prozent. Auch die Kaliumsättigung fällt an mehr als der Hälfte der Profile im oberen und mittleren Mineralboden in die Gruppe sehr geringe und geringe Elastizität. Die schwache Kaliumausstattung kommt auch in den Kaliumvorräten zum Ausdruck. Der 25- bis 75-Perzentilbereich des Kaliumvorrates liegt zwischen 180 und 530 kg K/ha in den Gruppen gering bis mäßig. Mehr als ein Viertel der Kaliumvorräte sind als sehr gering zu bezeichnen. Das gleiche gilt für die Kalziumvorräte (25- bis 75-Perzentilbereich: 130 bis 770 kg Ca/ha) und die Magnesiumvorräte (25- bis 75-Perzentilbereich: 30 bis 300 kg Mg/ha), die überwiegend den Gruppen sehr gering bis mäßig zuzuordnen sind.

Insgesamt gesehen stellt sich die Gruppe 8 hinsichtlich der austauschbaren Basengehalte und -vorräte demnach ungünstiger dar als alle bisher charakterisierten Gruppen.

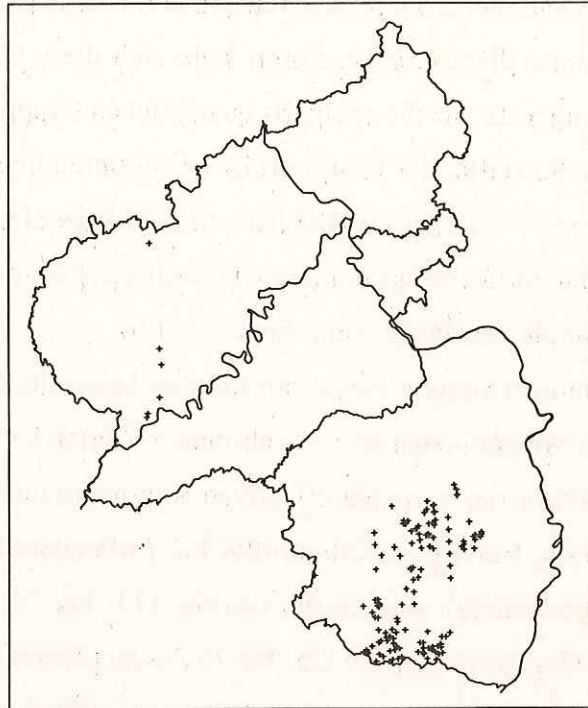
Die Stickstoffvorräte liegen überwiegend zwischen 5 und 9 t/ha (bis 90 cm Mineralbodentiefe) und damit im mittleren Bereich. Hohe Vorräte von über 10 t N/ha sind selten.

Die Phosphorvorräte liegen mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 690 bis 1760 kg P/ha etwas unter dem Durchschnitt des Gesamtkollektivs.

An mehr als vier Fünfteln der Profile verläuft die Versauerungsfront unter 120 cm Mineralbodentiefe bzw. unterhalb der Beprobungstiefe. Auch dies zeigt die weit fortgeschrittene Versauerung der überwiegenden Anzahl der dieser Substratgruppe zugeordneten Standorte an.

Gruppe 9: Sandige Substrate aus/über Mittlerem Buntsandstein

Substrate aus Mittlerem Buntsandstein spielen als Waldstandorte in Rheinland-Pfalz eine besondere Bedeutung. Daher wurden diese Substrate einer gesonderten Ausgangssubstratgruppe zugeordnet. Die Mineralbodenhorizonte enthalten neben dem quarzreichen Ausgangssubstrat des Sandsteins sehr häufig noch nährstoffreichere äolische Sedimente unterschiedlicher Mächtigkeit, die die Elastizität der Böden hinsichtlich Säuretoxizität und Nährelementversorgung erheblich beeinflussen können.



Karte 4.9: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 9

138 der 145 Profile dieser Substratgruppe befinden sich im Pfälzerwald. Die übrigen liegen im Nördlichen Oberrheinischen Tiefland, auf der Westlicher Hochfläche, im Landstuhler Bruch, im Moseltal sowie in der Eifel (Karte 4.9).

An den dieser Substratgruppe zugeordneten Profilen wurden die Humusformen Mull, Moder und Rohhumus zu etwa gleichen Anteilen festgestellt. Zu etwa zwei Dritteln stockt an den Profilen Nadelholz, überwiegend Kiefer; an etwa einem Drittel der Profile steht Laubholz, etwa zur Hälfte Buche und Eiche.

Die pH-Wert-Verteilung ähnelt sehr stark derjenigen der ebenfalls quarzreichen Substratgruppen 7 und 8. Der obere Mineralboden befindet sich im Eisen-Aluminium-Pufferbereich, der mittlere und untere Mineralboden im Aluminiumpufferbereich.

Die effektive Kationenaustauschkapazität ist vor allem im unteren Mineralboden, der im wesentlichen nicht durch äolische Beimengungen beeinflusst ist, mit 7 bis 13 $\mu\text{mol IÄ/g}$ nur sehr gering. In dieser Hinsicht stellt sich diese Substratgruppe deutlich ungünstiger dar als alle vorangehend besprochenen Gruppen.

Die Basensättigung weist in allen drei Tiefenbereichen 25- bis 75-Perzentile von 7 bis 25 % auf. Nur 10 % der Standorte verfügen im mittleren Mineralboden über Basensättigungen von über 20 %.

Die H+Fe-Sättigung beträgt an etwas mehr als der Hälfte der Standorte im mittleren Mineralbodenbereich über 2 %. Im unteren Mineralboden erreichen allerdings weniger als ein Viertel der Standorte diese Grenze. Damit stellt sich diese Gruppe hinsichtlich dieses Merkmals etwas günstiger dar als die ebenfalls quarzreichen Gruppen 7 und 8.

Mehr als die Hälfte der Profile weist im mittleren und unteren Mineralbodenbereich nur eine sehr geringe Elastizität im Hinblick auf die Magnesiumbereitstellung auf. Mehr als drei Viertel der Standorte verfügt in diesen Tiefenbereichen über Magnesiumsättigungen von mehr als 2 %, mehr als die Hälfte von weniger als 1 %.

Die Kaliumversorgung ist nur im tieferen Mineralboden überwiegend mittel, im oberen und mittleren Mineralboden an mehr als einem Viertel der Standorte dagegen gering ($< 2\%$).

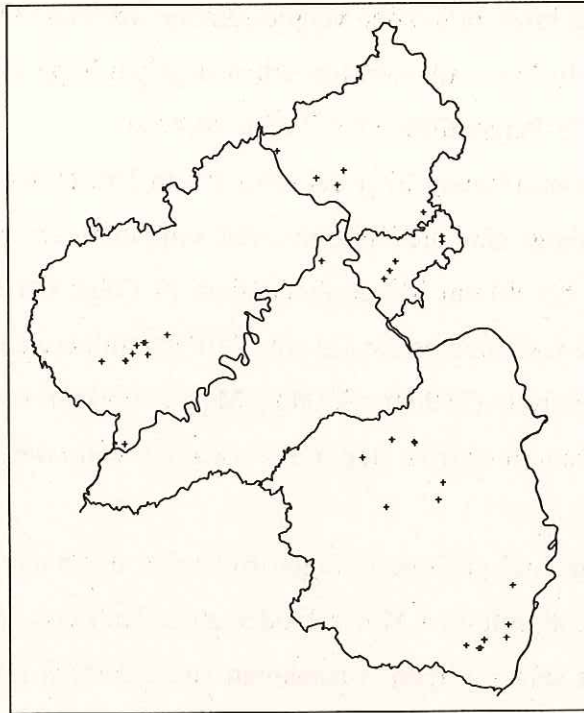
Aufgrund der nur geringen effektiven Kationenaustauschkapazität auch im tieferen Mineralboden sind die Vorräte an Kalium (25- bis 75-Perzentilbereich: 120 bis 230 kg K/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe), die Kalziumvorräte (25- bis 75-Perzentilbereich: 90 bis 210 kg Ca/ha) und die Magnesiumvorräte (25- bis 75-Perzentilbereich: 14 bis 41 kg Mg/ha) überwiegend als „sehr gering“ einzuwerten. Diese Nährstoffvorräte sind meist nur halb bis ein Drittel so hoch wie die bereits sehr niedrigen Vorräte der Vergleichsgruppen 7 und 8.

Die Stickstoffvorräte sind mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 1800 bis 4200 kg N/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe sehr gering bis gering. Auch die Phosphorvorräte liegen mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 530 bis 1200 kg P/ha deutlich unter dem Durchschnitt des Gesamtkollektivs.

Die Versauerungsfront verläuft bei allen Profilen ohne Ausnahme unterhalb von 120 cm Mineralbodentiefe bzw. unterhalb der Beprobungstiefe. Auch dies zeigt, daß die Böden dieser Substratgruppe nur eine geringe Elastizität hinsichtlich Bodenversauerung besitzen.

Gruppe 10: Löße und in situ teilentbaste Löße

Dieser Ausgangssubstratgruppe wurden 28 Profile aus Löß und in situ teilentbastem Löß zugeordnet. Sie liegen vor allem in der Vorderpfälzischen Rheinebene, im Glan-Alsenz-Berg- und Hügelland, Bitburger-Gutland, Mittelrheintal, Taunus und Niederwesterwald (Karte 4.10). Die Mächtigkeit der Lößauflagen und der Grad ihrer Entbasung kann stark variieren. Bei der Feldaufnahme der Profile wurde das darunterliegende, anstehende Ausgangsgestein oft nicht erfaßt. Wichtige Minerale sind Calcit und Dolomit. Als Tonminerale treten hauptsächlich



Karte 4.10: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 10

Smektite auf. Die Löße sind im Oberboden zumeist entkalkt. Da Smektite eine hohe Kationenaustauschkapazität besitzen, ist auch in solchen Böden aber noch eine vergleichsweise gute Nährstoffbereitstellung zu erwarten.

Zwei Drittel der dieser Substratgruppe zugeordneten Profile weisen Mineralbodenhumusformen (Mull und mullartiger Moder) auf. Ebenfalls an zwei Dritteln der Standorte herrscht Laubholzbestockung, überwiegend Buche, vor.

Im oberen und mittleren Mineralboden weisen mehr als die Hälfte der Standorte pH-Werte im Aluminiumpufferbereich auf. Der untere Mineralboden befindet sich dagegen überwiegend im Silikat- und Carbonatpufferbereich (25- bis 75-Perzentilbereich $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$: 4,5 bis 7,5).

Die effektive Kationenaustauschkapazität ist im oberen und mittleren Mineralboden mittel, im unteren Mineralboden mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 100 bis 500 $\mu\text{mol IÄ/g}$ mittel bis sehr hoch.

Die Basensättigung ist an einem Viertel der Standorte im oberen und mittleren Mineralboden mit unter 20 % nur gering, im unteren Mineralboden allerdings mit einer Ausnahme mit deutlich über 50 % hoch bis sehr hoch.

Knapp ein Viertel der Standorte verfügen im mittleren Mineralboden über eine nur geringe Elastizität hinsichtlich der Magnesiumbereitstellung (Magnesiumsättigung $< 2\%$).

Im unteren Mineralboden herrschen dagegen hohe bis sehr hohe Magnesiumsättigungen vor (25- bis 75-Perzentilbereich: 2,8 bis 20,4 %).

Die Kaliumsättigung liegt bei etwa einem Drittel der Standorte im Bereich geringer Elastizität, allerdings sind die Kaliumvorräte mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 900 bis 1750 kg K/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe in Folge der hohen AKe meist mittel bis sehr hoch.

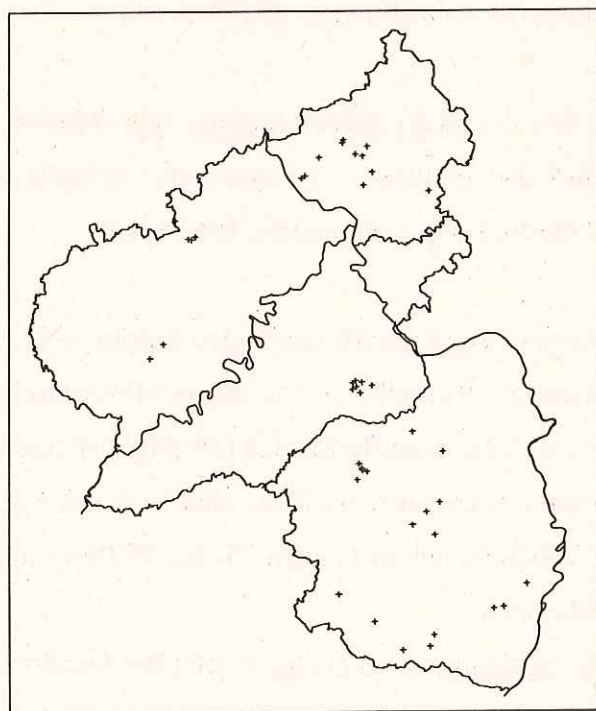
Auch die Kalziumvorräte (25- bis 75-Perzentilbereich: 9400 bis 53000 kg Ca/ha) und die Magnesiumvorräte (2100 bis 3500 kg Mg/ha) sind mit sehr wenigen Ausnahmen sehr hoch.

Die Versauerungsfront liegt mit Ausnahme von zwei Profilen oberhalb von 60 cm Mineralbodentiefe.

Die Löße sind nach den obigen Befunden demnach teilweise bereits entbast und weisen im oberen und mittleren Mineralboden auch deutliche Anzeichen von Versauerung auf, verfügen aber mit sehr wenigen Ausnahmen zumindestens im unteren Mineralboden noch über hohe Basensättigungen und hohe Basenvorräte.

Gruppe 11: Decklehme größerer Mächtigkeit, minderer Beeinflussung durch das darunterliegende geologische Ausgangsgestein

Diese Gruppe umfaßt starkmächtige Decklehme, bei denen im durchwurzelbaren Bereich kein wesentlicher Einfluß des autochthonen Ausgangsgesteins zu erkennen war. In der Regel wurde hier bis Schürftiefe das Ausgangsgestein nicht erreicht. Im Gegensatz zu Gruppe 10 sind diese Decklehme carbonatfrei. Die Entstehung solcher starkmächtigen allochthonen Decklagen ist an die im Periglazial vorherrschenden solifluidalen Prozesse gebunden. Sie sind ein heterogenes Gemenge aus anstehendem Gestein, präquartären und interglazia-



Karte 4.11: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 11

len Bodenrelikten, Vulkanaschen und äolischen Einwehungen, die sich immer wieder durchmischt haben und das Ausgangssubstrat der holozänen Böden bilden. Verbreitung und Mächtigkeit sind bevorzugt an erosionsgeschützte Lagen gebunden (z.B. konkave Unterhang- und Muldenbereiche). Die 42 Profile dieser Substratgruppe verteilen sich auf nahezu alle Wuchsgebiete des Landes (Karte 4.11).

Die an den Profilen angetroffene Humusform reicht vom Mull bis zum Rohhumus, wobei ein Drittel der Profile günstige Humusformen aufweisen. Zwei Drittel der beprobten Standorte sind mit Nadelholz, überwiegend Fichte bestockt.

Die 25- bis 75-Perzentilbereiche der $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte liegen im oberen Mineralboden zwischen 3,3 und 3,8, im mittleren Mineralboden zwischen 3,7 und 4,0 und im unteren Mineralboden zwischen 3,8 und 4,6. Der obere Mineralboden ist somit dem Eisen-Aluminium-Pufferbereich, der mittlere dem Aluminium-Pufferbereich und der untere überwiegend dem Aluminium- und dem Austauscher-Pufferbereich zuzuordnen.

Die effektive Kationenaustauschkapazität liegt überwiegend im mittleren Bereich (60 bis 120 $\mu\text{mol IÄ/g}$).

Nahezu drei Viertel der Standorte dieser Ausgangssubstratgruppe weisen im mittleren Mineralboden eine sehr niedrige und niedrige Basensättigung auf (25- bis 75-Perzentilbereich: 8 bis 21 %). Der untere Mineralboden verfügt allerdings an mehr als drei Vierteln der Standorte über eine mittlere bis sehr hohe Basensättigung (25- bis 75-Perzentilbereich: 30 bis 93 %).

H+Fe-Sättigungen von über 2 % treten im mittleren Mineralboden an etwas mehr als der Hälfte der Profile auf und weisen auf akute Versauerung dieser Standorte hin.

Im oberen und mittleren Mineralboden zeigt etwa ein Drittel der Standorte eine nur geringe Elastizität hinsichtlich der Magnesiumversorgung (Magnesiumsättigung < 2%). Im unteren Mineralboden verfügen die Böden dagegen mit wenigen Ausnahmen über eine hohe bis sehr hohe Elastizität hinsichtlich der Magnesiumversorgung.

Die Kaliumsättigung liegt an etwa einem Viertel der Profile in allen Tiefenbereichen unterhalb von 2 %. Allerdings sind die Kaliumvorräte mit einem 25- bis 75-Perzentil von 500 bis 1300 kg K/ha im allgemeinen mittel bis hoch. Das gleiche gilt auch für die Kalziumvorräte (25- bis 75-Perzentil: 1100 bis 7900 kg Ca/ha) und die Magnesiumvorräte (25- bis 75-Perzentil: 465 bis 2200 kg Mg/ha).

Die Versauerungsfront liegt an einem Drittel der Standorte noch oberhalb von 60 cm Mineralbodentiefe, an der Hälfte der Standorte aber bereits unterhalb von 120 cm Tiefe bzw. unterhalb der Beprobungstiefe.

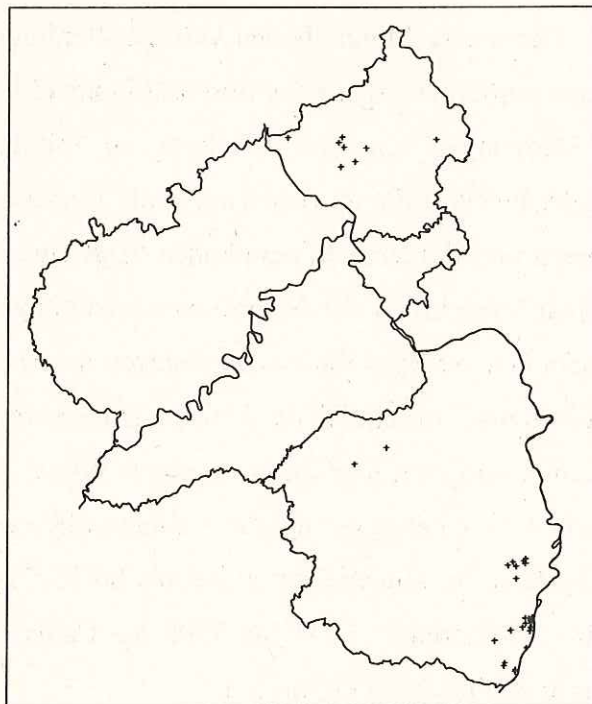
Die Standorte dieser Substratgruppe zeigen demnach im oberen und mittleren Mineralboden bereits deutliche Versauerungsmerkmale und Basenverarmung. Allerdings ist die Basensättigung im unteren Mineralboden überwiegend noch verhältnismäßig hoch. Dies dürfte auf den hohen Anteil an Pseudogleyen in dieser Substratgruppe zurückzuführen sein. Nahezu drei Viertel der 42 Profile weisen Sd-Horizonte auf. Diese reduzieren die Tiefenversickerung und damit auch den Austrag von im Oberboden freigesetzten Kationbasen. Sehr häufig zeigt sich daher oberhalb von Sd-Horizonten eine vergleichsweise hohe Basensättigung (vgl. auch BLOCK et al. 1991).

Die Stickstoffvorräte liegen mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 4500 bis 7200 kg N/ha auf mittlerem Niveau. Auch die Phosphorvorräte bewegen sich mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 1100 bis 2700 kg P/ha in der Nähe des Durchschnitts des Gesamtkollektivs.

Gruppe 12: Auelehme, Schwemmlöse und carbonathaltige Fluß- und Bachablagerungen

Böden dieser Gruppe treten im wesentlichen in den Rheinauen, der Vorderpfälzischen Rheinebene und im Niederwesterwald auf (Karte 4.12). Als Humusform wurde an den 35 Profilen dieser Substratgruppe ganz überwiegend Mull angetroffen. Die Bestockung besteht nahezu ausschließlich aus Laubholz, überwiegend aus Edellaubholzbeständen.

Die pH-Werte liegen mit 25- bis 75-Perzentilbereichen von 4,3 bis 7,5 im oberen Mineralboden, 4,9 bis 7,5 im mittleren Mineralboden und 5,6 bis 7,8



Karte 4.12: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 12

im unteren Mineralboden günstiger als in allen anderen Substratgruppen. Die Böden dieser Substratgruppe befinden sich demnach überwiegend im Silikat- und Carbonatpufferbereich. Die 25- bis 75-Perzentilbereiche der effektiven Kationenaustauschkapazität reichen von 60 bis über 500 $\mu\text{mol IÄ/g}$ und sind als mittel bis sehr hoch einzuwerten. Die Böden der Gruppe 12 weisen demnach neben der Gruppe 4 die höchsten Kationenaustauschkapazitäten aller Substratgruppen auf.

Die Basensättigung liegt in allen Tiefenbereichen ausnahmslos über 20 % und an drei Viertel der Profile auch im oberen und mittleren Mineralboden mit Werten über 70 % im hohen bis sehr hohen Bereich.

Die Magnesiumsättigung dieser Substratgruppe weist in allen Tiefenbereichen eine große Spanne auf. In der Mehrzahl der Profile ist die Magnesiumsättigung in allen Tiefenbereichen aber hoch. Allerdings sind auch einige Profile mit geringer Magnesiumsättigung von unter 2 % vertreten. Dies dürfte auf die übermäßige Dominanz des Kalziums in diesen Böden zurückzuführen sein. Die Kalziumsättigung liegt nämlich an mehr als einem Viertel der Profile in allen Tiefenbereichen über 95 %.

Eine überhohe Kalziumsättigung dürfte auch die Ursache der überwiegend geringen Kalium-sättigung der Böden dieser Substratgruppe sein. An mehr als drei Viertel der Profile ist die Kaliumsättigung in allen Tiefenbereichen als gering bis sehr gering einzustufen. Demgegenüber sind die Kaliumvorräte aufgrund der allgemein sehr hohen effektiven Kationenaustauschkapazität mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 300 bis 780 kg K/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe zumeist der Gruppe „mittel“ zuzuordnen.

Die Kalziumvorräte sind mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 12400 bis 114000 kg Ca/ha sehr hoch. Auch die Magnesiumvorräte liegen mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 825 bis 2090 kg Mg/ha hoch.

Die Versauerungsfront verläuft nahezu ausschließlich in den obersten 60 cm des Mineralbodens. Die Substrate der Ausgangssubstratgruppe 12 zeigen demnach insgesamt nur eine sehr geringe Versauerung und mit Ausnahme von Kalium eine hohe bis sehr hohe Ausstattung mit Kationbasen.

Die Stickstoffvorräte dieser Substratgruppe liegen im mittleren bis hohen Bereich (25- bis 75-Perzentilbereich: 5900 bis 13700 kg N/ha). 10 % der Standorte weisen Stickstoffvorräte von über 20 t N/ha auf. Auch die Phosphorvorräte sind mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 2000 bis 4200 kg P/ha deutlich überdurchschnittlich.

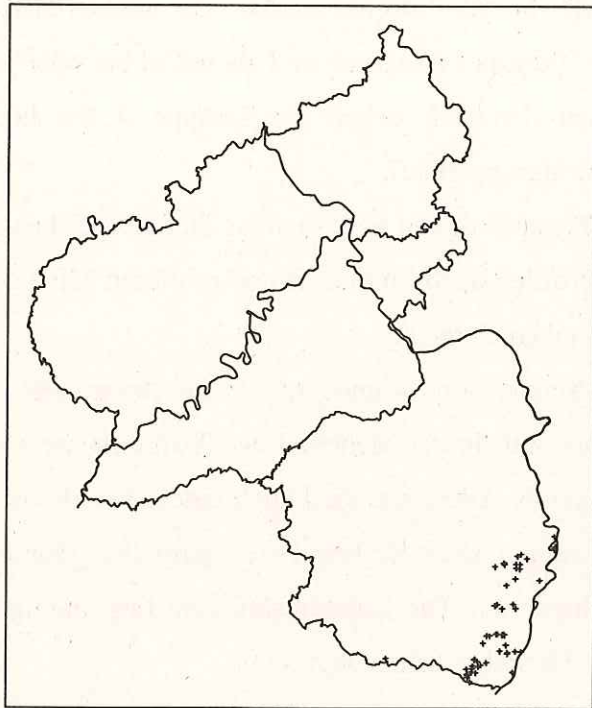
Gruppe 13: Überwiegend carbonatfreie Sedimente pleistozäner Terrassen und holozäner Hochflutablagerungen

Die dieser Gruppe zugeordneten Profile befinden sich ausschließlich in der Vorderpfälzischen Rheinebene und in den Rheinauen (Karte 4.13). An der überwiegenden Anzahl der Profile wurden als Humusform Mull sowie bessere Moderhumusformen angetroffen. Zwei Drittel der Standorte sind mit Laubholzbeständen bestockt.

Im oberen und mittleren Mineralboden entfallen mehr als ein Viertel der Standorte auf den Aluminiumpufferbereich. An der Hälfte der Standorte sind die pH-Werte dem Silikat- und Carbonatpuffer zuzuordnen.

Auch die effektive Kationaustauschkapazität erstreckt sich mit 25- bis 75-Perzentilen von 45 bis 243 $\mu\text{mol IÄ/g}$ im oberen Mineralboden, 32 bis 163 $\mu\text{mol IÄ/g}$ im mittleren Mineralboden und 21 bis 158 $\mu\text{mol IÄ/g}$ im unteren Mineralboden von gering bis hoch. Auch die Basensättigung reicht von gering bis sehr hoch. An mehr als einem Viertel der Profile liegt sie im oberen und mittleren Mineralboden unter 20 %, im unteren Mineralboden dagegen mit wenigen Ausnahmen weit über 50 %.

Auch die Magnesiumsättigung weist eine sehr große Spanne auf (25- bis 75-Perzentilbereich oberer Mineralboden 2,3 bis 10,8 %, mittlerer Mineralboden 1,4 bis 13 %, unterer Mineralboden 5,3 bis 18,9 %). Geringe Magnesiumsättigungen dürften sowohl in versauerten Horizonten als auch in Horizonten mit übermäßiger Kalziumdominanz auftreten. Die Mehrzahl der Profile verfügt im unteren Mineralboden allerdings über eine hohe Magnesiumsättigung. Die Kaliumsättigung ist überwiegend gering bis sehr gering. Dies dürfte sowohl an versauerungsbedingten Kaliumverlusten als auch an der Kalziumdominanz einiger Horizonte liegen. Die Kaliumvorräte sind mit 270 bis 830 kg K/ha (25- bis 75-Perzentilbereich, bis 90 cm Mineralbodentiefe) überwiegend als gering bis mittel einzuwerten. Demgegenüber sind die Kalzium-



Karte 4.13: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 13

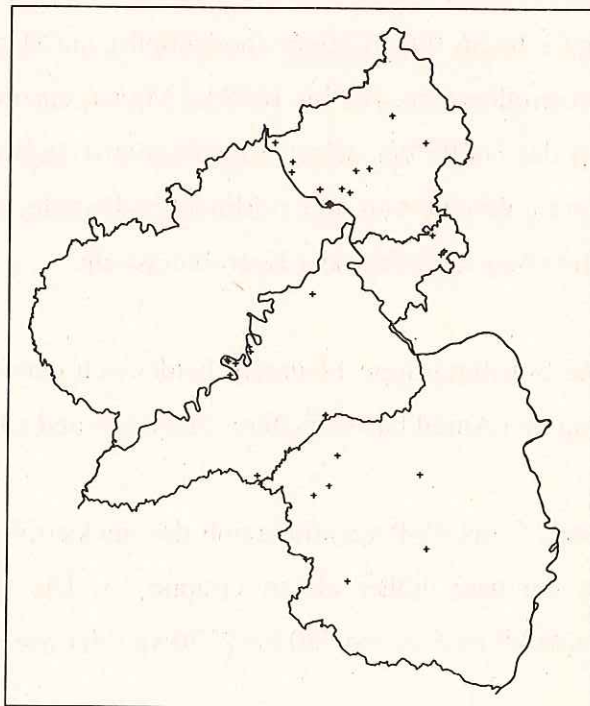
vorräte mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 6900 bis 31000 kg Ca/ha und die Magnesiumvorräte mit 770 bis 2900 kg Mg/ha meist hoch bis sehr hoch.

Hinsichtlich der Versauerung und der Basengehalte ist diese Substratgruppe sehr uneinheitlich. Einige Standorte zeigen bereits merkliche Versauerungsanzeichen im oberen und mittleren Mineralboden. Andere sind nach der chemischen Analyse auch im oberen und mittleren Mineralboden entgegen den Befunden der Feldansprache allem Anschein nach carbonathaltig und wären von daher der Gruppe 12 zuzuordnen.

Die Stickstoffvorräte sind mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 3000 bis 8800 kg N/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe überwiegend als gering bis mittel einzuwerten. Allerdings weisen mehr als 10 % der Standorte mit deutlich über 10000 kg N/ha bereits hohe Stickstoffvorräte auf. Die Phosphorvorräte sind mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 800 bis 1800 kg P/ha durchschnittlich.

Gruppe 14: Substrate der Terrassensedimente der Kerb- und Durchbruchtäler

Diese Gruppe umfaßt Sedimente in den relativ engen Tälern von Nahe, Mosel, Lahn und Rhein nördlich von Mainz sowie von Kerb- und Durchbruchtälern im Niederwesterwald und im Nordpfälzer Berg- und Hügelland (Karte 4.14). Ausgangsmaterial der Bodenbildung sind jeweils fluviatil transportierte und umgelagerte Substrate. Durch die jüngere Hebung des rheinischen Schiefergebirges können sich die Terrassensedimente bis über 100 m über der Talsohle befinden.



Karte 4.14: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 14

Die Humusform reicht an den 36 Profilen, die dieser Substratgruppe zugeordnet wurden, vom Mull bis zum Rohhumus, wobei der Anteil günstiger Humusformen geringer ist als bei Gruppe 13. An zwei Dritteln der Profile stockt Laubholz.

Die pH-Werte sind meist deutlich niedriger als bei Gruppe 13. An der Mehrzahl der Standorte liegt der Mineralboden im gesamten Profil im Aluminium- und Austauscherpufferbereich.

Die effektive Kationaustauschkapazität ist meist als gering bis mittel einzuwerten (25- bis 75-Perzentilbereich oberer Mineralboden 63 bis 143 $\mu\text{mol IÄ/g}$, mittlerer Mineralboden 36 bis 54 $\mu\text{mol IÄ/g}$, unterer Mineralboden 27 bis 88 $\mu\text{mol IÄ/g}$). Hohe Austauschkapazitäten wurden nur an wenigen Profilen angetroffen.

An mehr als der Hälfte der Profile liegt die Basensättigung im mittleren Mineralboden unter 20 %, an einem Viertel sogar unter 10 %. Im oberen und unteren Mineralboden weisen dagegen mehr als die Hälfte der Profile mittlere bis hohe Basensättigungen auf. An etwa einem Viertel der Profile lassen sich aus H+Fe-Sättigungen von deutlich über 2 % Hinweise auf akute Versauerung ableiten.

Die Magnesiumsättigungen sind nur im mittleren Mineralbodenbereich an knapp der Hälfte der Profile mit unter 2 % gering, sonst weit überwiegend mittel bis hoch.

Die Kaliumvorräte liegen an mehr als einem Viertel der Profile in allen Tiefenbereichen unter 2 %. Auch die Kaliumvorräte sind an einem Viertel der Profile nur gering, ansonsten mäßig bis mittel (25- bis 75-Perzentilbereich: 390 bis 875 kg K/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe).

Die Kalziumvorräte sind als mäßig bis sehr hoch (25- bis 75-Perzentilbereich: 560 bis 9600 kg Ca/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe), die Magnesiumvorräte als mäßig bis hoch (25- bis 75-Perzentilbereich: 162 bis 1870 kg Mg/ha) einzuwerten.

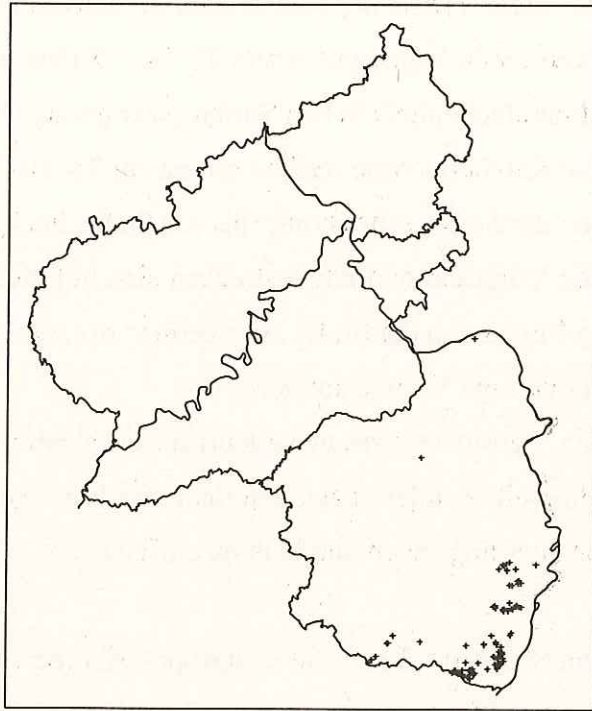
An der Hälfte der dieser Substratgruppe zugeordneten Standorte verläuft die Versauerungsfront unterhalb von 60 cm Mineralbodentiefe, an einem Drittel bereits unterhalb von 120 cm Tiefe bzw. unterhalb der Beprobungstiefe.

Die Substratgruppe 14 unterscheidet sich demnach von Gruppe 13 durch einen merklich geringeren Anteil basenreicherer Standorte und einer weiter fortgeschrittenen Versauerung.

Der 25- bis 75-Perzentilbereich der Stickstoffvorräte reicht von 4300 bis 11500 kg N/ha und ist demnach höher als in Gruppe 13. Die Phosphorvorräte sind mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 780 bis 2770 kg P/ha wie in Gruppe 13 durchschnittlich.

Gruppe 15: Sandige Substrate der Schwemmsandfächer

Diese Gruppe wird sehr einheitlich aus Profilen der Schwemmsandfächer der Pfälzerwaldbäche in der Vorderpfälzischen Rheinebene und im Wasgau gebildet (Karte 4.15). An den 85 Profilen dieser Substratgruppe waren etwa zu gleichen Anteilen Mull, Moder und Rohhumus anzutreffen. Die Bestockung besteht überwiegend aus Kiefer, gefolgt von Eiche.



Karte 4.15: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 15

Die pH-Werte sind meist sehr gering. Sie liegen mit 25- bis 75-Perzentilbereichen von 3,1 bis 3,5 im oberen Mineralboden, 3,6 bis 4,1 im mittleren Mineralboden und 3,7 bis 4,6 im unteren Mineralboden in den

oberen Horizonten im Eisen- und Eisen-Aluminium-Pufferbereich, in den mittleren und unteren Horizonten überwiegend im Aluminium- und Austauscherpufferbereich.

Die effektive Kationenaustauschkapazität ist durchweg schwach. Mehr als drei Viertel der Profile sind im mittleren Mineralboden hinsichtlich der Austauschkapazität als sehr gering und gering einzustufen. Im unteren Mineralboden gilt dies noch für mehr als die Hälfte der Profile.

Im oberen und mittleren Mineralboden weisen mehr als die Hälfte der Profile dieser Substratgruppe eine geringe bis sehr geringe Basensättigung auf (< 20 bzw. < 7 %). Im unteren Mineralboden verfügt dagegen mehr als die Hälfte der Profile über eine mittlere bis sehr hohe Basensättigung. Anscheinend wird an diesen Standorten im Tiefenbereich 3 das carbonathaltige Terrassensediment erreicht.

An mehr als einem Viertel der Standorte wurde eine H+Fe-Sättigung von über 2 % auch im mittleren und tieferen Mineralboden beobachtet. Dies deutet auf eine nur noch geringe Elastizität dieser Standorte hinsichtlich Säuretoxizität hin.

Die Magnesiumsättigung liegt im mittleren Mineralboden an mehr als der Hälfte der Standorte im Bereich geringer bis sehr geringer Elastizität (< 2 bzw. < 1 %). Im unteren Mineralboden ist dies nur für etwas mehr als ein Viertel der Standorte zutreffend.

Die Kaliumsättigung ist an mehr als der Hälfte der Profile im oberen Mineralboden und mehr als einem Viertel der Profile auch im unteren Mineralboden nur gering ($< 2\%$). Auch die Kaliumvorräte liegen mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 170 bis 470 kg K/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe in den Stufen „sehr gering“ bis „mäßig“.

Die Kalziumvorräte reichen mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 190 bis 4000 kg Ca/ha von der Stufe „sehr gering“ bis zur Stufe „hoch“.

Die Magnesiumvorräte erstrecken sich mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 30 bis 600 kg Mg/ha von der Stufe „sehr gering“ bis zur Stufe „mittel“, wobei etwa die Hälfte der Profile nur geringe Vorräte aufweist.

Die Versauerungsfront verläuft an etwa zwei Dritteln der Standorte unterhalb von 120 cm Mineralbodentiefe bzw. unterhalb der Beprobungstiefe. An einem Viertel der Standorte steht sie allerdings noch oberhalb 60 cm Tiefe an.

Die Standorte dieser Substratgruppe sind bereits deutlich versauert und an Nährstoffkationen verarmt. Noch etwas günstigere Verhältnisse finden sich allem Anschein nach an den Standorten, an denen carbonathaltiges Terrassenmaterial in wurzelerreichbarer Tiefe ansteht.

Die Stickstoffvorräte sind mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 2200 bis 4000 kg N/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe überwiegend als gering bis sehr gering einzustufen. Auch die Phosphorvorräte sind mit 900 bis 1800 kg P/ha (25- bis 75-Perzentilbereich) unterdurchschnittlich.

Gruppe 16: Flug- und Dünensande

Auch diese Gruppe ist von der Substratausstattung her sehr homogen. Sie besteht ausschließlich aus Flug- und Dünensanden in der Vorderpfälzischen Rheinebene (Karte 4.16). An 13 der 15 untersuchten Standorte dieser Substratgruppe stockt Kiefer. Als Humusform dominiert dort ein feinhumusreicher Moder.

Die $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte liegen im oberen Mineralboden im Eisen- und Eisen-Aluminium-Pufferbereich (90-Perzentil: pH 3,6). Der mittlere und untere Mineralboden befindet sich mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich zwischen 3,8 und 4,2 bzw. 3,9 und 4,3 überwiegend im Eisen-Aluminium und im Aluminium-Pufferbereich.

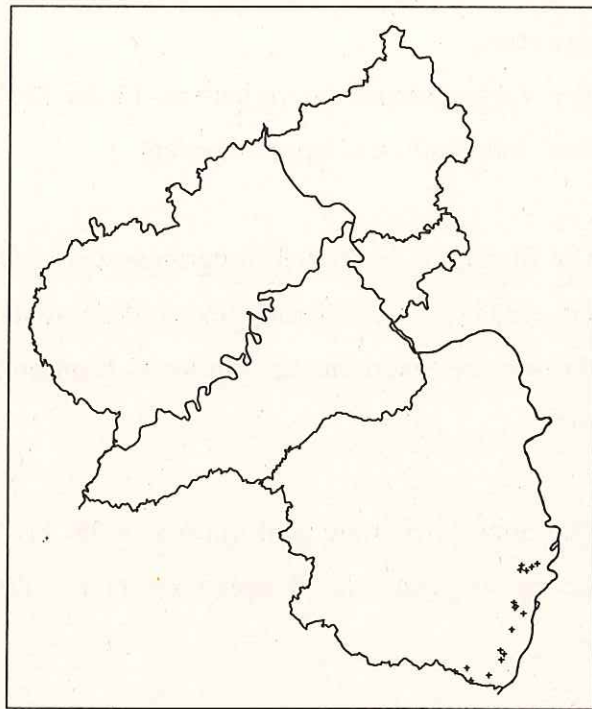
Die Austauschkapazität dieser Standorte ist durchweg gering. So liegt das 75-Perzentil im oberen Mineralboden bei $62 \mu\text{mol IÄ/g}$, im mittleren Mineralboden bei $25 \mu\text{mol IÄ/g}$ und im unteren Mineralboden bei $7 \mu\text{mol IÄ/g}$.

Die Basensättigung liegt im mittleren Mineralboden an mehr als drei Vierteln der Standorte unter 20 %, an nahezu der Hälfte unter 10 %. Auch im unteren Mineralboden verfügen nahezu drei Viertel der Standorte nur über geringe Basensättigungen (< 20 %).

Auch die H+Fe-Sättigung weist auf die starke Versauerung dieser Substratgruppe hin. An mehr als der Hälfte dieser Profile wurden im mittleren Bodenbereich H+Fe-Sättigungen über 2 % ermittelt.

Deutlich mehr als die Hälfte dieser Substratgruppe verfügen im mittleren und unteren Mineralboden über eine nur geringe Elastizität hinsichtlich der Magnesiumversorgung (Magnesiumsättigung < 2 %).

Die Mehrzahl der Standorte ist nur schwach mit Kalium ausgestattet. Im oberen Mineralboden weisen nahezu alle Standorte, im mittleren Mineralboden drei Viertel und im unteren Mineralboden ein Viertel der Standorte Kaliumsättigungen unter 2 % auf. Dementsprechend und als Folge der geringen Austauschkapazität sind die Kaliumvorräte mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 90 bis 170 kg K/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe nur äußerst gering.



Karte 4.16: Regionale Verbreitung der Bodenprofile der Ausgangssubstratgruppe 16

Die Kalziumvorräte sind mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 130 bis 440 als sehr gering bis mäßig, die Magnesiumvorräte mit 19 bis 64 kg Mg/ha als sehr gering bis gering einzuwerten.

Die Versauerungsfront verläuft an 13 der 15 Profile unterhalb von 120 cm Mineralbodentiefe bzw. unterhalb der Beprobungstiefe.

Die Standorte dieser Substratgruppe weisen demnach eine äußerst geringe Austauschkapazität, eine hohe Versauerung und starke Basenarmut auf. Sie stellen sich ökochemisch ähnlich dar wie die Standorte aus Mittlerem Buntsandstein (Gruppe 9), sind aber merklich kaliumärmer.

Die Stickstoffvorräte sind mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 1800 bis 4000 kg sehr gering bis gering, die Phosphorvorräte mit 780 bis 950 kg P/ha unterdurchschnittlich.

4.4 Einfluß der Bestockung auf den Bodenzustand

Zur Ableitung waldbaulicher Maßnahmen zum Schutz der Böden vor weiterer Bodendegradation sind Hinweise auf Zusammenhänge zwischen der aktuellen Bestockung und der Humusform sowie ökochemischen Kennwerten des humosen Oberbodens hilfreich.

Selbstverständlich beeinflußt nicht nur die Bestockung den Bodenzustand, sondern ist auch die derzeitige Baumartenverteilung eine Folge der in den einzelnen Substratgruppen vorherrschenden Bodenbedingungen. So ist auf basenreichen Substraten ein höherer Laubholzanteil zu erwarten als auf basenarmen Substraten. Daher können zur Prüfung der Einflüsse der Bestockung auf den Bodenzustand nicht das Gesamtkollektiv, sondern nur einzelne, geologisch möglichst homogene Ausgangssubstratgruppen herangezogen werden. Hierzu wurden die Substratgruppen 6 (devonische Tonschiefer) und 9 (mittlerer Buntsandstein) herangezogen, da sie nicht nur diese Voraussetzung noch am ehesten erfüllen, sondern auch die in Rheinland-Pfalz wohl wichtigsten Waldbodensubstrate darstellen und entsprechend mit einer hohen Anzahl von Profilen im Kollektiv der Waldbodendatenbank vertreten sind (Substratgruppe 6: 250 Profile; Substratgruppe 9: 145 Profile).

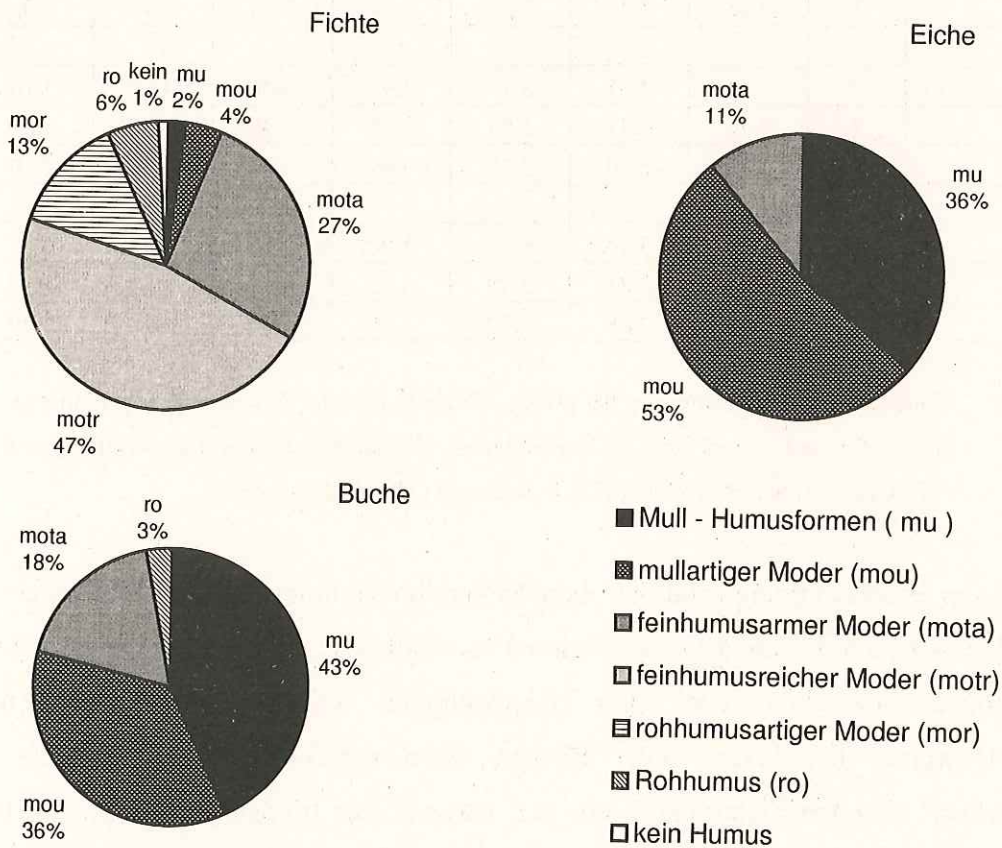


Abb. 4.1: Verteilung der Humusformen in der Substratgruppe 6 (Tonschiefer) bei unterschiedlicher Bestockung

An 131 Profilen der Substratgruppe 6 stocken Fichtenbestände, an 31 Profilen Buchenbestände, an 29 Profilen Eichenbestände und an weiteren 59 Profilen andere Baumarten oder Mischbestände. Von den mit Fichtenbeständen bestockten Tonschieferstandorten weisen zwei Drittel ökologisch ungünstige Auflagehumusformen (feinhumusreicher Moder bis Rohhumus) auf (Abb. 4.1). Demgegenüber dominieren unter Buche und Eiche mit 79 bzw. 89 % Mull und mullartiger Moder.

Die 25- bis 75-Perzentilbereiche der $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte des oberen Mineralbodens liegen unter Fichte zwischen 3,1 und 3,6, unter Buche zwischen 3,6 und 4,0 und unter Eiche zwischen 3,5 und 3,8 (Tab. 4.2). Auch unter Laubholz dominieren also pH-Werte im Al-Fe-Pufferbereich. Allerdings ist die Bodenreaktion im oberen Mineralboden unter Fichte deutlich zum sauereren hin verschoben, während der mittlere und untere Mineralbodenbereich zwischen den Bestockungen in dieser Hinsicht keine Unterschiede zeigt.

Baumart	TB	Min	Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max
			10	25	50	75	90	
Fichte	1	2.56	2.93	3.10	3.30	3.55	3.82	4.18
Buche	1	3.38	3.45	3.60	3.70	3.97	4.06	4.25
Eiche	1	2.96	3.28	3.53	3.69	3.80	3.98	4.00
Fichte	2	3.41	3.67	3.77	3.91	4.00	4.14	5.14
Buche	2	3.70	3.77	3.83	3.93	4.08	4.25	4.62
Eiche	2	3.33	3.70	3.76	3.89	4.00	4.20	4.60
Fichte	3	3.49	3.74	3.85	3.98	4.15	4.45	6.35
Buche	3	3.78	3.81	3.88	4.03	4.18	5.47	5.72
Eiche	3	3.73	3.88	3.90	3.98	4.10	4.18	4.60

Tab. 4.2: Summenhäufigkeitsverteilung der $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte im oberen (Tiefenbereich 1), mittleren (Tiefenbereich 2) und unteren Mineralboden (Tiefenbereich 3) der **Substratgruppe 6** (Tonschiefer) bei unterschiedlicher Bestockung (TB = Tiefenbereich)

Auch in der Basensättigung zeigt der obere Mineralboden unter Laubholz günstigere Verhältnisse als unter Fichte (Tab. 4.3). Im mittleren Mineralboden sind in der Basensättigung kaum Unterschiede zwischen den drei Bestockungen erkennbar. Im unteren Mineralboden weisen die Böden unter Buchen einen merklich höheren Median und 75-Perzentilwert als unter Fichte und Eiche auf, was auf eine lithogen etwas bessere Basenausstattung der mit Buche bestockten Standorte innerhalb dieser Substratgruppe hinweist.

Baumart	TB	Min	Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max
			10	25	50	75	90	
Fichte	1	3.2	6.9	8.3	10.9	17.9	24.7	78.4
Buche	1	5.7	9.0	11.8	17.3	39.1	57.4	80.0
Eiche	1	5.0	7.8	14.5	19.0	27.0	35.0	49.2
Fichte	2	2.3	4.0	5.0	7.2	9.1	13.3	98.3
Buche	2	4.9	5.4	6.4	8.6	13.0	19.9	70.4
Eiche	2	3.9	4.5	6.8	8.3	10.4	12.9	84.7
Fichte	3	2.9	5.3	8.5	19.2	40.1	82.5	99.4
Buche	3	5.3	8.1	9.9	29.6	79.1	95.9	100.0
Eiche	3	4.3	6.8	12.4	23.1	44.2	78.5	92.2

Tab. 4.3: Summenhäufigkeitsverteilung der Basensättigung (%) im oberen (Tiefenbereich 1), mittleren (Tiefenbereich 2) und unteren Mineralboden (Tiefenbereich 3) der **Substratgruppe 6** (Tonschiefer) bei unterschiedlicher Bestockung (TB = Tiefenbereich)

An 66 der 145 Profile der Substratgruppe 9 (Mittlerer Buntsandstein) stocken Kiefernbestände, an 22 Profilen Buchenbestände, an 19 Profilen Eichenbestände und an 38 Profilen andere Baumarten oder Mischbestände. An 84 % der kiefernbestockten Buntsandsteinstandorte waren Auflagehumusformen anzutreffen, davon am überwiegenden Teil der Standorte Rohhumus (Abb. 4.2). Unter Laubholz beträgt der Anteil der Profile mit Auflagehumusformen demgegenüber nur 28 % (Buche) bzw. 31 % (Eiche), während an einem Drittel der Profile Mull und an einem weiteren Drittel bessere Moderhumusformen (mullartiger Moder und feinhumusarmer Moder) festgestellt wurden (Abb. 4.2).

Die $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte des oberen Mineralbodens liegen in dieser Substratgruppe auch unter Laubholz überwiegend im Al-Fe-Pufferbereich, unter Kiefer allerdings bereits zu beträchtlichen Teilen im Fe-Pufferbereich (Tab. 4.4). Im mittleren und unteren Mineralboden sind demgegenüber hinsichtlich des pH-Werts keine wesentlichen Unterschiede zwischen den drei Bestockungen erkennbar.

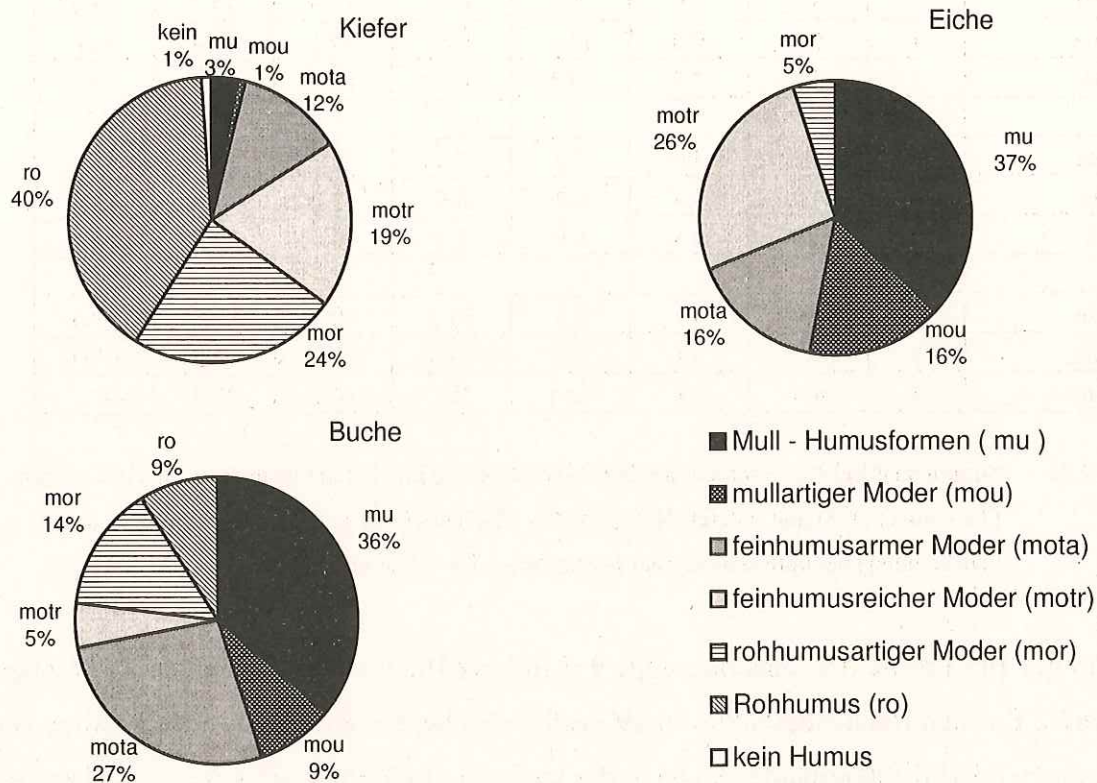


Abb. 4.2: Verteilung der Humusformen in der Substratgruppe 9 (Mittlerer Buntsandstein) bei unterschiedlicher Bestockung

Baumart	TB	Min	Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max
			10	25	50	75	90	
Kiefer	1	2.70	2.80	2.90	3.02	3.24	3.40	3.70
Buche	1	3.00	3.10	3.20	3.36	3.70	3.80	4.30
Eiche	1	2.90	2.90	3.10	3.40	3.70	4.25	4.90
Kiefer	2	2.80	3.15	3.41	3.90	4.13	4.32	4.50
Buche	2	3.10	3.50	3.70	4.10	4.15	4.46	4.62
Eiche	2	3.30	3.40	3.80	4.19	4.35	4.50	4.50
Kiefer	3	3.70	3.85	4.00	4.10	4.21	4.46	4.80
Buche	3	3.50	4.00	4.00	4.14	4.28	4.45	4.57
Eiche	3	4.00	4.00	4.20	4.26	4.40	4.40	4.55

Tab. 4.4: Summenhäufigkeitsverteilung der pH_{CaCl_2} -Werte im oberen (Tiefenbereich 1), mittleren (Tiefenbereich 2) und unteren Mineralboden (Tiefenbereich 3) der Substratgruppe 9 (Mittlerer Buntsandstein) bei unterschiedlicher Bestockung (TB = Tiefenbereich)

Baumart	TB	Min	Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max
			10	25	50	75	90	
Kiefer	1	5.2	8.7	10.7	13.3	19.3	23.0	33.6
Buche	1	6.8	9.0	10.9	19.0	26.9	48.5	63.9
Eiche	1	8.7	10.6	15.6	23.0	43.0	67.5	97.5
Kiefer	2	3.0	5.4	7.1	10.3	14.9	19.2	31.4
Buche	2	4.2	5.4	7.7	10.5	15.9	22.2	29.4
Eiche	2	3.9	5.2	8.3	15.1	21.8	25.0	25.0
Kiefer	3	5.2	7.7	10.0	15.5	20.9	30.0	61.0
Buche	3	6.7	7.9	11.9	18.4	23.2	28.8	36.1
Eiche	3	5.6	10.1	12.1	16.5	38.2	41.1	44.9

Tab. 4.5: Summenhäufigkeitsverteilung der Basensättigung (%) im oberen (Tiefenbereich 1), mittleren (Tiefenbereich 2) und unteren Mineralboden (Tiefenbereich 3) der **Substratgruppe 9** (Mittlerer Buntsandstein) bei unterschiedlicher Bestockung (TB = Tiefenbereich)

Auch die Basensättigung stellt sich im oberen Mineralboden unter Laubholzbeständen etwas günstiger dar als unter Kiefernbestockung. Im mittleren und unteren Mineralboden unterscheiden sich die Profile unter Kiefern- und Buchenbestockung in der Basensättigung kaum, während die Profile in Eichenbeständen in allen drei Tiefenbereichen höhere Basensättigungen aufweisen. Dies deutet daraufhin, daß möglicherweise die Eichenbestände auf Buntsandstein auf lithogen eher etwas basenreicheren Standorten stocken als die in dieser Substratgruppe erfaßten Kiefern- und Buchenbestände.

Zusammenschauend weisen die Befunde daraufhin, daß unter den hiesigen Randbedingungen (subatlantisches Klima, mittlere Immissionsbelastung) bei Laubholzanbau auch bei sehr basenarmen Ausgangssubstraten überwiegend Mineralbodenhumusformen und im Vergleich zum Nadelholzanbau günstigere ökochemische Oberbodenverhältnisse zu erwarten sind. Die deutlich stärkere Differenzierung der ökochemischen Kennwerte im Oberboden im Vergleich zum tieferen Mineralboden zwischen den unterschiedlichen Bestockungen zeigt, daß die besseren Oberbodenverhältnisse im wesentlichen als Folge des Laubholzanbaus anzusehen sind und nicht auf primären Standortunterschiede beruhen, die ihrerseits unterschiedliche Bestockungen nach sich ziehen.

Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, daß die derzeit mit Nadelholz bestockten Standorte in ihrer Nutzungsgeschichte möglicherweise höheren Belastungen (Entwaldungsphasen, Streu-

nutzung) ausgesetzt waren, als die derzeit mit Laubholz bestockten Standorte. Auch dies könnte zur Differenzierung des Oberbodenzustandes beigetragen haben. Leider waren über die Nutzungsgeschichte der Standorte an den jeweiligen Bodenprofilen keine Informationen verfügbar. Eine Laubholzbestockung allein ist allerdings kein hinreichender Schutz vor Versauerung und starker Basenverarmung. So befindet sich auch unter Laubholzbestockung die Mehrzahl der Oberböden im Al-Fe-Pufferbereich und weist nur eine unzureichende Basensättigung (< 20 %) auf.

4.5 Bewertung der Empfindlichkeit der Ausgangssubstratgruppen gegenüber Bodendegradation durch Luftschadstoffbelastung und Ableitung von Behandlungsvorschlägen

Nachfolgend wird versucht, aus der Beschreibung der ökochemischen Charakteristika der einzelnen Substratgruppen (vgl. Kap. 4.3) deren Empfindlichkeit gegenüber Bodendegradation insbesondere durch weitere Luftschadstoffeinträge abzuschätzen und Behandlungsvorschläge zum Schutz der Böden abzuleiten. Darüber hinaus soll versucht werden, aus den vorhandenen Daten für die einzelnen Substratgruppen Hinweise zur Gefährdung der Waldökosysteme und der Hydrosphäre durch zunehmende Stickstoffsättigung abzuleiten. Unter Empfindlichkeit gegenüber Bodendegradation wird insbesondere die Disposition der Waldböden gegenüber fortschreitende Bodenversauerung und weitere Verarmung an Kationbasen verstanden.

Dieser Beurteilungsansatz geht von der Grundüberlegung aus, daß Böden mit aktuell besserer Basenausstattung auf interne und externe Säurebelastungen weniger empfindlich reagieren als Böden, die in dieser Hinsicht ungünstiger ausgestattet sind. Da entsprechende Informationen fehlen, konnte hierbei nicht berücksichtigt werden, daß der gegenwärtige Bodenzustand, von Standort zu Standort variierend, in jeweils unterschiedlichen Anteilen durch natürliche Bodenversauerung infolge der Kohlensäureeinwirkung, nutzungsbedingte Stoffkreislaufentkopplungen z.B. durch Waldverwüstung, Waldweide, Streunutzung und durch Luftschadstoffeinträge geprägt wurde. Gegenwärtig dürfte die Bodenversauerung und Basenverarmung im wesentlichen durch die atmogene Deposition von Luftverunreinigungen angetrieben werden, da die Einträge versauernd wirkender Luftverunreinigungen in Rheinland-Pfalz weit über den Critical Loads liegen (vgl. BLOCK 1995 a). Demgegenüber stellt die Kohlensäurefreisetzung nur eine sehr schwache Säurequelle dar, und auch die Biomasseentzüge dürften als Säurequel-

le in der Bedeutung zurücktreten, da die gegenwärtige Form der Forstwirtschaft höhere Biomassevorräte aufbaut und Humusverluste vermeidet. Die Annahme der besonderen Bedeutung der Luftschadstoffeinträge für den Säure-/Basehaushalt der Böden wird gestützt durch Ergebnisse der Dachexperimente im Solling und in den Niederlanden. In diesen Experimenten zeigte sich, daß nach Rückführung der Niederschlagsqualität auf einen „vorindustriellen Regen“ die Nitrat-, Sulfat-, Aluminium und Basekationen-Konzentrationen im Sickerwasser merklich zurückgehen (BREDEMEIER et al. 1995, BOXMAN et al. 1995). Im Umkehrschluß bedeutet dies, daß der gegenwärtige Bodenversauerungsprozeß und die Kationenverluste im wesentlichen aus der Luftschadstoffdeposition resultieren.

Durch fortschreitende Bodenversauerung und Basenverarmung können

1. die Reglerfunktionen des Bodens eingeschränkt werden oder verloren gehen,
2. in verstärktem Maße Feinwurzelschäden an Bäumen und Waldbodenvegetationen auftreten,
3. Engpässe in der Versorgung der Waldbäume mit Mg, Ca und K entstehen und nicht zuletzt
4. die Qualität des aus dem Waldboden in Richtung Hydrosphäre absickernden Wassers erheblich beeinträchtigt werden.

Reglerfunktionen kommen dem Boden vor allem im Hinblick auf die Abpufferung im Ökosystem intern freigesetzter oder extern zugeführter Säuren und als Speicher für Nährstoffe zu. So sollte ein intakter Waldboden in der Lage sein, in durch Witterungsverläufe oder Störungen wie z.B. Sturmwurf oder Holzernte ausgelösten Mineralisierungsphasen die entstandenen Säuren ökosystemunschädlich abzupuffern, freigesetzte Nährstoffe zu speichern und so ein Fortschreiten der Bodenversauerung in die Tiefe und Nährelementverluste sowie eine Weitergabe von Metallkationen und Stickstoffverbindungen an die Hydrosphäre zu verhindern.

Bei zunehmender Bodenversauerung ist mit einem erhöhten Feinwurzelsatz, einer erhöhten Anzahl von Wurzelstörfpunkten und einem Rückzug von Feinwurzeln in humose Oberbodenhorizonte zu rechnen (MURACH 1984, EICHHORN 1987). Ein erhöhter Feinwurzelsatz dürfte mit einem erhöhten Nährelementbedarf, der Gefahr von Nährstoffverlusten und einem erhöhten Reservestoffverbrauch verbunden sein. Bei einem Rückzug von Wurzeln in die Humusaufgabe und die obersten Mineralbodenbereiche erhöht sich die Gefahr von Trockenschäden. Zudem wird bei einer oberflächennahen Konzentration der Feinwurzeln die Nährele-

mentbereitstellung zunehmend witterungsabhängig, da die Aufnahme von Nährstoffen an die Verfügbarkeit von Bodenwasser gebunden ist.

Bei zunehmender Versauerung und Verarmung an Kationbasen entstehen vor allem in Verbindung mit Feinwurzelschäden und einer Verlagerung der Feinwurzeln in die obersten Bodenhorizonte zunehmende Engpässe in der Magnesium-, Kalzium- und Kaliumversorgung der Waldbäume und der Waldbodenvegetation.

Bodenschutzmaßnahmen sollten darauf ausgerichtet sein, die Reglerfunktionen des Bodens zu erhalten und, wenn erforderlich, behutsam zu verbessern. Unter allen Umständen muß eine rasch fortschreitende, irreversible Zerstörung primärer und sekundärer Silikate verhindert werden. Prioritär ist hier eine rasche und drastische Verringerung der Emission versauernd wirkender Luftschadstoffe und von Stickstoffverbindungen zu fordern. Darüber hinaus kann mit waldbaulichen Maßnahmen (Baumartenwahl, Verjüngungsverfahren) und durch eine moderate Zufuhr von Puffersubstanzen und Nährstoffen einer weiteren Bodendegradation entgegengewirkt und ein standortstypischer Nährstoffkreislauf erhalten oder wiederhergestellt werden.

Als Maß zur Beurteilung der Disposition der Substrate gegenüber Bodenversauerung und Basenverarmung und zur Ableitung notwendiger Bodenschutzmaßnahmen können die Bodenreaktion ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte), die Basensättigung, die Sättigung mit H^+ -Ionen und die Anteile an Ca-, Mg- und K-Ionen an der effektiven Kationenaustauschkapazität sowie die Vorräte dieser Ionen im wurzelerreichbaren Boden herangezogen werden.

Aus den pH-Werten und deren Tiefengradienten lassen sich die in den jeweiligen Bodenbereichen vorherrschenden Pufferreaktionen ableiten. Der Summenparameter Basensättigung ist ein Maß für die kurzfristige Säureneutralisationskapazität der Böden. Hieraus läßt sich die Elastizität der Böden gegenüber weiteren Säureeinträgen abschätzen (MEIWES et al. 1984). Zudem besitzt die Basensättigung auch eine hohe ökologische Aussagekraft, da eine abnehmende Basensättigung nicht nur mit Verlusten an kationischen Nährstoffen verbunden ist, sondern auch letztlich durch Ausscheiden der Bodenwühler aus der Bodenfauna und verringerte bakterielle Aktivität eine Verlangsamung der Streuzersetzung und eine Entkoppelung des Nährstoffkreislaufs bewirkt (ULRICH 1991, ULRICH 1995a). Aus einer hohen Protonisierung und Eisenbelegung des Austauschers läßt sich auf eine weitgehende Erschöpfung der

Puffermechanismen und damit der Reglerfunktionen des Bodens schließen (ULRICH et al. 1984). Die austauschbaren Kationen stehen annähernd in einem Lösungsgleichgewicht mit dem Bodenwasser und kontrollieren die Nachlieferung von Nährelementen und Schadstoffen (MEIWES et al. 1984). Aus der Sättigung mit Kationbasen und den entsprechenden Vorräten dieser Ionen im Boden lassen sich daher Hinweise auf die Elastizität der jeweiligen Standorte im Hinblick auf die Bereitstellung dieser Nährstoffe aus dem Boden ableiten (MEIWES et al. 1984). Die Ca-Sättigung des Austauschers und die Ca-Vorräte korrespondieren weitgehend mit der Basensättigung. Da zudem auch bei geringen Ca-Gehalten im Boden nach Befunden von FINK (1991) keine Ca-Unterversorgung der Bäume eintritt, werden nachfolgend nur die austauschbaren Mg- und K-Gehalte, nicht aber die Ca-Gehalte gesondert bewertet.

Das Risiko von Überschußnitrifikation und hierdurch ausgelösten Versauerungsschüben, Nährstoffverlusten und Belastungen der Hydrosphäre mit Nitrat läßt sich mit Einschränkungen aus den in den Böden gespeicherten Stickstoffvorräten abschätzen (vgl. BLOCK 1995a, DURKA 1994).

Den derzeit günstigsten chemischen Bodenzustand und die geringste Sensitivität gegenüber Bodenversauerung und Basenverarmung weisen **die Ausgangssubstratgruppen 12** (Auelehme, Schwemmlösse und karbonathaltige Fluß- und Bachablagerungen), **4** (Substrate aus karbonathaltigem Material) und **1** (basische Vulkanite) auf. Die in Salzlösung gemessenen pH-Werte befinden sich im Wurzelraum zumeist im Silikat- und Carbonatpufferbereich. Mit Basensättigungen von in der Regel deutlich über 20 %, meist sogar über 50 %, verfügen die Böden dieser Substrate somit über eine hohe kurzfristige Säureneutralisationskapazität und damit über eine vergleichsweise hohe Elastizität gegenüber weiteren Säureeinträgen.

Die Vorräte an austauschbarem Magnesium im Mineralboden sind in der Regel mittel bis hoch. Die 25-Perzentile betragen etwa das 8- bis 16-fache des durchschnittlichen Magnesiumvorrates in der Biomasse mittlerer Baumhölzer (ca. 100 kg Mg/ha, vgl. Forstliche Standortaufnahme, Entwurf vom 14.06.1994, Tab. B. 3.4-18). Die Kaliumvorräte sind in den Substratgruppen 1 und 4 im allgemeinen mäßig bis hoch, in der Substratgruppe 12 dagegen an mehr als einem Viertel der Profile nur gering. Die Mg- und K-Sättigungen betragen in allen drei Substratgruppen vermutlich aufgrund der Ca-Dominanz häufig weniger als 2 % der AKe. Solange ein hoher Nährstoffumsatz, angezeigt durch eine gute Humusform (Mull, mullartiger Moder), und eine tiefe Durchwurzelung gewährleistet ist, dürften hiermit allerdings keine Mg- oder K-Versorgungsengpässe verbunden sein.

Vor allem Substratgruppe 1 zeigt jedoch bereits eine Reihe von Profilen mit merklicher Oberbodenversauerung und Basenverarmung. Dies gilt insbesondere für Standorte mit Fichtenbestockung. Bei Nadelholzbestockung sind infolge der erheblichen Ausfilterung von versauernd wirkenden Luftverunreinigungen und bei Reinbeständen auch infolge der Entkoppelung der Nährelementkreisläufe auch diese lithogen basenreicheren Standorte versauerungsgefährdet. Möglicherweise sind die derzeit mit Fichten bestockten Standorte auch in ihrer Nutzungsgeschichte höheren Belastungen, z.B. durch Waldverwüstungen und Streunutzung, ausgesetzt gewesen (vgl. Kap. 4.4).

Die Standorte dieser 3 Substratgruppen verfügen über überdurchschnittlich hohe Stickstoffvorräte (75-Perzentile: 11 bis 14 t N/ha). Bei fortschreitender Versauerung, die insbesondere in Nadelholzreinbeständen zu erwarten ist, muß mit einem Abbau dieser N-Vorräte und hierdurch ausgelöster weiterer Versauerung und Basenverarmung sowie einer Belastung der Hydrosphäre mit Nitrat gerechnet werden (KREUTZER 1991, 1994, KREUTZER et al. 1986, FEGER 1993, 1995, WEBER et al. 1993).

Zum Schutze der Basenvorräte im Boden und zum Schutz der Hydrosphäre vor Nitratbelastungen sollten deshalb die Standorte der Substratgruppen 12, 4 und 1 dem Laubholzanbau (Buche, Stiel- und Traubeneiche, Edellaubholz) vorbehalten werden. In Laubholzbeständen stellen sich auf diesen Substraten grundsätzlich Mineralbodenhumusformen ein. Durch einen intensiven Nährstoffkreislauf unter Einbeziehung des tieferen Mineralbodens lassen sich Entkoppelungen des Nährelementkreislaufs und damit ökosysteminterne Versauerungsschübe und Verluste an Kationbasen, sowie Nitratausträge mit dem Sickerwasser begrenzen. Derzeit mit Nadelholzreinbeständen bestockte Standorte sollten daher langfristig, wenn möglich unter Vermeidung von Kahllagen, in Laubholzbestände überführt werden. Bodenschutzkalkungen und Düngungsmaßnahmen erscheinen auf diesen Standorten nicht akut erforderlich und sollten zur Vermeidung unnötiger Risiken, z.B. durch Anregung von Überschußnitrifikation, unterbleiben. Sollte die Versauerung und Basenverarmung bereits eine Tiefe von 30 bis 60 cm unterschritten haben, sind Pflanzlochkalkungen mit Dolomit oder silikatischen Gesteinsmehlen zu erwägen (siehe unten).

Die Böden der **Substratgruppen 2** (saure und intermediäre Vulkanite), **3** (Bims), **5** (Schluffsteine, Schiefertone, Ton), **10** (Lösse und teilentbaste Lösse), **11** (Decklehme größerer Mächtigkeit), **13** (überwiegend karbonatfreie Sedimente pleistozäner Terrassen und holozäner Hochflutablagerungen) und **14** (Terrassensedimente der Kerb- und Durchbruchtäler) sind im allgemeinen im oberen und mittleren Mineralboden deutlich versauert und basenverarmt.

Vielfach weist eine erhebliche Protonierung und Eisensättigung des Austauschers auf akute Versauerungsvorgänge in den Oberböden hin. Demgegenüber befindet sich der untere Mineralboden dieser Substratgruppen meist im Austauscher- und Silikatpufferbereich und verfügt noch über eine ausreichende Basensättigung. So liegen die $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ -Werte im tieferen Mineralboden meist über 4,2 und die Basensättigung an mehr als drei Vierteln der Profile über 20 %.

Die Böden dieser sieben Substratgruppen sind demnach insbesondere durch das Vorhandensein eines deutlichen Tiefengradienten in Versauerung und Basengehalt gekennzeichnet. Allerdings liegen in den Substratgruppen 5 und 10 bereits viele Standorte auch im tieferen Mineralboden schon im Aluminiumpufferbereich. Daher bilden diese beiden Substratgruppen den Übergang zu den tieferreichend versauerten und basenverarmten Standorten (siehe unten).

Einen sehr uneinheitlichen chemischen Bodenzustand zeigen die Gruppen 2 und 13. Neben basenarmen Profilen weisen diese Substratgruppen auch einen erheblichen Anteil basenreicher Profile auf. Bei Gruppe 2 dürfte dies auf den unterschiedlichen Quarzanteil des Vulkangesteins und die unterschiedliche Mächtigkeit und Qualität der allochthonen Deckschichten, bei Gruppe 13 auf die unzureichende Trennung karbonathaltiger und karbonatfreier Substrate (Abgrenzung zu Gruppe 12) zurückzuführen sein.

Die Magnesiumversorgung dürfte in den Substratgruppen 5, 10, 11 und 13, eine ausreichende Tiefendurchwurzelung vorausgesetzt, noch keine akuten Probleme bereiten. Die austauschbaren Magnesiumvorräte und auch die Magnesiumsättigungen liegen hier überwiegend im Bereich mittel bis hoch. Dagegen sind auf einem Teil der Böden der Substratgruppen 2, 3 und 14 Magnesiumengpässe nicht auszuschließen, da hier bereits eine Reihe von Profilen nur über geringe bis mäßige Magnesiumvorräte und Magnesiumsättigungen von unter 2 % verfügen.

Die Kaliumversorgung ist in den Substratgruppen 3, 5, 10 und 11 überwiegend gut, bei einer Reihe von Profilen der Substratgruppen 2, 13 und 14 dagegen schwach. So weist z.B. bei der Substratgruppe 2 eine Vielzahl der Profile Kaliumvorräte im Mineralboden auf, die weniger als halb so groß sind, wie die Kaliumvorräte in der Biomasse mittlerer Baumhölzer.

Die Stickstoffvorräte im Mineralboden liegen mit Ausnahme der Substratgruppe 3 zumeist im mittleren Bereich (4 bis 9 t N/ha). Das Risiko von Nitratausträgen ist hier nur schwer abzuschätzen (vgl. BLOCK 1995a). Allerdings ist ein Humusvorratsabbau nach Bestockungswandel oder bei Kahllage, verbunden mit Überschußnitrifikation und Nitratbelastung der Hydrosphäre, nicht auszuschließen. Besonders hoch ist dieses Risiko in Substratgruppe 3 (Bims), da hier mit einem Median von 11 t N/ha im Mineralboden bis 90 cm Bodentiefe hohe N-Vorräte dominieren.

Da die Böden dieser sieben Substratgruppen trotz erheblicher Oberbodenversauerung noch über beachtliche Vorräte an Kationbasen im tieferen Mineralboden verfügen, ist die Erhaltung oder Schaffung einer tiefwurzelnden Bestockung, die die Einbeziehung dieser Basenvorräte in den Nährstoffkreislauf gewährleistet, die wesentlichste Maßnahme zur Erhaltung der Funktionsfähigkeit dieser Waldökosysteme. Zu beachten ist, daß auf diesen Standorten beim Generationswechsel die Gefahr eines plötzlichen Einbruchs in der Trophie besteht. Während die derzeitige Bestockung (auch Fichten, vgl. RASTIN und ULRICH 1991), die möglicherweise noch unter einem günstigeren chemischen Oberbodenzustand aufgewachsen ist, noch Anschluß an die im tieferen Mineralboden vorhandenen Basenvorräte hat, muß die nachfolgende Generation die „Säuresperre“ im oberen Mineralboden erst durchbrechen. Unter „Säuresperre“ werden hier humusarme Mineralbodenreiche im Al/Fe- und Al-Pufferbereich verstanden, die möglicherweise über Protonen- und Aluminiumtoxizität (vgl. JUNGA 1984, JORNS et al. 1991, ROST-SIEBERT 1985, METZLER und OBERWINKLER 1986, MURACH 1984, SIMON und ROTHE 1985) als Wurzelhindernis wirken und zu einer flachen, auf den humusbeeinflussten Horizont beschränkten Durchwurzelung führen können (vgl. ULRICH 1991, 1995b). So berichtet EICHHORN (1991), daß bei Wurzelinventuren auf hessischen Fichten-Dauerbeobachtungsflächen eine gute Durchwurzelung der Bodentiefe 30-45 cm mit Schwachwurzeln (2-5 mm) nur in über 40-jährigen Beständen festzustellen war, obwohl die Tiefenerschließung des Wurzelwerkes am Beginn des Wachstumszyklus stehen sollte. PUHE et al. (1986) beobachteten Rückbildungen im Tiefenwurzelsystem geschädigter Fichtenbaumhölzer auf bodensauren Standorten in Schweden.

Bei sehr eingehenden morphologischen Untersuchungen des Wurzelsystems von Fichten auf versauerten, basenarmen Sanden im Vergleich zu basenreichen Löß-Kolluvien fand PUHE (1994) auf den basenarmen Standorten ein stark eingeschränktes Längenwachstum der Hauptwurzelsachsen und erhebliche Anteile degenerierter und absterbender Wurzelenden. Die Feinwurzeln mieden mineralische Bereiche und konzentrierten sich in der Humusaufgabe und in humusreichen Bodenpartien (alte Wurzelkanäle, Bh-Horizonte etc.). Demgegenüber bildeten die Fichten auf den basenreichen Standorten ein tiefreichendes und Störpunkt-armes Vertikalwurzelsystem aus.

Auch MATZNER und MURACH (1995) gehen aufgrund einer eingehenden Literaturanalyse davon aus, daß die Wurzelsysteme aufgrund von Al-Streß und Magnesiumverarmung flacher werden. Sie schließen dies vor allem aus den bei einer Vielzahl von Untersuchungen beobachteten engen Beziehungen zwischen Feinwurzelbiomasse und Ca/Al-Verhältnis der Bodenlösung sowie aus der abnehmenden Wurzelbiomasse bei geringerer Mg-Bereitstellung. Die für

die Wurzeln ungünstigsten Verhältnisse ergeben sich darin meist in den B-Horizonten der Böden.

Bei einer flacheren Wurzelentwicklung der nachfolgenden Waldgeneration würde der „große Nährstoffkreislauf“, das heißt die Ernährung der Waldbäume unter Einbeziehung des tieferen Mineralbodens (vgl. BUBERL et al. 1994), in einen „kleinen Nährstoffkreislauf“, das heißt eine Ernährung der Waldbäume im wesentlichen aus der Humusaufgabe unter weitgehender Aussparung des Mineralbodens, umgewandelt, wodurch sich die Basenversorgung dieser im Oberboden versauerten und verarmten Ökosysteme schlagartig verschlechtern dürfte. Um dem entgegenzuwirken, sollten auf solchen Standorten tiefwurzelnde Baumarten (insbesondere Stiel- und Traubeneiche) zumindestens als Mischbaumarten in die Bestockungsziele einbezogen werden.

Zu überprüfen ist, ob mit Hilfe von Pflanzlochkalkungen ein Durchbrechen der „Säuresperre“ gefördert werden kann. Pflanzlochkalkungen mit kohlensaurem Kalk oder Dolomit haben sich positiv auf die Wurzelentwicklung von Laubbäumen ausgewirkt (BÜTTNER und VALERIUS 1993, NEBE und LEUBE 1995). Die Pflanzen durchwurzeln das mit dem Kalk durchmischte Bodensubstrat sehr intensiv, breiten sich aber auch in den umgebenden Boden aus (SCHÜLER 1995, mündl. Mitteilung). Denkbar ist, daß die Wurzeln dem basenreichen vertikalen Sickerwasserfluß unterhalb des Pflanzlochs folgen und so die Tiefendurchwurzelung auch über die Einarbeitungstiefe des Kalks hinaus (30 bis 40 cm) gefördert wird.

Oberflächenkalkungen erscheinen demgegenüber auf diesen Substraten nur dann vordringlich, wenn die Tiefenversauerung bereits so weit fortgeschritten ist, daß auch bereits die derzeitige Bestockung keinen Anschluß an Bodenbereiche mit Basensättigungen von über 20 % hat. Dies dürfte insbesondere Standorte der Substratgruppen 5 und 11 betreffen.

Stark und häufig tiefreichend versauert sind die Böden der **Ausgangssubstratgruppen 6** (Tonschiefer) und **15** (Schwemmsandfächer). Der obere Mineralboden befindet sich hier überwiegend im Eisen-Aluminium-Pufferbereich, der mittlere Mineralboden im Aluminiumpufferbereich. An der Hälfte der Profile der Ausgangssubstratgruppe 15 und an drei Vierteln der Profile der Substratgruppe 6 liegt auch der untere Mineralbodenbereich im Al/Fe- und Al-Puffer.

Die Böden dieser beiden Substratgruppen unterscheiden sich von den vorgenannten Gruppen insbesondere durch die weiter fortgeschrittene Basenverarmung. So beträgt an einem Viertel der Standorte der beiden Substratgruppen die Basensättigung im mittleren Mineralbodenbereich weniger als 7 %, an drei Vierteln weniger als 20 %. Besonders deutlich ist der Unter-

schied zu den vorgenannten Gruppen in den Magnesiumvorräten. Lagen die Mediane der Magnesiumvorräte bis 90 cm Mineralbodentiefe bei den Ausgangssubstratgruppen 2, 3, 5, 10, 11, 13 und 14 noch zwischen 245 und 2442 kg Mg/ha, betragen sie bei den Ausgangssubstratgruppen 6 und 15 nur noch 145 bzw. 107 kg Mg/ha. Auch die Kaliumvorräte sind mit Medianen von 358 bzw. 288 kg K/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe in den Gruppen 6 und 15 meist merklich geringer als in den vorgenannten Gruppen. Bei beiden Kationen liegen die Mediane der Vorräte im Mineralboden nur etwa in gleicher Höhe wie die entsprechenden Vorräte in der Biomasse mittlerer Baumhölzer (100 kg Mg/ha, 400 kg K/ha, vgl. Forstliche Standortaufnahme, Entwurf vom 14.06.1994, Tab. B.3.4.17). Beide Substratgruppen müssen daher bereits als sehr empfindlich gegenüber weiterer Basenverarmung eingestuft werden.

Hinsichtlich der Gefahr von Überschußnitrifikation und Nitrat austrägen mit dem Sickerwasser sind beide Standorte sehr unterschiedlich zu bewerten. Während die Stickstoffvorräte in der Substratgruppe 15 mit einem 75-Perzentil von 4 t N/ha vergleichsweise gering sind und Überschußnitrifikation kaum zulassen, liegen die N-Vorräte in der Substratgruppe 6 mit einem 25- bis 75-Perzentilbereich von 5 bis 9 t N/ha im mittleren Bereich, in dem sich eine übermäßige Nitratfreisetzung bei Bestockungswechsel oder Störungen im Ökosystem nicht ausschließen läßt (vgl. BLOCK 1995a).

Beide Substratgruppen weisen in ihren ökochemischen Kennwerten auffallend große Spannen auf. In der Substratgruppe 6 könnte dies darauf zurückzuführen sein, daß der Tonschiefer von Standort zu Standort in sehr unterschiedlichem Ausmaß Verwitterungsvorgängen ausgesetzt war. So ist anzunehmen, daß in abtraggeschützten Lagen tertiär verwitterter und daher tiefgründig basenverarmter Tonschiefer anzutreffen ist, während in Oberhanglagen nahezu unverwitterter Tonschiefer mit noch deutlich höheren Basengehalten ansteht.

Bei der Substratgruppe 15 dürfte der Basengehalt sehr stark von der Mächtigkeit der Schwemmsandaufgaben abhängen. Sicherlich sind Standorte mit nur geringmächtigen Aufgaben, an denen basenreicheres Terrassenmaterial in wurzelerreichbarer Tiefe ansteht, hier begünstigt. Zudem ist bei Fluß- und Bachablagerungen aufgrund der sehr unterschiedlichen Sedimentationsbedingungen grundsätzlich von einem sehr kleinräumigen Wechsel der Bodenbeschaffenheit auszugehen.

Auf tiefreichend versauerten und basenarmen Standorten dieser beiden Substratgruppen erscheinen Oberflächenkalkungen zum Schutze vor fortschreitender Versauerung und weiterer Basenverarmung unausweichlich. Positive Erfahrungen liegen aus einem umfangreichen Versuch auf Tonschiefer mit der Applikation von 3 bis 6 t Dolomit/ha vor (SCHÜLER 1992, Standort Adenau). Die Dolomitzkalkung verringerte den Aziditätsgrad der Bodenlösung und

erhöhte das Mg/Al-Verhältnis der Bodenlösung im gesamten Wurzelbereich, während die Erhöhung der Nitratgehalte im Sickerwasser nur gering blieb.

Für Standorte mit Oberbodenversauerung, aber noch höheren Basengehalten im wurzelerreichbaren tieferen Mineralboden, wurden vorstehend bereits Behandlungsvorschläge unterbreitet.

Sehr stark und tiefreichend versauert und basenverarmt sind die Böden der **Substratgruppen 7** (Sandstein außerhalb des Rheinischen Schiefergebirges), **8** (quarzreiche Substrate des Rheinischen Schiefergebirges), **9** (Mittlerer Buntsandstein) und **16** (Flug- und Dünensande). Drei Viertel der Profile dieser Substratgruppen liegen im gesamten durchwurzelbaren Bereich im Al/Fe- und Al-Pufferbereich. In den Substratgruppen 9 und 16 fallen ein Viertel der Profile im oberen Mineralboden in den Eisenpufferbereich ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2} < 3,0$). Hier ist nach Untersuchungen von MURACH (1984) die Entwicklung des Feinwurzelsystems von Fichten durch die zu niedrige Bodenreaktion gehemmt. Der Median der Basensättigung liegt im mittleren Mineralboden bei allen vier Substratgruppen bei 10 %, das 75-Perzentil deutlich unter 20 %. In den Substratgruppen 8 und 16 weisen ein Viertel der Standorte nur noch Basensättigungen von unter 5 % auf. In der Regel zeigt sich nur ein sehr schwacher Tiefengradient; auch im tieferen Mineralboden steigen die Basensättigungen kaum an. Die Protonierung und Eisenbelegung des Austauschers ist auch in humusarmen Horizonten bereits weit fortgeschritten. Dies zeigt, daß die Puffermechanismen weitgehend erschöpft sind. Jede Säurebelastung wird nahezu unvermindert an den Unterboden weitergegeben (MEIWES et al. 1984, BUBERL et al. 1994, Seite 34).

Die Magnesiumvorräte belaufen sich in diesen vier Substratgruppen weit überwiegend unter 100 kg Mg/ha bis 90 cm Mineralbodentiefe. In den Substratgruppen 9 und 16 liegen die Mediane der Magnesiumvorräte nur bei 21 bzw. 27 kg Mg/ha. Die im Mineralboden austauschbar gebundenen Magnesiumvorräte betragen also nur noch ein Viertel der entsprechenden Vorräte in der Biomasse mittlerer Baumhölzer. Auch die im Mineralboden austauschbar gebundenen Kaliumvorräte liegen in der Mehrzahl der Profile dieser vier Substratgruppen unter den entsprechenden Vorräten in der Biomasse. In den Gruppen 9 und 16 beträgt der Median der Bodenvorräte sogar deutlich weniger als die Hälfte der Vorräte in der Biomasse. Die Böden dieser Substratgruppen verfügen demnach nur über eine sehr geringe Elastizität im Hinblick auf Säuretoxizität und Nährelementbereitstellung. Auslenkende Kräfte, wie z.B. eine witterungsbedingte oder durch Nutzungseingriffe ausgelöste Entkoppelung der Nährstoffkreisläufe,

schlagen unmittelbar auf das Ökosystem durch, da kaum eine Dämpfung durch Speicher- und Pufferleistungen des Bodens stattfindet (vgl. BUBERL et al. 1994).

Die Stickstoffvorräte sind in den Substratgruppen 9 und 16 vergleichsweise gering (25- bis 75-Perzentilbereich: 2 bis 4 t N/ha), in der Gruppe 7 mäßig (25- bis 75-Perzentilbereich: 3 bis 6 t N/ha) und in der Gruppe 8 mittel (25- bis 75-Perzentilbereich: 5 bis 9 t N/ha). Die Gefährdung der Ökosysteme und der Hydrosphäre durch Überschußnitrifikation und Nitratbelastung ist daher mit Ausnahme von Gruppe 8 nur als vergleichsweise gering einzuschätzen.

Die tiefgreifende Versauerung und Basenverarmung dieser Standorte erfordert dringend Bodenschutzkalkungen. In Versuchen auf Standorten der Substratgruppen 8 und 9 hat sich die Applikation von 6 t Dolomit/ha bewährt (SCHÜLER 1992 - Standorte Idar-Oberstein und Hochspeyer; BLOCK 1995c - Standorte Idar-Oberstein und Merzalben). Nennenswert erhöhte Nitratausträge infolge der Kalkung wurden auf diesen Ausgangssubstraten nicht beobachtet. Offensichtlich wird der in der Humusaufgabe nach der Kalkung freigesetzte Stickstoff vollständig von Bodenorganismen aufgenommen oder in den durch die Verbesserung der Ca- und Mg-Versorgung angeregten Biomasseerwachs der Vegetation eingebaut (vgl. BLOCK 1995a). Ein hoher Magnesiumcarbonatanteil im Kalkungsmaterial erscheint auf diesen extrem Mg-armen Standorten besonders bedeutsam. Sehr behutsam müssen auf diesen Standorten die Humusvorräte behandelt werden, da in ihnen vermutlich größere Vorräte an Kationbasen gespeichert sind als im Mineralboden (vgl. BLOCK et al. 1991). Kahllegungen und intensive Bodenbearbeitungen sollten daher unterbleiben. Die Holznutzung sollte auf das unbedingt notwendige Maß beschränkt werden, da mit dem Biomasseentzug dem Ökosystem in erheblichem Umfang auch Basen entzogen werden (vgl. FEGER 1993, FEGER et al. 1991, KREUTZER 1995). Der Schlagabraum sollte daher unbedingt im Bestand verbleiben. Um den Nährstoffkreislauf zu verbessern und die Gefahr ökosysteminterner Versauerungsphasen durch Entkopplung von Nährstoffkreisläufen zu reduzieren (vgl. ULRICH et al. 1979), sollten Nadelholzreinbestände auf diesen Standorten behutsam in laubholzreiche Bestockungen überführt werden. Bei besonders starker Oberbodenversauerung und Basenverarmung ist bei einer Einbringung der Laubbaumarten vermutlich eine Pflanzlochkalkung erforderlich (vgl. BÜTTNER und VALERIUS 1993). Zweifel bestehen, ob die häufig nur sehr geringe Ausstattung der Böden dieser Substratgruppen mit kurz- bis mittelfristig verfügbarem Kalium für den Aufbau einer leistungsfähigen Laubholzbestockung ausreicht. Da die herkömmliche Applikation von Kalium in sulfatischer Bindung Versauerungsschübe auslöst und das Kalium rasch via Sickerwasser aus dem Ökosystem wieder ausgetragen wird (vgl. WERNER 1995), sollten

Alternativen, z.B. die Einbringung von kaliumreichen silikatischen Gesteinsmehlen in die Pflanzlöcher, geprüft werden.

Eine „technische Bodenrestauration“, d.h. eine Einbringung großer Basenmengen in den Mineralboden unter Einsatz von Bodenbearbeitungsmaschinen erscheint nur dann vertretbar, wenn der Umbau von Nadelholzreinbeständen in stabile laubholzreiche Mischbestände auch mit Hilfe von Oberflächen- und Pflanzlochkalkungen nicht gelingen sollte. Derartige Maßnahmen greifen sehr intensiv in das Bodenökosystem ein und beinhalten Risiken in Form von Humusvorratsabbau (WENZEL 1989), Bodenstrukturverlust und Bodenverdichtung (HORN 1989) sowie einer Verringerung der kleinräumigen, natürlichen Diversität von Bodeneigenschaften. Daher ist eine „biologische Bodenrestauration“ über wiederholte moderate Oberflächenkalkungen, z.B. mit 3 bis 6 t Dolomit/ha, und die Einbringung von Laubbäumen, möglichst unterstützt durch Pflanzlochkalkungen, vorzuziehen. Grundgedanke ist hierbei, daß die Basen allmählich über die Wurzelstreu der Laubbäume bis in den tieferen Mineralboden hinein verteilt und der Nährstoffkreislauf über leichter zersetzliche, basenreiche Laubstreu intensiviert wird. Die Oberflächenkalkungen sollen die Säureeinträge noch in der Humusaufgabe abpuffern und gleichzeitig einen allmählichen Umbau des Auflagehumus in Richtung Mineralbodenhumus einleiten (vgl. Kap. 4.4). Eine derartige „biologische Bodenrestauration“ wird sicherlich nicht kurzfristig, sondern erst im Verlauf von Jahrzehnten die erwünschte Wiederherstellung eines standortstypischen, ökochemischen Mineralbodenzustandes und Nährstoffkreislaufes erzielen können, ist aber mit erheblich geringeren Risiken für Ökosystem und Hydrosphäre als „technische Restaurationsmaßnahmen“ verbunden.

4.6 Literatur

- BLOCK, J., BOPP, O., GATTI, M., HEIDINGSFELD, N. und ZOTH, R. (1991): Waldschäden, Nähr- und Schadstoffgehalte in Nadeln und Waldböden in Rheinland-Pfalz. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 17/91, 237 S.
- BLOCK, J. (1995a): Stickstoffausträge mit dem Sickerwasser aus Waldökosystemen. UBA-Texte 28/95, S. 80-96.
- BLOCK, J. (1995b): Luftschadstoffbelastung rheinland-pfälzischer Waldökosysteme. Allgem. Forst Zeitschrift, 2, S. 85 - 87
- BLOCK, J. (1995c): Stoffbilanzen ungekalkter und gekalkter Teilareale der Waldökosysteme an den Umweltkontrollstationen Merzalben und Idar-Oberstein. In: Untersuchungen an Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 32/95, S. 54-65.

- BREDEMEIER, M., BLANCK, K., LAMERSDORF, N., WIEDEY, G. A. (1995): Response of soil water chemistry to experimental „clean rain“ in the NITREX roof experiment at Solling Germany. *Forest Ecology and Management* 71, pp. 31 - 44.
- BOXMAN, A. W., v. DAM, D., v. DIJK, H. F. G., HOGERVORST, R. F., KOOPMANS, Ch. J. (1995): Ecosystem responses to reduced nitrogen and sulphur inputs into two coniferous forest stands in the Netherlands. *Forest Ecology and Management* 71, pp. 7 - 29.
- BÜTTNER, G. und VALERIUS, H. (1993): Auswirkungen einer Pflanzloch-Düngung auf den Boden und das Wachstum junger Buchenpflanzen. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 1993.
- BUBERL, H.G., WILPERT, K.v., TREFZ-MALCHER, G. und HILDEBRAND, E.E. (1994): Der chemische Zustand von Waldböden. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 1989 - 92 (BZE). *Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg*, Heft 182.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (BML) (1994): Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) - Arbeitsanleitung -, 158 S.
- BUTZ-BRAUN, R. (1992): Rezente Tonmineralveränderungen in Waldböden aus Rheinland-Pfalz und Costa Rica. Dissertation. Philipps-Universität Marburg, Fachbereich Geowissenschaften, 100 S. und Anhang.
- DURKA, W. (1994): Isotopenchemie des Nitrats, Nitrat austrag, Wasserchemie und Vegetation von Waldquellen im Fichtelgebirge (NO-Bayern). *Bayreuther Forum Ökologie*, Bd. 11, 197 S.
- EICHHORN, J. (1987): Vergleichende Untersuchungen von Feinwurzelsystemen bei unterschiedlich geschädigten Altlichten (*Picea abies* Karst.). *Forschungsberichte der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt*, Bd. 3, 179 S.
- EICHHORN, J. (1991): Sturmschäden des Frühjahres 1990 in Hessen. *Forschungsberichte der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt*, Bd. 12, 162 S.
- FEGER, K.-H. (1993): Bedeutung von ökosysteminternen Umsätzen und Nutzungseingriffen für den Stoffhaushalt von Waldlandschaften. *Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen*, Heft 31, 237 S.
- FEGER, K.-H. (1995): Bedeutung atmosphärischer Stoffdepositionen für Mobilisierung und Transport von Aluminium, Eisen und Mangan in sauren Böden. *Internationales Symposium; Grundwasserversauerung durch atmosphärische Deposition; Ursachen - Auswirkungen - Sanierungsstrategien*, 26.-28. Oktober 1994, Bayreuth. *Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft*, Heft 3/1995, S. 133 - 142.
- FEGER, K.-H., RASPE, S., SCHMID, M., ZÖTTL, H.-W. (1991): Verteilung der Elementvorräte in einem schlechtwüchsigen 100-jährigen Fichtenbestand auf Buntsandstein. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 110, S. 248 - 262.
- FINK, S. (1991): Histologische und histochemische Untersuchungen zur Nährstoffdynamik in Waldbäumen im Hinblick auf die Neuartigen Waldschäden. IV. Bindungsformen und mikromorphologische Verteilung des Calciums in Fichtennadeln. *Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK-PEF 80*, April 1991, S. 253-262.
- FORSTLICHE STANDORTSAUFNAHME: Fünfte Auflage in Vorbereitung. Arbeitskreis Standortskartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung.
- HORN, R. (1989): Bedeutung der Bodenstruktur für den Nährstofftransport. Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF) 55, S. 181 - 194.
- JORNS, A., HECHT-BUCHHOLZ, C., WISSEMEIER, A. H. (1991): Aluminium-induced callose formation in root tips of Norway spruce. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 154, S. 349 - 353.
- JUNGA, U. (1984): Sterilkultur als Modellsystem zur Untersuchung der Aluminium-Toxizität bei Fichtenkeimlingen. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben* Nr. 5, S. 1 - 173.
- KREUTZER, K. (1991): Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Höglwaldforschung 1984-1989/90. *Forstwissenschaftliche Forschungen*, Heft 39, S. 252-261.

- KREUTZER, K. (1994): Folgerungen aus der Höglwald-Forschung. Allgem. Forst Zeitschrift 14, S. 769-774.
- KREUTZER, K. (1995): Möglichkeiten und Grenzen forstlicher Maßnahmen zum Schutz vor Grundwasserversauerung. Internationales Symposium; Grundwasserversauerung durch atmosphärische Deposition; Ursachen - Auswirkungen - Sanierungsstrategien, 26.-28. Oktober 1994, Bayreuth. Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 3/1995, S. 205 - 208.
- KREUTZER, K., DESCHU, E., HÖSL, G. (1986): Vergleichende Untersuchungen über den Einfluß von Fichte und Buche auf die Sickerwasserqualität. Forstwissenschaftliches Centralblatt 105, S. 364 - 371.
- MATZNER, E. und MURACH, D. (1995): Soil changes induced by air pollutant deposition and their implication for forests in Central Europe. Water, Air and Soil Pollution, in press.
- MEIWES, K.-J., KÖNIG, N., KHANNA, P.K., PRENZEL, J. und ULRICH, B. (1984): Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. Ber. d. Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, Bd. 7, S. 1-67.
- METZLER, B., OBERWINKLER, F. (1986): Charakteristische Meristemschäden in Fichtenwurzeln durch niedrigen pH-Wert und Aluminium-Ionen. Allgemeine Forst Zeitschrift 25/26, S. 649 - 651.
- MURACH, D. (1984): Die Reaktion der Feinwurzeln von Fichten (*Picea abies* Karst.) auf zunehmende Bodenversauerung. Göttinger Bodenkundliche Berichte, 77, 126 S.
- NEBE, W. und LEUBE, F. (1995): Experimente zum meliorativen Waldumbau im Erzgebirge. Forst und Holz 6, S. 177 - 182.
- PUHE, J. (1984): Die Wurzelentwicklung der Fichte bei unterschiedlichen chemischen Bodenbedingungen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 108, 128 S.
- PUHE, J., PERSSON, H., BÖRJESSON, J. (1986): Wurzelwachstum und Wurzelschäden in skandinavischen Nadelwäldern. Allgemeine Forst Zeitschrift 20, S. 488 - 492.
- RASTIN, N. und ULRICH, B. (1991): Untersuchungen an Einzelbäumen und Böden über den Einfluß von Standort und Immission auf die Entstehung von Sturmschäden in den Forstämtern des Vorderhunsrücks - SIMS. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Bd. 23.
- RIEBELING, R. (1991): Waldernährung und Wachstum - Ergebnisse hessischer Waldschadensuntersuchungen - Allgem. Forst Zeitschrift, 2, S. 62 - 67
- ROST-SIEBERT, K. (1985): Untersuchungen zur H⁺- und Al-Ionentoxizität an Keimpflanzen von Fichte (*Picea abies* Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Lösungskultur. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Waldsterben, Bd. 12, S. 1-219.
- SCHÜLER, G. (1992): Der vergleichende Kompensationsversuch mit verschiedenen Puffersubstanzen zur Minderung der Auswirkungen von Luftschadstoffeinträgen in Waldökosystemen - Zwischenergebnisse aus den Versuchsjahren von 1988 bis 1991 - Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz Nr. 21/92, S. 5 - 26.
- SCHULTE, M., SCHWARZENBACH, F.H., VOGEL, E. und URFER, W. (1991): Methodische Erfahrungen bei der Anwendung diskriminanzanalytischer Verfahren zur Charakterisierung von Waldböden auf der Grundlage elementarchemischer Analysedaten. Forstarchiv, 62: S. 145-152.
- SIMON, V., ROTHE, G.M. (1985): Aluminiumbedingte Stoffwechseländerungen in Fichtenkeimlingen. Allgemeine Forst Zeitschrift, 36, S. 931 - 935.
- ULRICH, B. (1991): Zusammenfassende ökologische Bewertung der Untersuchungsergebnisse des SIMS-Projektes. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 19/91, S. 130 - 140.
- ULRICH, B. (1995a): Der ökologische Bodenzustand - seine Veränderung in der Nacheiszeit, Ansprüche der Baumarten. Forstarchiv 66: S. 117 - 127.
- ULRICH, B. (1995b): Die Entwicklung der Waldschäden aus ökosystemarer Sicht. UBA-Texte 28/95, S. 9 - 19.

- ULRICH, B. und MALESSA, V. (1989): Tiefengradienten der Bodenversauerung. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 152: S. 81 - 84.
- ULRICH, B., MAYER, R., KHANNA, P.K. (1979): Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. Schriften Forstliche Fakultät Universität Göttingen 58, Sauerländers Verlag Frankfurt.
- ULRICH, B., MEIWES, K. J., KÖNIG, N., KHANNA, P. K. (1984): Untersuchungsverfahren und Kriterien zur Bewertung der Versauerung und ihrer Folgen in Waldböden. Der Forst und Holzwirt 11: S. 278 - 286.
- WEBER, G., REHFUESS, K. E., KREUTZER, K. (1993): Über den Einfluß naturnaher Waldwirtschaft auf den chemischen Bodenzustand. Allgem. Forst Zeitschrift 2, S. 68 - 71.
- WERNER, W. (1995): Auswirkungen von Dolomit-Kalkung und Kalium-Düngung auf die Nitratausnutzung des Wachstums und die Vitalität der Krautschicht des Waldökosystems an der Umweltkontrollstation Idar-Oberstein. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 32/95, S. 106-130.
- WENZEL, B. (1989): Kalkungs- und Meliorationsexperimente im Solling: Initialeffekte auf Boden, Sickerwasser und Vegetation. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 51, 274 S.

5. Bewertung der Sensitivität großräumig bodenkundlich kartierter Flächeneinheiten gegenüber fortschreitender Bodenversauerung und Nährelementverarmung

von Oliver Bopp

5.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Waldbodendatenbank enthält eine Vielzahl von Informationen über den chemischen Bodenzustand von nahezu 1300 Bodenprofilen (vgl. Kap. 2.). Die Untersuchungsbefunde gelten jedoch nur für den jeweiligen Aufnahmepunkt. Zur gezielten Steuerung von Bodenschutzmaßnahmen wären jedoch Flächeninformationen über Umfang und Lage der gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung besonders sensitiven Waldbodenareale sehr hilfreich. Die Befunde aus Raster- bzw. Punkterhebungen (vgl. EG-Projekt Nr. 88.60.DL0060, BLOCK et al. 1991) können allerdings nicht vom einzelnen Profilort auf Flächen übertragen werden, weil die Beziehung zwischen den Analysedaten des Profils und dem Boden abseits der Profilgrube unbekannt ist.

Geostatistische Regionalisierungsverfahren können aufgrund unzureichender datentechnischer Voraussetzungen (Anzahl sowie Verteilung der Profilorte) nicht eingesetzt werden. Zudem ist die Regionalisierung von Bodendaten durch geostatistische Verfahren deshalb besonders problematisch, weil bodenchemische Analysedaten im Raum nicht autokorreliert sind, d.h. sie können sich sprunghaft ändern.

Für die Übertragung vom Beprobungspunkt auf die weitere Umgebung sind daher zusätzliche raumbezogene Informationen erforderlich. Diese Informationen können generell in Betriebskarten der Forstlichen Standortskartierung (z.B. Substratreihenkartierung), Bodenkarten oder geologischen Kartenwerken erwartet werden. Entwicklungsstand und Deckungsgrad diesbezüglicher Kartenwerke im Land Rheinland-Pfalz sind jedoch nur sehr gering. Als Kartenvorlage für die Regionalisierung der Bodendaten bietet sich lediglich eine zur Zeit vom Geologischen Landesamt Rheinland-Pfalz neu bearbeitete Bodenübersichtskarte (BÜK 200) für den Hunsrück im Maßstab 1:200 000 an¹. Die Abschlußarbeiten zu diesem Kartenwerk sind noch

¹ An dieser Stelle sei Herrn Dr. Agsten, dem Leiter der Abteilung Bodenkunde des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz und Herrn Dr. Spies nochmals für das freundliche zur Verfügung stellen der Manuskriptkarten und für die ausführliche Beratung in allen Belangen der Bodenübersichtskartierung gedankt.

im Gange, die Kartierungsunterlagen wurden der Forstlichen Versuchsanstalt freundlicher Weise vorab zur Verfügung gestellt. Da bislang nur für den Hunsrück eine Entwurfskarte der BÜK 200 vorliegt, konnte die Entwicklung der Sensitivitätskarte nicht wie ursprünglich vorgesehen für das ganze Land Rheinland-Pfalz erfolgen, sondern mußte auf den Hunsrück als Projektgebiet beschränkt werden.

Ziel dieses Abschnitts des vorliegenden Berichts ist es, den vorherrschenden Bodenzustand großräumiger, d.h. gegebenenfalls einige hundert Hektar umfassender Kartiereinheiten zu erfassen, zu bewerten und übersichtlich darzustellen. Aufgrund der großen Anzahl der Profildaten soll die Bewertung mit Hilfe eines automatisierten Verfahrens erfolgen, mit dem punktuelle Daten gemäß definierter Vorschriften bewertet und zur Gebietsbewertung zusammengefaßt werden können. Dazu wird ein Verfahren entwickelt, das zur Bewertung der Profildaten Kriterien und Kennwerte heranzieht, die in der Literatur als besonders aussagefähig beschrieben werden. Die Überlegungen und Verfahren bei der Auswahl, Gewichtung und Verknüpfung der Merkmale werden eingehend dargestellt. Kartiereinheiten, für die sich keine signifikanten Unterschiede nachweisen lassen, sollen schließlich zu Sensitivitätsgruppen zusammengefaßt werden. Das Verfahren soll offen ausbaubar und auch auf andere Untersuchungsgebiete übertragbar sein. Die Ergebnisse sollen in einem aussagekräftigen, leicht les- und aktualisierbaren Tabellen- und Kartenwerk dargestellt werden.

Die Bodenzustandsbewertung erstreckt sich auf großräumige, bodenkundlich kartierte Einheiten. Kleinstandörtliche Unterschiede werden dabei zwangsläufig vernachlässigt. Das vorgestellte Verfahren soll auf großräumiger Maßstabsebene (1:200 000) einen Gesamtüberblick über den chemischen Bodenzustand des Untersuchungsgebietes liefern und Aussagen darüber ermöglichen, welche Standorte unter den gegebenen Bedingungen durch Bodendegradation besonders gefährdet sind.

5.2 Material

5.2.1 Bodenprofilaten

Insgesamt konnten aus der Waldbodendatenbank 337 das Projektgebiet betreffende Bodenprofile ausgewählt werden (vgl. Kap. 2.). Knapp die Hälfte aller Profile liegen im Untersuchungsgebiet selbst. Die restlichen Profile wurden zur Erweiterung des Datenmaterials in die Untersuchung miteinbezogen, wenn sie aufgrund ihrer Profilcharakteristika eindeutig einer Kartiereinheit der BÜK 200 Hunsrück zugeordnet werden konnten (vgl. Kap. 5.3.1). Diese Vorgehensweise war möglich, da die zugeordneten Profile in anderen Teilen des Rheinischen Schiefergebirges liegen und dort bei derzeit laufenden Kartierungen zum Teil gleiche Bodeneinheiten ausgewiesen werden wie im Hunsrück.

5.2.2 Kartengrundlage und Kartierungsverfahren

Die Art und Weise der Bodenkartierung spielte bei der Auswahl des Kartenwerks als Raumbezugsebene für die Profildaten eine entscheidende Rolle. Das Konzept der BÜK² geht davon aus, daß die Bodenkartierung durch eine Landschaftsgliederung nach geomorphologischen Kriterien rationalisiert werden kann. Danach werden die ausgegliederten Landschaftseinheiten in typische Reliefeinheiten (z.B. Quellmulden im Hochflächenbereich, Verebnungsflächen, Einzelhänge) weiter differenziert, wobei Exposition und Neigung besonders berücksichtigt werden. Diese Auswertung des Reliefs findet auf der Basis der TK 50 statt. Dort werden unter Berücksichtigung vorhandener geologischer Karten möglichst charakteristische (Landschafts-) Catenen ausgewählt, die vergleichsweise engmaschig kartiert werden. Das Abbohren der Profillinien mit dem Pürckhauer-Bohrstock erfolgt in der Regel in Abständen von 100 - 150 m (bei kleinräumigem Reliefwechsel in kürzeren, auf den Hochflächen weiteren Abständen). Die Bohrungen bis 1 m Bodentiefe werden, wenn möglich, durch Geländeaufschlüsse an Wegrändern, Baugruben etc. ergänzt³. Auf diese Weise erhält man einen Überblick über die Verbreitung und Ausprägung der vorkommenden Böden einer Reliefeinheit. Mit Hilfe der Profil-

² Die Ausführungen zum Konzept der BÜK erfolgen in Anhalt an SEMMEL (1989). Für die ausführlichen Diskussionen im Zusammenhang mit der Kartierpraxis und während der Geländearbeit sei an dieser Stelle nochmals Frau Gaby Simon und Herrn Hans-Peter Reck gedankt.

³ Insgesamt wurden in Rahmen der Geländearbeit Hunsrückkartierung mehr als 2000 Bohrungen vorgenommen. Das entspricht einer Dichte von ca. 300 - 400 Bohrungen je TK 50.

schnitte können die gesetzmäßig auftretenden Beziehungen zwischen Relief, Gestein und periglazialen Deckschichten erfaßt werden. Die aus diesem Arbeitsschritt gewonnenen Erkenntnisse werden auf vergleichbare geomorphe Einheiten übertragen. Voraussetzung für diese Übertragung ist die morphogenetisch richtige Einstufung von Reliefeinheiten (SEMMELE 1989).

Die Delinierung der Kartiereinheiten zur flächenhaften Darstellung der Bodenverbreitung wird direkt auf der TK 50 vorgenommen. Einschränkend muß erwähnt werden, daß sowohl Geländearbeit, als auch Delinierung auf den Zielmaßstab 1:200 000 ausgerichtet sind. Das bedeutet, daß zwar auf der TK 50 gearbeitet wird, aber dabei bereits von Anfang an im Blick auf den kleineren Maßstab generalisiert wird. Die Ausscheidung der Kartiereinheit orientiert sich räumlich an der Auflösung der BÜK 200.

5.2.3 Das Untersuchungsgebiet

Der Naturraum Hunsrück liegt im Südwestteil des Rheinischen Schiefergebirges und wird im Norden von der Mosel, im Westen von der Saar, im Osten vom Oberen Mittelrhein und im Süden vom Saar-Nahe-Bergland begrenzt. Der Hunsrück erstreckt sich in seiner Südwest-Nordost-Ausdehnung über eine Länge von ca. 110 km. Seine Breite nimmt von 30 km im Westen auf ca. 50 km im Osten zu. Der Hunsrück ist ein geschlossener, nur an seinen Rändern zerschnittener paläozoischer Faltenrumpf mit variskischem Schicht- und Gebirgsstreichen. Auf den weiten, mehr oder weniger zerschnittenen Hochflächen in einem Höhengniveau von etwa 400 bis 550 m NN kommt Lößlehmeinwehungen eine besondere Bedeutung zu, da diese innerhalb einer sonst vom geologischen Untergrund her relativ homogenen Landschaft die wichtigsten ökologischen Differenzierungen hervorrufen.

Anhand geologischer und geomorphologischer Unterschiede erfolgte eine Gliederung in 3 Landschaftseinheiten. Sie lehnen sich in groben Zügen an die in der „Naturräumliche Gliederung Deutschlands“ ausgewiesenen Haupteinheiten an (BUNDESANSTALT FÜR LANDESKUNDE UND RAUMFORSCHUNG 1962).

Die Quarzitzüge

Die Hunsrückhochflächen werden begrenzt vom langgestreckten, relativ einheitlich aufgebauten Südwest-Nordost streichenden Höhenrücken aus morphologisch hartem Taunusquarzit. Die einzelnen Bauelemente der Quarzitzüge bestehen im Osten aus dem Soonwald, der durch die Taldurchbrüche des Simmern- und Guldenbaches aufgeteilt ist in Großen Soonwald, Lützelsoon und Binger Wald. Östlich schließt sich der Hochwald und Idarwald an. Hier liegen die höchsten Hunsrückerhebungen mit dem Erbeskopf (816 m NN) und dem Idarkopf (810 m NN).

Die Hunsrückhochflächen

Diese Landschaftseinheit umfaßt sowohl die langgestreckten Hunsrückhochflächen, die sich in Südwest-Nordost Richtung trapezförmig bis auf 20 km verbreitern, als auch die vor dem Soonwald bis auf ca. 380 m NN abgesenkte Simmerner Mulde. Die von Tälern in breite Schwellen und besonders im Westen in schmale Riedel zerschnittene Hochfläche besteht aus den tektonisch verstellten Resten der präpleistozänen Rumpffläche. Diese trägt mehr oder weniger mächtige Relikte einer tertiären Verwitterungsdecke aus tiefgründig zersetzten unterdevonischen Tonschiefern. Der Nordostteil dieser Einheit ist gekennzeichnet durch flachwellige Verebnungen und schwach geneigte Riedel. Die Hochfläche senkt sich um Simmern nach Süden sanft zu einer weiten Mulde ab, die von Tälchen stärker in einzelne abgeflachte Riegel, Dellen und Quellmulden zerschnitten wurde.

Stark zerschnittene Randbereiche der Hochfläche

Am Übergang von der Hunsrückhochfläche zu den Tälern der Mosel, der Saar und des Mittelrheins sind die Randhöhen in ein dichtes System von schmalen Spornen und Riedeln, selten breiteren Rücken, als Reste der ehemaligen Hochfläche und ein Netz von 120 bis 200 m tiefen, steil eingekerbten Tälern aufgelöst. Die zerschnittenen Randgebiete bilden die Abdachung zu den Terrassenfluren der Vorfluter.

5.2.4 Die Kartiereinheiten und ihre Böden

Die Böden des Hunsrücks werden auf der BÜK 200 durch 22 Bodengesellschaften erfaßt. Die Landschaft wird in morphogenetisch und morphographisch vergleichbare Einheiten eingeteilt, innerhalb derer ähnliche Bodenverhältnisse zu erwarten sind. Die Kartiereinheiten sind das Ergebnis der bodenkundlichen Landschaftsanalyse und Reliefgliederung. Somit ergeben sich die Kartiereinheiten anhand charakteristischer Merkmalskombination aus

- geologischem Untergrund,
- Deckschichtenaufbau, Lößlehmanteil,
- Geländemorphologie, Geoparameter,
- Bodentypologie, Bodenart, Bodenskelett.

Aus dem Zusammenwirken von Substrat, Boden und Relief ergibt sich die Auswerteeinheit Bodenform als Grundgröße der Kartiereinheit Bodengesellschaft. Den Zusammenhang verdeutlicht Abb. 5.1.

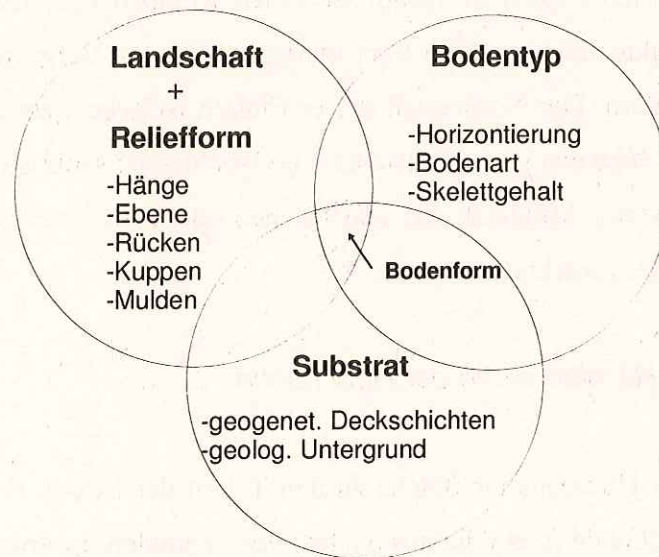


Abb. 5.1: Beziehung zwischen Relief, Substrat und der Bodendecke

Die Einbeziehung durch das Ausgangssubstrat vorgezeichneter, lithogener Merkmale, d.h. die typische Kombination von Bodentypen und Ausgangssubstrat, führt zur Ausscheidung von *Bodenformen*. Bodenformen erfassen daher die ökologischen Eigenschaften der Böden sehr viel besser, als dies bei reiner bodentypologischer Ansprache möglich ist. Während ein Bo-

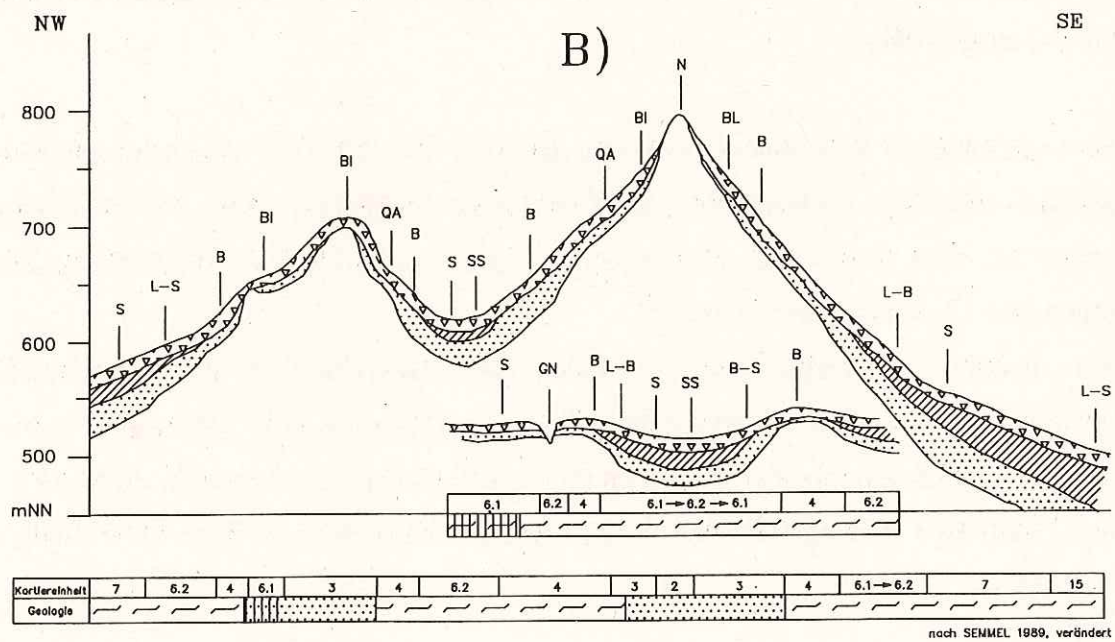
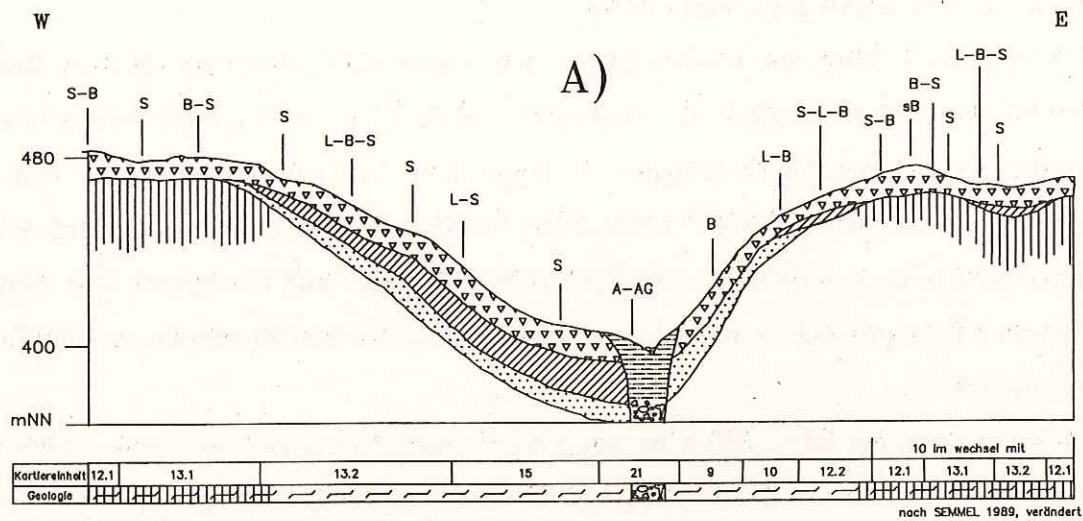
dentyp durch eine typische Abfolge von Horizonten definiert ist, können Bodenformen stratigraphisch durch Lagen gegliedert werden.

Die Vergesellschaftung der Bodenformen nach allgemeinen Gesetzmäßigkeiten führt zur nächst höheren Ordnungseinheit, der *Bodengesellschaft*. Unter Bodengesellschaft wird die gesetzmäßige Verteilung der Bodentypen als Folge ihrer Abhängigkeit von den periglazialen Deckschichten verstanden (FRIED 1984). Räumlich benachbarte Bodenformen vergleichbarer Reliefsysteme einer Landschaft (z. B. Braunerde-Pseudogley und Pseudogley über Tonschiefer schwach geneigter Hänge und Mulden) werden zu einer Boden(-formen-)gesellschaft zusammengefaßt.

Die Kartiereinheit der BÜK 200 wird durch die Bodenform mit dem in ihrem Verbreitungsgebiet größten Flächenanteil definiert (Leitboden). Einige Kartiereinheiten weisen zwei Leitbodenformen (Auswerteeinheiten) mit hohen Flächenanteilen auf, deren Schichtenaufbau unterschiedlich ist und die eng miteinander vergesellschaftet sind. Sie wurden zwar kartographisch nur als eine Einheit erfaßt (= Bodenformengesellschaft oder Bodengesellschaft), jedoch getrennt ausgewertet.

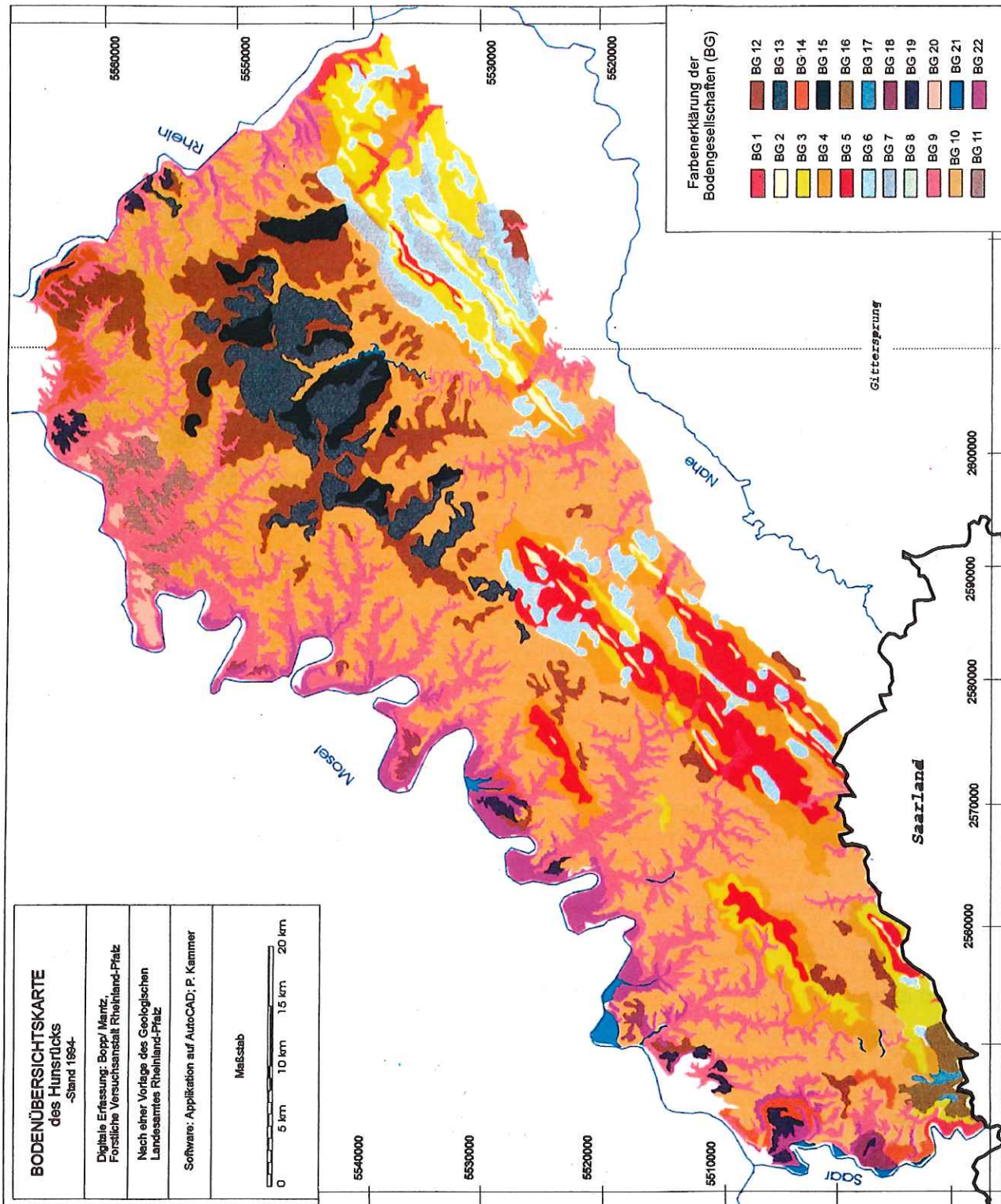
Die Anordnung der Kartiereinheiten veranschaulicht Abb. 5.2. Dort ist anhand schematischer Geländeschnitte die Bodenabfolge der Tonschiefer-Hochflächen bzw. der Quarzitzüge im Kontext mit dem anstehenden geologischen Ausgangsgestein und der reliefabhängigen Ausprägung der Deckschichten dargestellt.

Eine ausführliche Beschreibung der Böden der Kartiereinheiten, ihrer vorherrschenden Substrate, ihres räumlichen Verbreitungsgebietes im Hunsrück, ihrer Flächengröße sowie der Anzahl der je Kartiereinheit vorhandenen Profile befindet sich im Anhang 4. In Karte 5.1 sind die 22 kartierten Bodengesellschaften des Untersuchungsgebiets in ihrer Verbreitung farblich dargestellt.



LEGENDE		
Deckschichten	Geolog. Untergrund	Bodentypen
Hauptlage	tertiär zersetzter Tonschiefer	A - Auenboden
Mittellage	Tonschiefer	AG - Auenregosol
Basislage	Kies	B - Braunerde
Auesediment	Quarzit	BI - Lockerbraunerde
	tertiär zersetzter Quarzit	sB - pseudovgl. Braunerde
		GN - Naßgley
		L - Parabraunerde
		N - Ranker
		S - Pseudogley
		SS - Stagnogley
		QA - Anmoorquellengley

Abb. 5.2: A) Schematisierte Bodenabfolge in asymmetrischen Tälern der Tonschiefer-Hochflächen - Unter Wald - (nach SEMMEL 1989, verändert)
 B) Schematisierte Bodenabfolge der Quarzitzüge (nach SEMMEL 1989, verändert)
 Die Höhenangaben (ü. NN) beziehen sich nur auf die Geländeoberfläche. Der Deckschichtenaufbau ist aus Gründen der Lesbarkeit vergrößert dargestellt



Karte 5.1: Die Bodenübersichtskarte des Hunsrücks

5.3 Methoden

5.3.1 Stratifizierung der Bodenprofile

Um die Kartiereinheiten mit Hilfe bodenchemischer Analysedaten charakterisieren zu können, mußten die 337 Bodenprofile in die Systematik der Bodengesellschaften der Bodenübersichtskarte Hunsrück (BÜK 200) eingeordnet werden. Die auf der Grundlage der Kartiereinheiten klassifizierten Bodenprofile ermöglichen es, die Profile je Bodengesellschaft zu Stichprobenkollektiven zusammenzufassen und zu vergleichen.

Für die Zuordnung der 337 Profile zu den Kartiereinheiten konnten die Kartierer der Bodenübersichtskarte selbst gewonnen werden⁴. Durch ihre Ortskenntnis und Erfahrung wurde eine hohe Qualität der Zuordnung gewährleistet.

Die Zuordnung erfolgte in einem ersten Schritt anhand der Interpretation pedologischer Profilmerkmale.

Als wesentlich zur Ableitung der Bodenform erwiesen sich Angaben

- zum Bodentyp,
- zur Horizontierung,
- zum Ausgangssubstrat,
- zur Bodenart,
- zum Skelettgehalt und
- zu einigen Geoparametern (Höhe, Exposition, Neigung).

Bei der Interpretation war die Einordnung des Solums in die Stratigraphie der periglazialen Deckschichten (Hauptlage, Mittellage, Basislage)⁵ von besonderer Bedeutung. Das war weitgehend anhand der Profildaten auch nachträglich problemlos möglich, wenn die Bodenartenschichtung deutlich zu erkennen war. Schwieriger zu beurteilen waren die Profile, deren Horizonte nur geringfügige Unterschiede hinsichtlich der Textur und des Skelettgehalts aufwiesen. Solche Profile konnten oft aufgrund Geländeerfahrung und Ortskenntnis der Kartierer sowie Ortsbegehungen dennoch eingeordnet werden. In Zweifelsfällen unterblieb eine Zuordnung.

⁴ Die Endbearbeitung der BÜK 200 Hunsrück wurde im Auftrag des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz und unter Anleitung von Herrn Dr. Spies von Frau Dipl.-Geographin G. Simon und Herrn Dipl.-Biologen H.-P. Reck durchgeführt. Letztgenannten sei für die fachkundige Zuordnung der Bodenprofile gedankt.

⁵ Zur Bedeutung pleistozäner Deckschichten für die Bodenbildung wird auf die einschlägige Literatur verwiesen. Lagenbegriffe und Definitionsmerkmale sind in SCHILLING und SPIES (1991) sowie ALTERMANN (1993 a, 1993 b) publiziert. Zur Stellung der Deckschichten für die Bodenkunde wird auf FRIED (1984), SABEL et al. (1987), BLUME (1984), FELIX-HENNINGSSEN (1991), SEMMEL (1985, 1989), VÖLKELE (1992, 1993, 1994, 1995) hingewiesen.

Im nächsten Arbeitsschritt wurden die interpretierten Profile aus dem Untersuchungsgebiet anhand ihrer Lagekoordinaten in die Manuskriptkarten (Maßstab 1:50 000) des Geologischen Landesamtes eingetragen. Daraufhin wurde überprüft, ob die anhand ihrer Profilmerkmale ausgewiesene Bodeneinheit mit der an der jeweiligen Stelle kartierten Einheit übereinstimmt. War dies nicht der Fall, wurde die Zuordnung des jeweiligen Profils in die Bodeneinheit nochmals sorgfältig überprüft. Hierzu wurden ergänzend die bodenchemischen Analysedaten hinzugezogen. Ausschlaggebend für die Zuordnung zur jeweiligen Bodeneinheit waren in jedem Fall die Profilcharakteristika, nicht die Lage des Profils.

In einem weiteren Schritt wurden Profile einer Kartiereinheit, deren bodenchemische Analysedaten im Vergleich zu ihrem Kollektiv stark abwichen, nochmals im Blick auf ihre Zuordnung kontrolliert und Fehlzuweisungen ggf. korrigiert.

5.3.2 Digitalisierung der Manuskriptkarten der BÜK 200 Hunsrück

Um eine übersichtliche und flexible kartographische Darstellung der Untersuchungsbefunde und gegebenenfalls deren Verschneidung mit anderen Flächeninformationen zu ermöglichen, wurden die Kartiereinheiten der Manuskriptkarten des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz im Maßstab 1:50 000 digitalisiert.

Zur Erfassung der geometrischen Elemente (Punkte, Linien und Flächen) müssen vor Beginn der Digitalisierung technische Vorschriften und Regeln definiert werden, die schließlich einen datenbankgesteuerten Zugriff auf die Flächen der Kartiereinheiten ermöglichen. Dazu wurde eine Programmroutine entwickelt, die die Nachbarschaftsbeziehungen von Linien und Flächen (topologische Beziehung) steuert und die Informationen darüber als Attribute in einer relationalen Datenbank speichert. Jede einzelne Linie wird beispielsweise durch die Legendenkennziffer der rechten bzw. linken Teilfläche spezifiziert. Voraussetzung dazu ist, daß die delinierten Grenzen der Kartiereinheiten segmentweise erfaßt werden, d.h. sie werden in überschaubare, logisch verarbeitbare und inhaltlich eindeutige (unteilbare) Liniensegmente zerlegt. Erst die Erfassungseinheit „Liniensegment“ ist exakt definiert und kann mit Attributen versehen und rechentechnisch abgerufen werden.

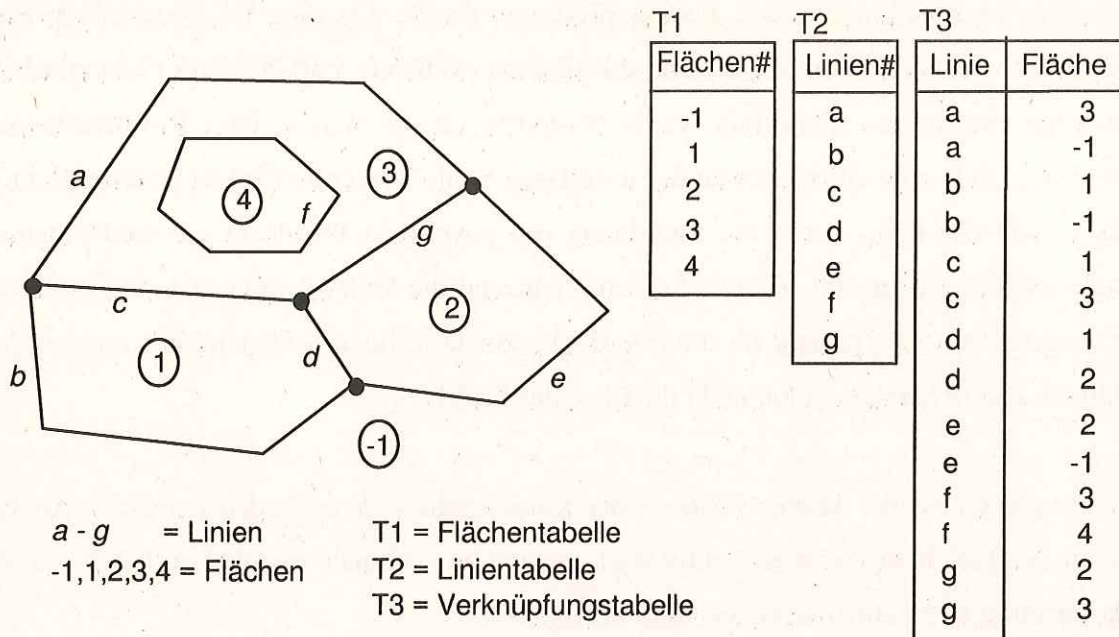


Abb. 5.3: Das topologische Datenmodell. Die Linien-Flächen-Beziehungen werden in relationalen Tabellen (T1,T2,T3) gespeichert (nach BOPP und KAMMER 1994).

In obiger Abbildung ist zu erkennen, daß jede Linie $L \in \{a, b, \dots, g\}$ durch zwei angrenzende Flächen $(F1, F2) \in \{1, 2, 3, 4, -1\}$ charakterisiert ist (wobei -1 beispielsweise eine nicht kartierte Fläche bezeichnet); umgekehrt kann eine Fläche F dargestellt werden als eine Menge $M_L = \{L_1, L_2, \dots, L_n\}$ von Linien, die sie begrenzen. Dabei stellt im Beispiel die Fläche 4 mit der zugehörigen Linie f einen Sonderfall dar: die umschlossene Fläche wird durch genau eine Linie gebildet, sie ist eine "Insel".

Linien und Flächen werden in zwei eigenen Tabellen gespeichert (T1, T2). Um die Linien-Flächenbeziehungen darstellen zu können, wird eine Verknüpfungstabelle (T3) benötigt, in der für jede Linie genau zwei Flächeneinträge existieren. Die derart erfaßte Datengrundlage erlaubt eine datenbankorientierte Selektion geometrischer Zeichnungselemente (BOPP und KAMMER 1994).

Bei der Formulierung der Erfassungsvorschriften zur Digitalisierung der Kartenvorlagen wurden weiterhin insbesondere berücksichtigt:

- redundanzfreie Datenspeicherung (Grenzlinien benachbarter Flächen werden nur einmal erfaßt),
- blattschnittfreies Anfügen weiterer Kartenblätter (Kalibrierung der Kartenvorlagen im Gauß-Krüger-Koordinatensystem),

- problemloses Erweitern der Tabellen,
- einfaches Fortschreiben und Editieren der Geometriedaten und
- rationale Flächenberechnung.

Die Digitalisierung der Kartenvorlagen erfolgte mit dem Softwarepaket AutoCAD Version 12.0 (AUTODESK 1993). Die zusätzlichen Programmodule wurden mit der Programmiersprache Lisp (AutoLISP, AUTODESK 1993) erstellt. Als Datenbankmanagementsystem (DBMS) diente DBASE (BORLAND 1993). Die Datenbankabfragen wurden mit AutoCAD-ASE (AutoCAD-SQL-Extention) durchgeführt.

5.3.3 Konzept zur Bewertung von Bodenprofilaten

Der chemische Bodenzustand der Kartiereinheiten wird beurteilt auf der Grundlage bodenchemischer Analysedaten anhand der bodenökologischen Einschätzung

- des vorherrschenden Base/Säure-Zustands,
- der Nährelementausstattung und
- der Durchlässigkeit.

Mit Hilfe der gleichnamigen *Indikatoren* (Versauerungsstatus, Nährelementstatus, Durchlässigkeit) soll die Empfindlichkeit der Böden hinsichtlich fortschreitender Bodenversauerung und Engpässen in der Nährelementbereitstellung bewertet werden.

Da die Ausprägung der Indikatoren nicht unmittelbar „gemessen“ werden kann, ist jeder Indikator in Kriterien untergliedert, die Auskunft über seine Eigenschaften geben. Die Indikatoren bündeln Einzeldaten, transformieren sie in ein übergeordnetes Wertesystem und erleichtern damit die Gebietsbewertung.

Die Auswahl der Merkmale⁶ zur Definition der Indikatoren stützt sich im wesentlichen auf Elastizitätsparameter aus dem Bereich der Waldökosystemforschung. Die entsprechende Literatur kann den Quellenhinweisen bei der Beschreibung der Merkmale im einzelnen entnommen werden (vgl. Abschnitt 5.3.4).

⁶ Die Begriffe Merkmale und wertgebende Kriterien werden synonym gebraucht.

Zur Einordnung der Meßdaten in ein Wertesystem wurden sie anhand von Kennwerten (Referenzdaten) numerisch klassifiziert und damit einheitlich ordinal skaliert. Dazu wurden 5- bzw. 6-stufige Wertigkeitsskalen mit Wertprädikaten gewählt (Zustands-Wertigkeits-Relationen), in welchen die ökologische Bewertung umso günstiger ausfällt, je kleiner ihr Zahlenwert ist (z.B. 1=sehr günstig, 2=günstig, 3=mittel, 4=ungünstig, 5=sehr ungünstig).

Die Klassifizierung der Meßdaten anhand eingeführter Kennwerte hat generell den Vorteil, daß die bei bodenchemischen Analysedaten systemimmanente hohe Variabilität möglicherweise „gepuffert“ wird, weil die Daten nicht nach ihrem absoluten Meßwert, sondern nach ihrem ökologischen Wert beurteilt werden.

Das Bewertungsverfahren beruht auf einfachen Punkteschlüsseln. Die Zusammenführung der einzeln klassifizierten Merkmale zu übergeordneten Wertmaßstäben (Gesamtwerte) erfolgt auf arithmetischem Wege mittels Summen- bzw. Durchschnittsbildung, ergänzt durch ein System von Zu- bzw. Abschlägen. Die Einzelmeßwerte der ausgewählten Kriterien werden somit zu ökologisch interpretierbaren Gesamtwerten verdichtet (Nährelementkennziffer (NEKZ), Versauerungskennziffer (VSKZ)) und durch ihre Verknüpfung die Profilsensitivitätskennziffer (PSKZ; vgl. Abb. 5.4) hergeleitet.

Speziell im Bereich der Untersuchung und Bewertung von Böden ist zu berücksichtigen, daß sich die Bodeneigenschaften mit der Bodentiefe, bedingt durch natürliche und anthropogene Ursachen, individuell ändern. Bei einigen Merkmalen (pH-Wert, Basensättigung) werden deshalb mehrere Tiefenbereiche einbezogen (Tiefenbereiche 1 - 3, vgl. Kap. 2.2). Damit liegen in aller Regel je Variable und Profil drei Meßwerte vor, die zu einem Kriteriumswert kombiniert werden.

In Abbildung 5.4 sind die verwendeten Indikatoren im Kontext mit den Merkmalen und ihrer Verknüpfungsart dargestellt. Die exakten Faktoren für die Gewichtung der Tiefenbereiche sowie die Größenwerte für Zu- und Abschläge werden im Rahmen der Beschreibung der Merkmale im Anschluß vorgestellt und begründet. Die Indikatoren *Versauerungsstatus* und *Nährelementstatus* haben durch identische Wertebereiche (0-7) das gleiche Gewicht. Der Indikator *Durchlässigkeit* modifiziert die Summe aus den anderen beiden Indikatoren (Wertebereich 0-14) durch Abschläge entsprechend seiner Klassifizierung (Wertebereich 0 bis -2). Die Profilsensitivitätskennziffer kann infolgedessen Werte zwischen -2 und 14 annehmen.

Die arithmetische Verknüpfung und Gewichtung der Merkmale und Indikatoren erfolgt rechnergestützt. Dazu werden die Regeln der Bewertungsvorschrift programmtechnisch⁷ umgesetzt. Damit ist der Bewertungsvorgang transparent, d.h.

- eindeutig und
- nachvollziehbar.

Die gewählten „Einstellungen“ können für andere Fragestellungen durch andere Bewertungsvorschriften modifiziert werden. Das Stichprobenkollektiv kann problemlos erweitert werden.

Von den 337 Bodenprofilen des Gesamtkollektivs konnten programmgesteuert nur 285 Profile bearbeitet werden. Für 52 Profile (= 15 %) konnten nicht für alle 3 Tiefenbereiche die Kennziffern automatisiert berechnet werden. Für diese Fälle wurden die zur Ermittlung des Gesamtwertes benötigten Kennziffern gutachterlich aus der Beurteilung der Daten des gesamten Bodenprofils bestimmt. Vielfach wurde die Schätzung der fehlenden Daten durch einen eindeutigen Tiefengradienten erleichtert. Da zudem der Anteil der durch Schätzung ergänzten Datenreihe am Gesamtkollektiv vergleichsweise gering ist, dürfte die Aussagefähigkeit durch mögliche Fehleinschätzungen nicht wesentlich beeinträchtigt worden sein.

Die *Gebietsbewertung* und ggf. *Gruppierung* ähnlich bewerteter Kartiereinheiten erfolgt durch Einbeziehen sämtlicher Profilkennziffern einer Befundeinheit und die Bewertung ihrer Verteilungseigenschaften, insbesondere anhand der häufigsten Werte (25- bis 75-Perzentil; Box in der BOX-Plot-Darstellung, vgl. Kap. 4.3). Durch die große Streuung der Kennziffern der Befundeinheiten und infolge häufiger Überlappungsbereiche in den Kennziffernausprägungen erscheint eine starre, beispielsweise äquidistante Einteilung in „Sensitivitätsgruppen“ nicht sinnvoll. Daher wird dieser letzte Verfahrensschritt auch nicht rechentechnisch durchgeführt. Vielmehr werden die Potentiale der Befundeinheiten aus der synoptischen Betrachtung der Bewertungsergebnisse abwägend hergeleitet.

⁷ Die Programmierung der Prozeduren sowie die graphische Aufbereitung der Ergebnisse wurde mit Hilfe des Statistikprogrammpakets SAS (1993, Version 6.08) durchgeführt.

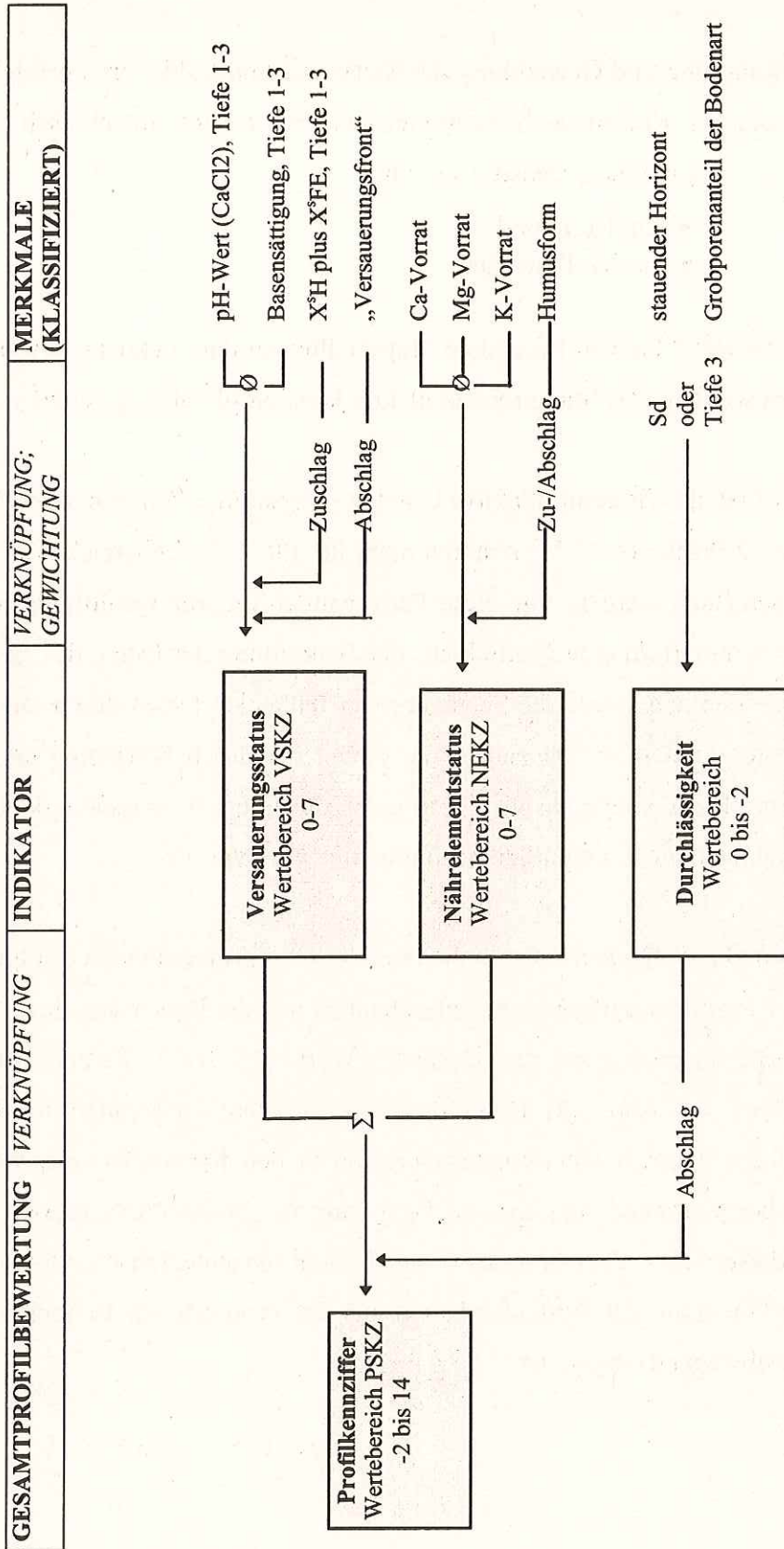


Abb. 5.4: Verwendete Indikatoren, deren Merkmale und Verknüpfungsart
 (Ø = Durchschnittswerte, Σ = Summenwert)

5.3.4 Begründung für die Auswahl und Gewichtung der wertgebenden Kriterien

Im folgenden wird die Auswahl, die Klassifizierung und Gewichtung der Merkmale, die zur Bewertung der Bodenprofilaten herangezogen wurden, im einzelnen ausführlich dargestellt. Im Mittelpunkt des Interesses steht dabei die Offenlegung der Verfahrensschritte zur Nachvollziehbarkeit des Bewertungsvorganges.

5.3.4.1 Versauerungsstatus

Der Begriff Bodenversauerung umschließt einen Komplex verschiedener chemischer Vorgänge, die sich nicht mit einem einzigen Meßwert konkret definieren lassen.

Zur Beschreibung des aktuellen Versauerungszustandes der Böden wurden die Kenngrößen *pH-Wert* und *Basensättigung* gewählt. Sie bilden den Kern der Bewertung des Versauerungsstatus. Als zusätzliche Kriterien werden die *Protonen- und Eisenanteile an der effektiven Austauschkapazität* (AKE) in Form von Zuschlägen und die Lage der *Versauerungsfront* im Bodenprofil in Form von Abschlägen herangezogen. Tabelle 5.1 stellt alle Merkmale in einer Übersicht dar. Dort sind auch die zur Klassifizierung herangezogenen Kennwerte (Referenzdaten) und die den Klassenwerten zugeordneten Wertprädikate angegeben.

Die zur Bewertung ausgewählten drei Tiefenbereiche (vgl. Kap. 2.2) werden von oben nach unten absteigend gewichtet (Tab. 5.1: Tiefe 1: Faktor 1,66; Tiefe 2: Faktor 1; Tiefe 3: Faktor 0,33) und nach der Verrechnung mit dem jeweiligen Klassenwert gemittelt. Dieser Tiefenreduktion liegt die Überlegung zugrunde, daß mit der Tiefe die Durchwurzelungsintensität und damit die Bedeutung des jeweiligen Tiefenbereichs für das Aufnahmevermögen der Vegetation abnimmt. Bezüglich der Gesamtbewertung der Bodenprofile soll darüberhinaus einer Überwertung von Böden entgegengesteuert werden, die oberflächennah stark versauert sind, unterhalb des intensiv durchwurzelten Bodenbereichs jedoch sehr hohe Nährelementvorräte aufweisen. Während bezüglich des Versauerungszustands die Oberböden stärker gewichtet werden, liegt die Gewichtung bei der Beurteilung der Nährelementvorräte von 0 - 90 cm Bodentiefe, bedingt durch einen z.T. deutlichen Anstieg der Vorräte (z.B. durch S_d -Horizonte) im untersten Bodenkompartment, eher im Unterboden.

MERKMALE:	Referenzdaten	Klassenwert	Bewertungsstufen (Gewichtungsfaktoren)	
			Tiefe 1 (x 1,66), 2 (x 1), 3 (x 0,33)	
pH(CaCl₂): (nach ULRICH et al. 1984, verändert)	>=5,0 4,2 - <5,0 4,0 - <4,2 3,8 - <4,0 3,2 - <3,8 <3,2	1 2 3 4 5 6	sehr günstig günstig mäßig günstig ungünstig sehr ungünstig äußerst ungünstig	
			Tiefe 1 (x 1,66), 2 (x 1), 3 (x 0,33)	
Basensättigung : (Forstliche Standortaufnahme 5. Auflage, in Vorbereitung)	>= 70 % 50 - <70 % 30 - <50 % 20 - <30 % 7 - <20 % < 7 %	1 2 3 4 5 6	sehr hoch hoch mittel mäßig gering sehr gering	
				Zuschlag
XsH+XsFe: (nach ULRICH et al. 1984 und Forstliche Standortaufnahme 5. Auflage, in Vorbereitung)	Tiefe1 >10% Tiefe2 >5 % Tiefe3 >2 %		Tiefe 1 erfüllt: ungünstig Tiefe 1+2 erfüllt: sehr ungünstig Tiefe1+2+3 erfüllt: äußerst ungünstig und: XsFe > 0	0,33 0,66 1,0
				Abschlag
'Versauerungsfront': (in Anhalt an ULRICH und MALESSA 1989)	0 - <= 30 cm 30 - <= 60 cm 60 - <= 90 cm 90 - <=120cm > 120 cm	1 2 3 4 5	günstig mäßig günstig mittel ungünstig sehr ungünstig	- 1 - 0,75 - 0,5 - 0,25 0

Tab 5.1: Ökologisch klassifizierte Kriterien zur Bewertung des Indikators 'Versauerungsstatus'

Im folgenden werden die zur Beschreibung des Versauerungsstatus ausgewählten Merkmale im einzelnen vorgestellt:

a) pH-Wert

Nach MEIWES et al. (1984) ist der pH-Wert einer Bodenlösung ein zeitlich und örtlich variabler Meßwert, der von der Stärke der im Boden vorhandenen Säuren bzw. sich bildenden Säuren oder Basen bestimmt wird. Er ist somit das Ergebnis der im Boden vorhandenen Säure-/Base-Verhältnisse und steuert Verwitterungsintensität und Lösung (Verfügbarkeit) von Nähr- und Schadstoffen, erfaßt jedoch nicht die im Boden vorhandene Säuremenge (PAHLKE 1992). Als einziges Kriterium zur Beurteilung des Base/Säure-Zustands reicht deshalb der pH-Wert nicht aus, denn Säurezufuhr kann auch zu stofflichen Veränderungen im Boden führen, ohne daß sich der pH-Wert merklich ändert.

Der pH-Wert kann in wäßriger Suspension oder in Salzlösung (z.B. CaCl_2) gemessen werden. Bei der Messung in Salzlösung wird ein Teil der in den Austauschern festgelegten Azidität (H^+ , Al^{3+}), durch Austausch freigesetzt und dadurch der pH-Wert in der Regel erniedrigt. Nach ULRICH et al. (1984) ist der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ deshalb ein Maß für die aktuelle Protonenkonzentration in der Bodenlösung zur Zeit der Probenahme, während der $\text{pH}(\text{Salz})$ die Säurestärke erkennen läßt, die bei einer vorhergegangenen Säurebelastung schon einmal mindestens erreicht war und bei einer künftigen Salz- oder Säurebelastung wieder erreicht werden kann. Nach MEIWES et al. (1984) befindet sich der Boden gerade in einer Phase stärkerer Versauerung, wenn $\text{pH}(\text{Salz})$ und $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ in sauren Böden nahe beieinander liegen.

Auf eine Säurebelastung reagieren Böden mehr oder weniger elastisch. Durch Eintrag und bodeninterne Freisetzung von Säuren kann eine sequentielle Folge verschiedener Pufferreaktionen eingeleitet werden, bei der zunächst Karbonate, später Silikate, Oxide und Hydroxide und in einem weiteren Bereich auch organische und anorganische Austauscher zur Säurepufferung dominierend beitragen. Die Wirkungsweise eines Puffersystems, das H^+ -Ionen abpuffert, besteht darin, daß eine Base (Protonenakzeptor) bei einer Protonenzufuhr diese aufnimmt und so die Protonenkonzentration in der Lösung konstant hält, solange die Menge dieser Base ausreicht (MEIWES et al. 1984). Die pH-Bereiche, innerhalb derer bestimmte Puffersubstanzen im Boden dominieren, werden auch Pufferbereiche genannt.

Nach FEGER (1994) überlagern sich im Profil Pufferbereiche dynamisch. Eine Ausscheidung streng pH-abhängiger Pufferbereiche in Böden erscheint daher problematisch. Besonders wichtig sind in diesem Zusammenhang die Umsetzung und Verlagerung der organischen Substanz. Auch ist zu beachten, daß im Einzelfall nicht immer ein Gleichgewicht zwischen pH-Werten und den dominierenden Pufferreaktionen bestehen muß (vgl. PAHLKE 1992).

Die Zuordnung zu Pufferbereichen sollte anhand von pH-Werten der Bodenlösung erfolgen. Bedingt durch die Bodentrocknung ist der $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ der Bodenlösung aber problematisch, weil schlecht reproduzierbar. Zudem unterliegt er zeitlich starken Schwankungen. Hilfsweise wurde deshalb zur Klassifizierung der pH-Werte, in Anhalt an die in ULRICH et al. (1984) beschriebenen Pufferbereiche, der $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ -Wert herangezogen.

b) Sättigung des Austauschers mit kationischen Nährelementen (sog. Basensättigung)

Eine weitaus verlässlichere Größe für bodenchemische Vergleichsuntersuchungen als der pH-Wert allein, der starken jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen ist, sind Kapazitätsparameter wie die Austauschkapazität, die Anteile der leicht mobilisierbaren, austauschbaren Ka-

tionen und daraus abgeleitete Größen wie die Basensättigung. Die effektive Austauschkapazität (AKe) berechnet sich aus der Summe der Ionen-Äquivalente der einzelnen Kationen (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Al^{3+} und H^+). Nach MEIWES et al. (1984) stehen die austauschbaren Kationen in einem Lösungsgleichgewicht mit dem Bodenwasser und lassen aufgrund der Zusammensetzung der Kationenbelegung der Austauscher Schlüsse auf das chemische Verhalten der Lösungsphase zu. Aus ökologischer Sicht stellen die austauschbaren Kationen demnach den mobilisierbaren Kationenvorrat im Boden dar. Der absolute Gehalt dieser Kationen ist für eine Beurteilung der ökologischen Wirksamkeit weniger aussagekräftig als ihr prozentualer Anteil an der Austauschkapazität (sog. X^s -Werte), da bei höherer AKe auch höhere Gehalte der verschiedenen Kationen vorliegen (MEIWES et al. 1984).

Der prozentuale Anteil kationischer Nährelemente (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) an der AKe wird vereinfachend als Basensättigung bezeichnet. Der Summenparameter Basensättigung ist deshalb nach ULRICH (1995) als bodenchemische Größe besonders geeignet, weil er sowohl als Zielgröße für die waldbauliche Maßnahmenplanung als auch wegen der Beziehung zum Base/Säure-Zustand der Bodenlösung eine hohe ökologische Aussagekraft hat. Abnehmende Basensättigung bewirkt demnach nicht nur über die Verluste an kationischen Nährstoffen und Ionenantagonismen eine Verminderung der Elastizität, sondern letztlich durch Ausscheiden der Bodenwühler aus der Bodenfauna und verringerte bakterielle Aktivität auch eine Verlangsamung der Streuzersetzung (ULRICH 1991). Diese Entkopplung im Stoffkreislauf verschlechtert nachhaltig die Nährstoffversorgung der Bäume.

JANSEN et al. (1994) scheiden „Kalk“-Zielvorgaben auf der Grundlage einer ökologischen Datenbasis aus. Mit Hilfe der Basensättigung und der Humusform wird versucht, die bodenökologische Nachhaltigkeit der Waldflächen zu charakterisieren und für ein Regelsystem zur Kalkung praktikabel zu machen. Ausgehend von den Standortsansprüchen der verschiedenen Baumarten wird den Betriebszieltypen ein Sollwert der Basensättigung und der Humusform zugeordnet.

In Rheinland-Pfalz und Sachsen ist die Basensättigung eine wesentliche Kenngröße zur Untersuchung der Notwendigkeit und Verträglichkeit von Bodenschutzkalkungsmaßnahmen für Waldökosysteme bei unterschiedlichen Standortverhältnissen (Neufassung des Merkblattes Bodenschutzkalkung der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz, 2. Auflage in Vorbereitung; Merkblatt für die Bodenschutzkalkung der Sächsischen Landesanstalt für Forsten, 1995).

Die Klassifizierung der Basensättigung erfolgt nach den Elastizitätskriterien gegenüber Säurebelastung im Boden in Anhalt an die in der FORSTLICHEN STANDORTSAUFNAHME (5. Auflage in Vorbereitung) und von MEIWES et al. (1984) angegebenen Rahmenwerte. Für die Stabilität des Bodens ist entscheidend, wie weit die Entbasung in die Tiefe vorgedrungen ist. Oberflächlich entbastete Böden können über Tiefwurzler regenerieren (ÖSTERREICHISCHE WALDBODENZUSTANDSINVENTUR 1992). Diesem Sachverhalt wird durch die Bewertung der Basensättigung in ausgeschiedenen Tiefenbereichen (TB1 bis TB3, bzw. A-, B- und C-Horizonte) Rechnung getragen. Die Gewichtung der Tiefenbereiche erfolgt wie beim pH-Wert.

c) Protonen- und Eisensättigung der Austauschker (X^sH und X^sFe)

Übersteigt die Protonen - und Eisensättigung in A-Horizonten 5 % und in humusarmen B-Horizonten 2 %, so ist dies nach ULRICH et al. (1984) ein Hinweis darauf, daß praktisch keine Pufferung im Boden mehr stattfindet, d.h. daß jede Säurebelastung nahezu unverändert an den Unterboden weitergegeben wird (MEIWES et al. 1984, BUBERL et al. 1994). Eine sehr hohe Protonen - und Eisensättigung kann daher ein Hinweis auf akute Versauerungsvorgänge sein (ULRICH et al. 1984).

Zur besseren Differenzierung der Protonen - und Eisensättigung (X^sH + X^sFe, vgl. Tab. 5.1) wurden die von ULRICH et al. (1984) eingeführten Kennwerte um die Klasse X^sH plus X^sFe über 10 % ergänzt. Eine Vorauswertung zeigte, daß selbst dieser hohe Wert noch von ca. 50 % aller A_h-Horizonte (bzw. TB 1) überschritten wird. Die Bewertung dieses Merkmals in Form von Zuschlägen folgt der Überlegung, daß, je größer die Mineralbodentiefe ist, für die diese Kennwerte zutreffen, um so geringer auch die Elastizität des Bodens ist. Dementsprechend wird die Versauerungskennziffer um den Betrag 0.33, 0.66 oder 1 erhöht (Klassifizierung vgl. Tab. 5.1).

Die bei einer Vielzahl der Profile hohe Eisen- und Protonensättigung in allen Tiefenbereichen erscheint jedoch unplausibel. Es hat sich gezeigt, daß in vielen Fällen Eisen an der Summe der Protonen - und Eisensättigung kaum oder nicht beteiligt ist. Das läßt eine durch das Perkulationsverfahren bedingte Überschätzung der freien Protonen vermuten. Die Protonen werden nach MEIWES et al. (1984) durch pH-Messung vor und nach der Perkulation und Berechnung der sorbierten Protonenmenge auf der Grundlage der pH-Differenz und der Al-

Konzentrationen im Perkolat berechnet. Deshalb wird dieses Kriterium beim vorliegenden Verfahren, im Falle des Überschreitens der jeweiligen Klassengrenzen, nicht berücksichtigt, wenn $X^s\text{Fe}$ gleich 0 ist. Ebenso unterbleibt eine Wertung, wenn der entsprechende Tiefenbereich des Mineralbodens sehr humusreich ist (TB 1 Humusgehalt > 30 %, TB 2 Humusgehalt > 15 %).

d) Versauerungsfront

Nach ULRICH und MALESSA (1989) ist die „Versauerungsfront“ definiert als die Umkehrzone hoher Sättigung mit Kationsäuren in eine hohe Sättigung mit Kationbasen. Es ist plausibel anzunehmen, daß die Elastizität des Bodens hinsichtlich Säuretoxizität und Nährelementbereitstellung um so geringer ist, je tiefer die Versauerungsfront im Bodenkörper liegt.

Der Begriff und die Modellvorstellung einer sukzessive in die Tiefe vordringenden Versauerungsfront ist jedoch aufgrund unterschiedlicher Auffassungen zur Säurequelle und zum Tiefentransport der Kationsäuren umstritten. Während ULRICH und MALESSA (1989) die Ursachen der Tiefenversauerung zweifelsfrei in der sauren Deposition sehen (vgl. auch MALESSA 1995), können nach FEGER (1993) auch ältere Bodenbildungsprozesse und ökosystemintern gebildete Mineralsäuren die Versauerung über das durchwurzelte Solum in tiefere Bodenschichten vorantreiben. Auch weist FEGER (1993) auf die Bedeutung der Nutzungsgeschichte für den Base/Säure-Zustand hin. Deshalb würde die Annahme eines sehr jungen, vertikal gerichteten Versauerungsprozesses zur Überschätzung des Depositionseinflusses führen. Nach BUBERL et al. (1994) ist eine nutzungsbedingte Versauerung jedoch aufgrund der geringen „Reichweite“ organischer Säuren hauptsächlich auf den Oberboden beschränkt. Nach HILDEBRAND (1990) dürften deutliche Versauerungserscheinungen unterhalb der Rhizosphäre, wo organische Säuren als Protonenlieferanten von geringer Bedeutung sind, auf mobile Anionen starker anorganischer Mineralsäuren zurückzuführen sein, die hauptsächlich aus der atmosphärischen Deposition stammen. Dagegen kommt BENECKE (1995) zu der Ansicht, daß für die Erklärung der bis zur Tiefenlage der Versauerungsfront akkumulierten Säuremengen zusätzlich zur Deposition eine weitaus wirksamere, ökosysteminterne Säurebildung stattgefunden haben muß. Als Ursache kommen präholozäne Verwitterungsrelikte, eine jahrtausendelange Einwirkung der Kohlensäure sowie Stoffkreislaufentkoppelungen durch Nutzungsänderungen und Übernutzung in Betracht. Die derzeitige Tiefenlage der Versauerungsfront ist demnach nicht ausschließlich depositionsbedingt, sondern das Resultat einer Über-

prägung des bereits vorversauerten Substratbereichs. Die Deposition hat die Versauerungsausbreitung wahrscheinlich wesentlich beschleunigt.

Der Begriff Versauerungsfront wird im Rahmen dieser Untersuchung rein faktisch verwendet. Genetische Aspekte werden dabei außer acht gelassen.

Bei der Lokalisierung der Versauerungsfront wurden die bodenchemischen Analysen aller Bodenprofile überprüft auf

- eine markante Umkehr zwischen hohen Anteilen an Kationbasen (ca. > 80 %) und hohem Anteil an Aluminium,
- einen maximalen Mg-Gehalt unterhalb der Versauerungsfront (VF) und
- einem pH-Wert im Bereich der Versauerungsfront zwischen ca. pH 4,0 und pH 4,4 und unterhalb der VF über pH 5,0.

Entsprechend ihrer Tiefenlage im Solum wurde die VF klassifiziert (Klassenweite je 30 cm, vgl. Tab. 5.1). In die Klasse 5 wurden alle Profile eingeordnet, deren Versauerungsfront unterhalb einer Bodentiefe von 120 cm lag, bzw. bei weniger tiefgründigen Böden, wenn die VF allem Anschein nach unterhalb der Schürftiefe des Profils liegt.

Die Bewertung der VF erfolgt in Form von Abschlägen auf die Versauerungskennziffer von maximal minus 1. Profile, ohne markante VF wurden in die Klasse 5 (d.h. kein Abschlag) eingeordnet. Konnte eine VF ausgewiesen werden, macht sich das infolgedessen für das Profil begünstigend bemerkbar (vgl. Tab. 5.1).

5.3.4.2 Nährelementstatus

Zur Beschreibung der Ausstattung der Böden mit Nährstoffen wurden die Vorräte der Hauptnährelemente Ca, Mg und K ausgewählt. Zur Beurteilung des in diesem Zusammenhang wichtigen Nährstoffkreislaufes und des biologischen Bodenzustandes wurde zusätzlich die *Humusform* in Form von Zu-/Abschlägen (s.u.) berücksichtigt. Nicht einbezogen wurden die N- und P-Vorräte. Eine Vorauswertung zeigte, daß im Untersuchungsgebiet kaum mit Nährstoffengpässen bei Stickstoff und Phosphor zu rechnen ist. Darüber hinaus sind die Stickstoffvorräte schwierig zu bewerten, weil Wechselwirkungen zwischen aktueller und früherer Bewirtschaftung (Nutzungsgeschichte), witterungsabhängigen Einflußgrößen sowie die steigende N-Deposition das N-Angebot steuern (FEGGER 1995). Auch ernährungsbedingte Engpässe in

der P-Versorgung sind weniger ein Kapazitätsproblem als vielmehr eine Frage der systeminternen Stoffumsätze und folglich der Mobilisierung und Verfügbarkeit des Phosphors (GEHRMANN 1993).

Für die Vorratsberechnung der Nährstoffe in der Humusaufgabe wurden die aus dem Salpetersäure-Druckaufschluß gemessenen Gesamtgehalte und die Humustrockenmasse herangezogen. Die Calcium-, Magnesium- und Kaliumvorräte im Mineralboden wurden mit Hilfe austauschbarer Bindungsformen unter Berücksichtigung von Skelettgehalt und Trockenraumdichte des Bodens berechnet.

Grundlage zur Klassifizierung und Bewertung der Nährstoffvorräte ist Tabelle 5.2, die der neuen FORSTLICHEN STANDORTSAUFNAHME (5. Auflage, in Vorbereitung) entnommen wurde. Dort sind Kenngrößen (Referenzdaten) für kurz- bis mittelfristig verfügbare Vorräte im effektiven Wurzelraum (organische Auflage und Mineralboden) als vielfaches der durchschnittlichen Nährstoffvorräte mittlerer Baumhölzer angegeben (vgl. Faktorenangaben in Klammern der Tab. 5.2). Diese Bewertungsgrundlage wurde ausgewählt, weil sie dem derzeit neuesten Stand entspricht und weil sie zudem bundesweit eingeführt ist.

Vorräte	Referenzdaten					
	K (kg/ha) (Faktoren)	< 200 (1/2)	400 (1)	600 (1.5)	800 (2)	> 1200 (3)
Ca (kg/ha) (Faktoren)	< 200 (1/2)	400 (1)	800 (2)	2000 (5)	> 4000 (10)	
Mg (kg/ha) (Faktoren)	< 50 (1/2)	100 (1)	200 (2)	500 (5)	> 1000 (10)	
Bewertungsstufen	sehr gering	gering	mäßig	mittel	hoch	sehr hoch
Klassenwert	6	5	4	3	2	1

Tab. 5.2: Bewertung der kurz- bis mittelfristig verfügbaren Vorräte im effektiven Wurzelraum (organische Auflage und Mineralboden) als Vielfaches der durchschnittlichen Nährstoffvorräte mittlerer Baumhölzer (K = 400 kg/ha; Ca = 400 kg/ha und Mg = 100 kg/ha) (aus: FORSTLICHE STANDORTSAUFNAHME, 5. Auflage in Vorbereitung, verändert)

Anhand der klassifizierten *Humusformen* werden Stoffumsatz und biologischer Bodenzustand bewertet und in Form von Zu- bzw. Abschlägen (vgl. Tab. 5.3) auf die durchschnittlichen Vorrats-Klassenwerte in die Ermittlung der Kennziffer für den Nährelementstatus eingebracht (vgl. Abb. 5.1).

Humusformen	Klasse	Bewertung	Zu-/Abschläge
L-Mull, F-Mull	1	sehr günstig	- 1
mullartiger Moder	2	günstig	- 1
feinhumusarmer Moder	3	mäßig günstig	0
feinhumusreicher Moder	4	ungünstig	0
rohhumusartiger Moder	5	sehr ungünstig	+ 1
Rohhumus	6	äußerst ungünstig	+ 1

Tab. 5.3: Zu- und Abschläge zur Bewertung der Humusformen. Klassifizierung der Humusformen nach BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (1982). Trennung der Humusformen in Auflagehumusformen und Mineralbodenhumusformen (schraffiert) nach ULRICH et al. (1984).

Ohne Einbeziehung der im Humus gespeicherten Vorräte werden die im Ökosystem insgesamt gespeicherten Nährstoffvorräte nur unvollständig erfaßt. Bedauerlicherweise lagen für 266 Profile (von 337 = 79 %) keine Analysen der Humusaufgabe vor, so daß anhand der Tabelle 5.2 nur 71 Profile (= 21 %) unmittelbar bewertet werden konnten.

Um auch ohne Humusvorratswerte den Bewertungsrahmen der Tabelle 5.2 für alle Profile anwenden zu können, wurden zunächst anhand von 140 systematisch verteilten Bodenprofilen der Bodenzustandserhebung (BZE) in Rheinland-Pfalz (vgl. BLOCK et al. 1991), getrennt nach der Humusform, die Anteile der Humusvorräte an den Gesamtvorräten errechnet (Humusvorrat und Mineralbodenvorrat, 0 - 90 cm Bodentiefe). Aus dem Verhältnis Humusvorrat zu Gesamtvorrat wurden mit Hilfe der Vorratsmittelwerte der Humusklassen Faktoren als Schätzgrößen zur Reduzierung der Mengenangaben in der Vorrattabelle hergeleitet. Ohne diese Reduktion würden die Gesamtvorräte der Profile mit günstigen Humusformen gegenüber den Gesamtvorräten der Profile mit ungünstigen Humusformen überbewertet, bei denen der vergleichsweise größere Anteil der Vorräte in der Humusaufgabe festgelegt ist.

Mit Hilfe der Schätzergebnisse aus den Verhältnissen von Humusvorrat zu Gesamtvorrat wurden für die 266 betroffenen Profile die Mengenangaben der Tabelle 5.2 bei Profilen mit Auflagehumusformen pauschal um 50 % und bei Profilen mit Mineralbodenhumusformen um 10 % reduziert. Eine stichprobenartige Überprüfung von Profilen mit analysierter Humusaufgabe, die sowohl nach ihren Gesamtvorräten bewertet wurden als auch ohne Humusaufgabe nach reduzierten Kennwerten, zeigte eine zufriedenstellende Übereinstimmung der Bewertung. In aller Regel wurde der gleiche Klassenwert vergeben, in keinem Fall war die Abweichung aber größer als ein Klassenwert.

5.3.4.3 Durchlässigkeit

Bei fortschreitender Versauerung werden im Boden Nähr- und Schadstoffe freigesetzt. Inwieweit diese Lösungsfracht mit dem Sickerwasserstrom aus dem System ausgetragen wird, ist räumlich und zeitlich abhängig von der hydraulischen sowie physikalischen und chemischen Beschaffenheit der Böden und des Untergrundes. Während die *physiko-chemische Filterwirkung* (ÖSTERREICHISCHE WALDBODENZUSTANDSINVENTUR 1992, BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG 1982, MERKEL 1995) hauptsächlich das Sorptions- und Austauschverhalten des *gesamten Solums* erfassen soll, das maßgeblich von der Oberflächenaktivität der Bodenteilchen sowie von ihrem Aggregierungsgrad (vgl. HORN 1989, HILDEBRAND 1991) abhängt, soll mit dem Indikator *Durchlässigkeit* die potentielle Fähigkeit des Unterbodens Schad- und Nährstoffe zurückzuhalten (zu stauen), als ein die Tiefenversickerung hemmendes Indiz eingeschätzt werden. Der Indikator *Durchlässigkeit* zielt auf die Einschätzung der physikalischen Beschaffenheit des Unterbodens (Tiefenbereich 3), dem Austrag von Kationen mit dem Sickerwasser entgegenzuwirken. Die Art und Geschwindigkeit der Versickerung und damit die Verweildauer des infiltrierten Wassers (Matrixsickerung in bindigen Substraten relativ langsam, Makroporensickerung in sandigen Substraten relativ schnell) ist abhängig von der hydraulischen Durchlässigkeit der Böden und entscheidet darüber, inwieweit sich ein Gleichgewicht zwischen Sickerwasser und der Bodenfestphase einstellt (FEGER 1989; KRIETER 1991). Somit stellen hydraulische und physiko-chemische Eigenschaften der Böden ein rückgekoppeltes System dar, wenn die Reaktionen vergleichsweise langsam ablaufen (MERKEL 1995).

Im Sinne der geschilderten Sachverhalte wird eine verminderte Durchlässigkeit positiv bewertet. Im Blick auf andere Fragestellungen, wie beispielsweise Durchwurzelungstiefe, Gebietsabfluß und Abflußverhalten nach Starkregen oder der Beurteilung der Wasserschutzfunktion des Waldbodens können die hier favorisierten hydraulischen Eigenschaften durchaus zu abweichenden oder differenzierteren Bewertungen führen.

Die Fähigkeit des Bodens zur Drainage ist sehr komplex und kann daher nur in seiner durchschnittlichen Tendenz eingeschätzt werden.

Mangels geeigneter Parameter, wie der Angaben über

- die Lagerungsdichte,
- die Porendurchmesser-Verteilung,
- das Porenvolumen,
- die Porengröße,

- das Bodengefüge,
- den kf-Wert⁸ sowie die
- anthropogene Bodenverdichtung

wurde die Durchlässigkeit hergeleitet aus

- dem Vorhandensein eines Sd-Horizontes (Klasse 1) und
- Angaben zur Bodenart der unteren Bodenhorizonte (Cv und verwandte Horizonte) (Klasse 2-5).

Nach SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL (1984)

- ist der Anteil an Grobporen in der Regel um so größer, je sand- oder kiesreicher die Böden sind, er sinkt mit dem Tongehalt, und
- besteht zwischen dem Anteil der Feinporen und dem Tongehalt eine enge Beziehung.

Aus diesem Zusammenhang läßt sich ableiten, daß die Drainwirkung eines Bodenhorizontes eine Funktion der Porengröße ist, die mit zunehmendem Anteil an Grobporen (sandige Böden) steigt und mit zunehmendem Tongehalt der Bodenart (bindige Böden) sinkt. Allerdings muß auch in bindigen Böden mit Trockenrissen, Wurzelgängen usw. gerechnet werden, wodurch die hydraulische Durchlässigkeit wieder erhöht wird. Bindige Böden haben zwar in der Regel ein größeres Gesamtporenvolumen, aber das gravitativ entwässerbare (bzw. pflanzenverfügbare) Porenvolumen ist i. d. R. geringer (MERKEL 1995).

Die Herleitung der Durchlässigkeit erfolgte aus den o.g. Gründen durch Analogieschluß mit Hilfe des Bodenartendiagramms des Feinbodens (BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG 1982, S. 85).

Tongehalt (%)	0 - < 5	5 - < 25	25 - < 45	> 45	Sd-Horizont
Durchlässigkeit	sehr groß	groß	mittel	gering	sehr gering
Klasse	5	4	3	2	1
Abschlag	0	- 0,5	- 1	- 1,5	- 2

Tab. 5.4: Einschätzung und Klassifizierung der Durchlässigkeit anhand des Tongehalts der Bodenart im Unterboden bzw. dem Vorhandensein eines Stauhorizonts aus der Bodenansprache

⁸ kf-Wert= Wasserdurchlässigkeit im wassergesättigten Boden. Der kf-Wert ist ein Maß für die Beurteilung der Staunässe, der Filtereigenschaften und der Dränwirksamkeit der Böden

Die potentielle Durchlässigkeit der Profile wurde je nach Grobporenanteil ihrer Bodenart im Unterboden aus dem Tongehalt geschätzt und in 4 Klassen eingeteilt (vgl. Tab. 5.4, Klassen 2 - 5). Die Klasse der geringsten potentiellen Durchlässigkeit (Klasse 1) wurde für Böden vergeben, die in ihrem Profilverlauf einen Stauhorizont (S_d) aufweisen. Die Lage des Stauhorizontes unter der Mineralbodenoberfläche und seine Mächtigkeit blieb dabei unberücksichtigt. Die Bewertung der Durchlässigkeit erfolgt in Form von Abschlägen (vgl. Tab. 5.4, 0 bis -2) auf die Summe aus Versauerungskennziffer und Nährelementkennziffer (vgl. Abb. 5.1).

Dem Vorschlag, die Durchlässigkeit nur mit Abschlägen zu werten und Böden sehr großer Durchlässigkeit im Grunde nicht zu berücksichtigen (Abschlag = 0), liegt die Überlegung zugrunde, günstige Böden (z.B. Lößböden) trotz vergleichsweise hoher Durchlässigkeit nicht mit einem Malus zu bewerten, da sie ansonsten mit deutlich schwächer mit Basen ausgestatteten Böden in ihrer Sensitivität gleichgestellt würden.

5.4 Bewertung der Sensitivität der Bodengesellschaften gegenüber fortschreitender Bodenversauerung und Nährelementverarmung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des automatisierten Bewertungsverfahrens für Bodenprofildaten vorgestellt. Die Böden der Bodengesellschaften sollen im Hinblick auf ihren Base/Säure-Zustand und ihre Nährelementausstattung beurteilt werden.

Als Maß zur Beurteilung der Disposition der Bodengesellschaften gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung werden die im Zuge des Bewertungsverfahrens ermittelten Bodenversauerungskennziffern (VSKZ), Nährelementkennziffern (NEKZ) und Sensitivitätskennziffern (PSKZ) herangezogen. Die Zuordnung der Bodengesellschaften zu den Bewertungsstufen erfolgt nicht schematisch, sondern abwägend anhand der statistisch häufigsten Werte um den Median (25- bis 75-Perzentil; Box in der BOX-Plot-Darstellung, vgl. Kap. 4.3), ermittelt aus der Summenhäufigkeitsverteilung. Es ist zu beachten, daß in vielen Fällen die Bodencharakteristika von Einzelprofilen in eine andere Stufe oder Gruppe weisen als die, in die ihre Kartiereinheit zugeordnet ist. Dieser Tatbestand ist Ausdruck der Spannbreite der ökochemischen Eigenschaften einer Kartiereinheit. Die Streuung der Kennziffern ist das Maß der tatsächlichen, durch Messungen festgestellten, natürlichen Vielfalt (Heterogenität) inner-

halb des Verbreitungsgebietes der Kartiereinheit Bodengesellschaft bzw. ihrer Gruppierungen⁹. Auffällige bzw. extreme Werte, zu erkennen an den Punkten ober- bzw. unterhalb des Graphen der häufigen Werte, wurden bewußt nicht aus den Kollektiven entfernt, da sie für die Gruppierung ohne Belang sind.

Die den Kartiereinheiten zugeordneten Bewertungsstufen vermitteln einen Gesamteindruck, der für die großräumig kartierten Bodengesellschaften typisch ist. Kleinräumig sind sicherlich von diesem Gesamteindruck erheblich abweichende Zustände anzutreffen.

Darüber hinaus grenzen sich die Gruppen nicht scharf voneinander ab, sondern ihre Grenzsäume sind als breite Bänder mit fließenden Übergängen zu verstehen.

Bewertungsstufe	VSKZ und NSKZ- Wertebereich 0 bis 7	Bodenversauerungsstatus Nährelementstatus
1	< 1.5	sehr günstig
2	> 1.5 - ≤ 2.5	günstig
3	> 2.5 - ≤ 3.5	mäßig günstig
4	> 3.5 - ≤ 4.5	ungünstig
5	> 4.5 - ≤ 5.5	sehr ungünstig
6	> 5.5	äußerst ungünstig

Tab. 5.5a: Bewertungsstufen und Wertebereiche für den Bodenversauerungsstatus (VSKZ) und den Nährelementstatus (NSKZ)

Der Wertebereich der ermittelten Kennziffern wird äquidistant in jeweils 6 Bewertungsstufen unterteilt. Die Schrittweite beträgt für VSKZ und NEKZ eins, für PSKZ wird die Schrittweite jeweils verdoppelt. Wie aus Tabelle 5.5 hervorgeht, sind die Befundeinheiten jeweils umso *günstiger* zu beurteilen, je *kleiner* der Betrag ihrer Kennziffern ist.

⁹ Hinsichtlich der Repräsentativität der Stichproben und damit der Meßdaten für ihre Kartiereinheit können keine Aussagen getroffen werden. Es wurden nur im Bereich der Forstverwaltung bereits vorliegende Bodenprofildaten herangezogen. Auf den Beprobungsort konnte kein Einfluß genommen werden.

Bewertungsstufe	PSKZ- Wertebereich -2 bis 14	Profilsensitivität
1	≤ 3	sehr gering
2	> 3 - ≤ 5	gering
3	> 5 - ≤ 7	mittel-gering
4	> 7 - ≤ 9	mittel-hoch
5	> 9 - ≤ 11	hoch
6	> 11	sehr hoch

Tab. 5.5b: Bewertungsstufen und Wertebereiche für die Profilsensitivität (PSKZ)

Nachfolgend werden zunächst kurz die *Einzelergebnisse* des Bewertungsverfahrens zur Bodenversauerung und zur Bereitstellung pflanzenverfügbarer Nährelemente vorgestellt. Damit wird vor allem beabsichtigt, die Bodengesellschaften diesbezüglich nach ihren Bewertungsbeurteilungen zu gruppieren sowie die Flächenanteile der jeweils vorherrschenden Zustände abzuschätzen, um einen regional differenzierten Überblick über das Untersuchungsgebiet zu erhalten (Karte 5.2 und Karte 5.3). Im Vordergrund steht demnach die kartographische Darstellung.

Im Anschluß erfolgt die Einteilung der Bodengesellschaften in *Sensitivitätsgruppen*. Hier soll versucht werden, anhand der Kombination der Einzelergebnisse die Empfindlichkeit der gruppierten Bodengesellschaften gegenüber fortschreitender Bodenversauerung und weiterer Verarmung an Kationbasen abzuschätzen.

In dieses Gesamtergebnis fließt zusätzlich die potentielle Fähigkeit des Unterbodens mit ein, die Tiefenversickerung zu hemmen und damit dem Austrag freigesetzter Nährstoffe entgegenzuwirken.

Es muß berücksichtigt werden, daß die Bewertungsergebnisse das im Untersuchungsgebiet eingeeengte ökochemische Spektrum widerspiegeln. So fehlen im Untersuchungsgebiet Böden aus basenreichen Ausgangssubstraten völlig (vgl. Kap. 4.3).

Bei der Zusammenführung von *Bodenversauerung* und *Nährelementstatus* zu Gruppen vergleichbarer Sensitivität ergibt sich ferner das Problem, daß spezifische Unterschiede hinsichtlich Zustand und Tiefengradient der beiden Kriterien innerhalb einer Gruppe bzw. verschiedener Gruppen verwischt werden können. Um dem entgegenzuwirken, werden zur Beschreibung der Sensitivitätsgruppen zusätzlich zur Sensitivitätskennziffer (PSKZ) die wesentlichen ökochemischen Charakteristika der Böden einbezogen. Hierbei werden vertikal unterschiedliche Bodenkompimente (Auflagehumus, mineralischer Ober- bzw. Unterboden) differenziert betrachtet.

Zu den ausgeschiedenen Sensitivitätsgruppen soll anhand ihrer wesentlichen chemischen Charakteristika versucht werden, die Reglerfunktionen der Böden zu beurteilen (vgl. auch Kap. 4.5) sowie das Risikopotential gegenüber weiteren Belastungen abzuschätzen. Vorschläge für Maßnahmen zum Schutz des Bodens vor weiterer Degradation und, falls erforderlich, zur biologischen Restauration der Böden mit Angaben zur Priorität sowie waldbauliche Empfehlungen für die einzelnen Sensitivitätsgruppen sind mit den in Kapitel 4.5 enthaltenen Empfehlungen für die dort ausgeschiedenen Gruppierungen der Ausgangssubstrate der Bodenbildung identisch und werden daher für die einzelnen Sensitivitätsgruppen nur kurz skizziert.

Neben der vollständigen Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse (Anhang 4, Tab. 4.22) sind im Anhang 4 (Tab. 5.1 - 5.21) alle wesentlichen bodenchemischen Befunde, getrennt nach den Auswerteeinheiten (Bodengesellschaften) und den drei in Kap. 2.2 beschriebenen Mineralbodentiefenbereichen (TB 1 - TB 3) in Form von Perzentilen der Summenhäufigkeitsverteilung (Minimalwert, 10er-, 25er-, 50er-, 90er-Perzentil, Maximalwert) aufgeführt.

5.4.1 Versauerungsstatus

Der Versauerungszustand der meisten Böden des Untersuchungsgebiets ist im allgemeinen ungünstig zu bewerten. Gemessen am Gesamtkollektiv (vgl. Abb. 5.5, GK = Gesamtkollektiv (337 Profile)) sind ca. 85 % aller Profile in die Stufen 4 bis 6 einzuordnen (vgl. Tab. 5.5, VSKZ > 3.5). Demnach ist ihr Zustand bestenfalls „ungünstig“. Ca. 10 % der Profile liegen in der Stufe „mäßig günstig“ und lediglich 5 % aller Profile haben einen Bodenversauerungszustand, der als „günstig bis sehr günstig“ beurteilt wird (VSKZ < 2.5).

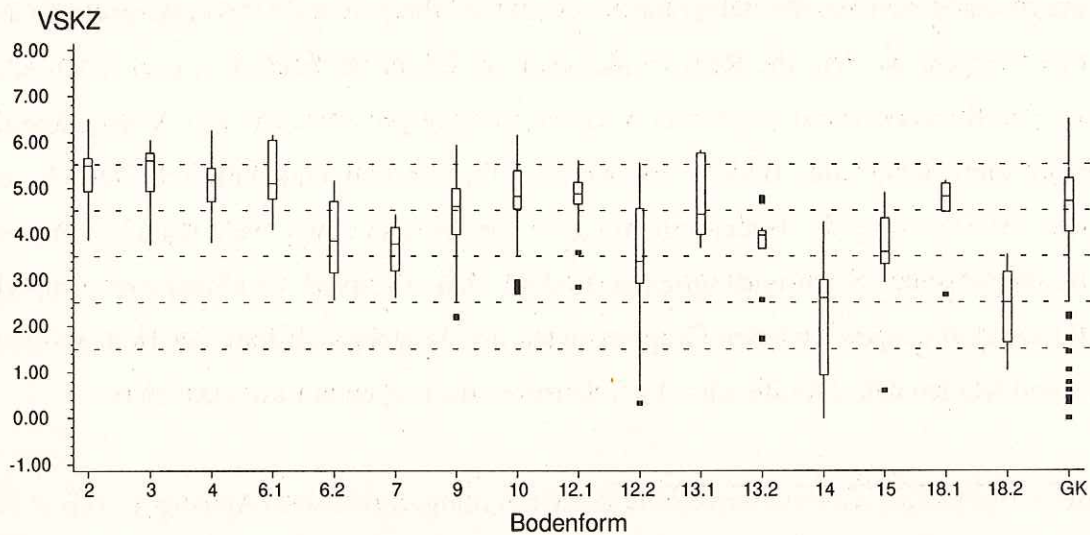


Abb. 5.5: Statistische Kennwerte der Bewertung des Bodenversauerungszustandes, getrennt nach Boden(formen-)gesellschaften. VSKZ = Versauerungskennziffer, GK = Gesamtkollektiv (n = 337), Erläuterungen zur Box-Plot-Darstellung vgl. Kap. 4.3, die waagrecht gestrichelten Linien kennzeichnen die Grenzen der Bewertungsstufen (vgl. Tab. 5.5)

Nach Bodengesellschaften stratifiziert ergibt die Zuordnung der häufigsten Versauerungskennziffern zu den Bewertungsstufen folgendes Ergebnis:

Böden der Bodengesellschaften mit günstigem (VSKZ 1.5 - 2.5, Stufe 2) und sehr günstigem (VSKZ < 1.5, Stufe 1) Versauerungszustand:

Bodengesellschaften mit günstigem oder sehr günstigem Versauerungszustand kommen im Untersuchungsgebiet nach den vorliegenden Befunden nicht vor.

Böden der Bodengesellschaften mit mäßig günstigem Versauerungszustand (VSKZ 2.5 - 3.5, Stufe 3): BG 12.2, BG 14, BG 18.2:

Hier handelt es sich meist um lößlehmhaltige Parabraunerde-/Pseudogley-/Braunerde-Böden (BG 12.2) und lößlehmreiche, z.T. pseudovergleyte Parabraunerden (BG 14) der Tonschieferhochflächen sowie um Pseudogley-/Parabraunerden über den Terrassensedimenten der Hauptvorfluter (BG 18.2). Allen Profilen ist das Vorhandensein einer ausgeprägten Mittellage gemeinsam. Vor allem bei der BG 12.2, aber auch bei der BG 14 ist die Streuung der VSKZ groß und reicht von der Stufe „sehr günstig“ bis „sehr ungünstig“. Mindestens 60 % aller Profile dieser Gruppe sind jedoch besser als „ungünstig“ zu beurteilen (vgl. Abb. 5.5; Anhang 4, Tab. 4.22). Selbst bei der BG 14, deren Böden aus z.T. umgelagertem Lößlehm hervorge-

gangen sind und die ökochemisch insgesamt am besten ausgestattet erscheinen, sind nur knapp die Hälfte aller Profile als „günstig“ und „sehr günstig“ zu beurteilen. Auch diese Böden zeigen hauptsächlich in den obersten Bodenhorizonten bereits deutliche Versauerungserscheinungen und sind aufgrund ihrer häufigsten Werte der Stufe „mäßig günstig“ zugeordnet. Der Flächenanteil dieser Gruppe am Untersuchungsgebiet beträgt ca. 7 %.

Böden der Bodengesellschaften mit ungünstigem Versauerungszustand (VSKZ 3.5 - 4.5, Stufe 4): BG 6.2, BG 7, BG 13.2, BG 15:

Die Böden dieser Bodengesellschaften befinden sich sowohl im peripheren Bereich der Quarzitzüge (BG 6.2, BG 7) als auch im Bereich der Tonschieferhochflächen (BG 13.2, BG 15). Es handelt sich meist um Böden, bei denen Lößlehmschichten auftreten und die z.T. deutlich pseudovergleyt sind. Das Vorhandensein einer Mittellage ist gemeinsames Kennzeichen. Die Böden dieser Gruppe werden vor allem aufgrund ihrer starken Versauerung der obersten 30 cm des Mineralbodens insgesamt als „ungünstig“ beurteilt. Deutlich mehr als 50 % der VSKZ liegen im Bereich der Bewertungsstufe 4. Die BG 6.2 hat zwar ca. 27 % Anteil an Profilen, die in den Bereich der Stufe 5 fallen, ebensoviele Profile liegen jedoch im Bereich der Stufe 3 (mäßig günstig). Bodenprofile, deren Versauerungsstatus als günstig einzustufen wäre, kommen in dieser Gruppe kaum vor (vgl. Abb. 5.5). Der Flächenanteil kann grob auf ca. 9 % geschätzt werden.

Das hier im Vergleich zur vorangegangenen Bodengruppe ungünstigere Bewertungsergebnis geht einher mit einem größeren Nadelholzanteil und ungünstigeren Humusformen. In diesem Zusammenhang wirkt sich eventuell bereits die um etwa 100 m größere mittlere Höhe über NN negativ aus.

Beide Gruppen (Stufen 3 und 4) weisen hinsichtlich des Deckschichtenaufbaues keine erkennbaren Unterschiede (jeweils ausgeprägte Mittellagen) auf. Auch der geologische Gesteinsuntergrund scheint sich nicht durchzupausen. Der Anteil stauwasserbeeinflusster Böden ist insgesamt hoch, in der ungünstiger beurteilten Gruppe 4 sogar eher noch höher.

Böden der Bodengesellschaften mit sehr ungünstigem Versauerungszustand (VSKZ 4.5 - 5.5, Stufe 5): BG 4, BG 6.1, BG 9, BG 10, BG 12.1, BG 13.1, BG 18.1:

Die Bodengesellschaften mit Böden, die einen „sehr ungünstigen“ Versauerungszustand aufweisen, bilden mit einem geschätzten Flächenanteil von ca. 68% im Untersuchungsgebiet mit

Abstand die größte Gruppe¹⁰. Diese Böden kommen im Verbreitungsgebiet der Quarzitzüge (BG 4, BG 6.1), der Tonschieferhochflächen (BG 9, BG 10, BG 12.1, BG 13.1) sowie über Terrassensedimenten (BG 18.1) gleichermaßen vor. Meist handelt es sich um Braunerden. Gemeinsames Kennzeichen dieser Böden ist die meist fehlende Mittellage. Der Anteil der Böden mit Staunässebildung ist gering.

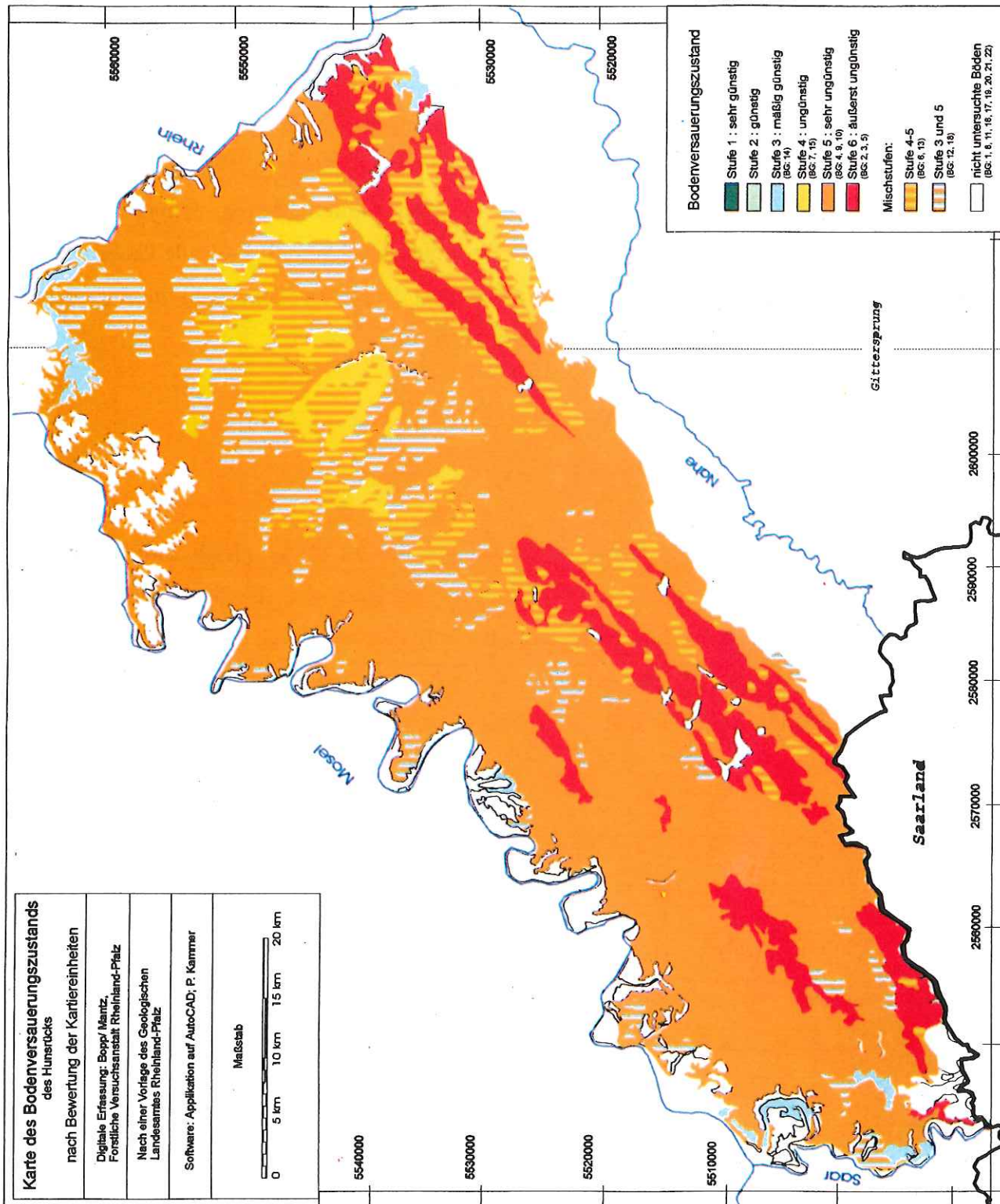
Die Böden der BG 6.1 sind innerhalb dieser Gruppe am ungünstigsten zu beurteilen. Bei der BG 13.1 ist die Spanne innerhalb der Box (25- bis 75-Perzentil, vgl. Abb. 5.5) groß und reicht von Stufe 4 bis Stufe 6. Bei der BG 9 ist die Spanne des Wertebereichs insgesamt am größten. Hier fällt auf, daß ca. 18 % der Profile in den Bereich der Bewertungsstufe 3 (mäßig günstig) fallen. Einzelne Böden aller übrigen Bodengesellschaften dieser Gruppe weisen bestenfalls auf „ungünstige“ Versauerungszustände hin (VSKZ > 3.5), abgesehen von Extremwerten (vgl. Abb. 5.5).

Böden der Bodengesellschaften mit äußerst ungünstigem Versauerungszustand (VSKZ > 5.5, Stufe 6): BG 2, BG 3:

Über quarzitischem Untergrund der Hunsrückhochlagen haben sich an stark geneigten Hängen und Oberhangpartien Ranker und skelettreiche Braunerden herausgebildet, deren Versauerungszustand als „äußerst ungünstig“ bewertet wurde. Ungefähr die Hälfte der Profile dieser Gruppe haben VSKZ über 5.5 und sind somit der Stufe 6 zuzuordnen (vgl. Anhang 4, Tab. 4.22). Die restlichen Profile sind als „sehr ungünstig“ (Stufe 5) bis „ungünstig“ (Stufe 4) zu bewerten. Damit sind alle Profile im „ungünstigen“ Bereich. Im Verbreitungsgebiet der BG 2 befindet sich das Profil mit dem höchsten Versauerungsgrad überhaupt (VSKZ > 6.5, vgl. Anhang 4, Tab. 4.22). Der Stufe 3 (mäßig günstig) gehören keine Profile an. Der Flächenanteil beträgt ca. 12 %.

Karte 5.2 zeigt die Verbreitung der Bodengesellschaftsgruppen mit unterschiedlichem Bodenversauerungszustand. Es dominieren die Farben rot, ocker und gelb für Bodengesellschaftsgruppen der Bewertungsstufen 4 bis 6, die „ungünstige“ bis „äußerst ungünstige“ Zustände anzeigen. Deutlich erkennbar ist der Verlauf der Quarzit Rücken der Hunsrückkammlagen, erkenntlich an der roten Farbe für „äußerst ungünstige“ Zustände. Insgesamt ist der Versauerungszustand der Böden im Hunsrück relativ wenig differenziert.

¹⁰ Eine exakte Flächenangabe ist nicht möglich, da die BG 6, BG 12, BG 13 und BG 18 nicht nach ihren Auswerteeinheiten (Bodenformen) getrennt, sondern als eine Einheit kartiert wurden



Karte 5.2: Ergebniskarte Bodenversauerungszustand. Die Böden der Bodengesellschaften (BG) 6, 12, 13 und 18 wurden getrennt bewertet, aber als eine Einheit kartiert und deshalb schraffiert dargestellt. Alle Angaben sind nur für Waldgebiete gültig.

Exakte Flächenangaben zu den einzelnen Bewertungsstufen sind oft nicht möglich, weil Bodengesellschaften mit zwei Auswerteeinheiten nur als eine Kartiereinheit erfaßt sind. Sie sind in der Karte schraffiert dargestellt. Wie die Ergebnisse vermuten lassen, ist für die Zuordnung der Böden dieser Bodengesellschaften in die eine oder andere Stufe das Vorhandensein der Mittellage entscheidend. Die Kenntnis der Verbreitung der Mittellagen gäbe somit Aufschluß über die unterschiedlichen Bedingungen innerhalb dieser Kartiereinheiten. Schließlich muß deutlich gemacht werden, daß alle Angaben nur für Waldgebiete zutreffen, da alle Proben ausschließlich dort gezogen wurden. Auf eine Einblendung der Waldverteilung in die Ergebnis-karten wurde aus Gründen der Lesbarkeit der Karten verzichtet.

5.4.2 Nährelementstatus

Der Nährelementstatus der Böden im Untersuchungsgebiet ist im Vergleich zum Versauerungsstatus insgesamt etwas günstiger zu beurteilen. Immerhin sind fast 60 % aller Profile (GK) als „mäßig günstig“ und besser (Stufen 1 bis 3, NEKZ > 3.5; vgl. Abb. 5.6; Anhang 4, Tab. 4.22), rund 34 % aller Profile als „ungünstig“ und „sehr ungünstig“ (Stufen 4 und 5) zu beurteilen. Ca. 8 % der Profile sind als „äußerst ungünstig“ einzustufen (Stufe 6, NEKZ > 5.5, vgl. Abb. 5.6).

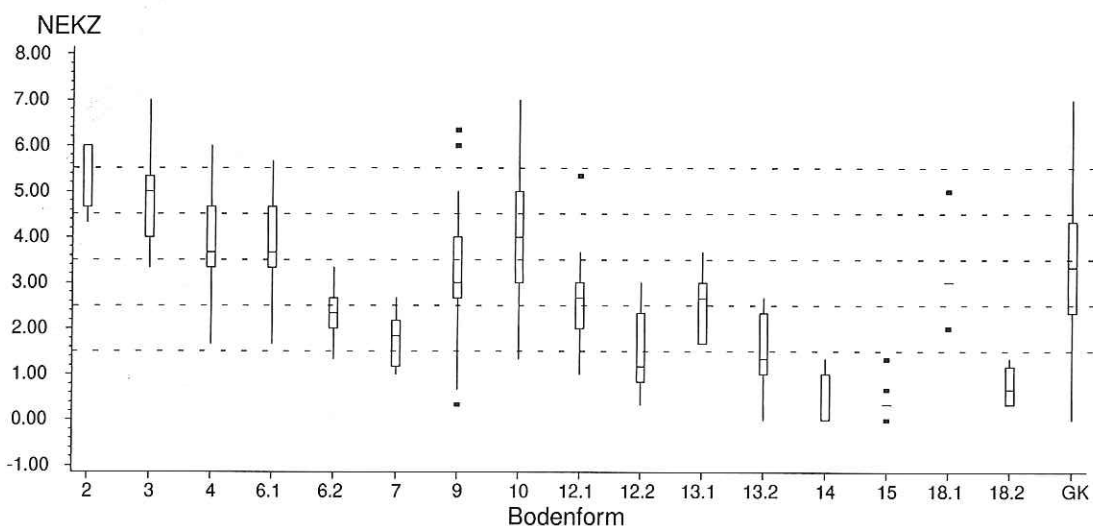


Abb. 5.6: Statistische Kennwerte der Bewertung des Nährelementstatus, getrennt nach Boden(formen-)gesellschaften. NEKZ = Nährelementkennziffer, GK = Gesamtkollektiv (n = 337), Erläuterungen zur Box-Plot-Darstellung vgl. Kap. 4.3. Die waagrecht gestrichelten Linien kennzeichnen die Grenzen der Bewertungsstufen (vgl. Tab. 5.5)

Nach Bodengesellschaften stratifiziert ergibt die Zuordnung der häufigsten Nährelementkennziffern zu den Bewertungsstufen folgendes Ergebnis:

Böden der Bodengesellschaften mit sehr günstigem Nährelementstatus (NEKZ \leq 1.5, Stufe 1): BG 12.2, BG 13.2, BG 14, BG 15, BG 18.2:

Wie zu erwarten, reihen sich hier die Böden der Kartiereinheiten mit lößlehmreichen (BG 14, BG 15) und lößlehmhaltigen (BG 12.2, BG 13.2, BG 18.2) Mittellagen mit dem größten Anteil ihrer Profile ein. Die Böden der BG 14, BG 15 und BG 18.2 befinden sich sogar zu 100 % im Bereich „sehr günstiger“ NEKZ (Stufe 1). Ca. ein Drittel der Profile dieser Gruppe erreichen sogar eine NEKZ unter 0,5 (vgl. Anhang 4, Tab. 4.22; Abb. 5.6), d.h. sie besitzen meist günstige Mineralbodenhumusformen und sind optimal mit Kalzium, Magnesium und Kalium ausgestattet. Der Anteil der Böden mit Staunässebildung in dieser Gruppe ist hoch. 81 % aller Profile weisen in ihrem Profilverlauf einen Stauhorizont (S_d) auf. Der Tiefengradient der Nährelementverteilung von 0 bis 90 cm Bodentiefe ist zwar deutlich ausgeprägt, d.h. hohe Vorräte sind hauptsächlich im Unterboden vor allem über den Stauhorizonten zu beobachten. Doch auch die oberen Bodenbereiche sind vergleichsweise gut mit Nährstoffen ausgestattet.

Böden der Bodengesellschaften mit günstigem Nährelementstatus (NEKZ 1.5 - 2.5, Stufe 2): BG 6.2, BG 7:

Im Vergleich zum Versauerungszustand sind hinsichtlich der Nährelementausstattung die Böden der BG 6.2 und BG 7 um 2 Stufen besser bewertet. Es handelt sich um hydromorphe Böden, deren Pseudovergleyungsgrad bei der BG 7 noch weiter fortgeschritten ist als bei denen der BG 6.2. Wie bereits a.o. dargestellt, ist bei Böden mit Dichtlagerungen häufig ein Anstieg der Nährstoffvorräte über der Stausohle zu beobachten. Entsprechend liegen auch die Mediane der NEKZ bei der BG 7 ($\bar{x} = 1.8$) „günstiger“ als bei der BG 6.2 ($\bar{x} = 2.3$) (vgl. Anhang 4, Tab. 4.22; Abb. 5.6). Mehr als 50 % aller NEKZ dieser Gruppe befinden sich im Wertebereich der Stufe 2. Anhand der hier eingeordneten Bodengesellschaften ist ersichtlich, wie unterschiedlich Böden im Hinblick auf Bodenversauerung und Nährelementausstattung bewertet werden können. Diese Diskrepanz ist in erster Linie auf die unterschiedlichen Bedingungen in den Tiefenbereichen 1 und 3 zurückzuführen, d.h. auf einen sehr steilen vertikalen Tiefengradienten der Nährelemente bei den Böden dieser Gruppe. Obschon die Böden der BG 6.2 und BG 7 im Oberboden (TB 1) ungünstige Säure-/Basezustände anzeigen, weisen sie im tieferen

Bodenbereich (TB 3) vergleichsweise hohe Vorräte an Kationbasen auf. Durch die im Blick auf den Stoffumsatz eher ungünstig bewerteten Auflagehumusformen, die in Form von Zuschlägen die NEKZ erhöhen, wird die oben erwähnte Diskrepanz eher noch gemildert. Beispielsweise würden die Böden der BG 7, ohne Rücksicht auf die Humusform, durchschnittlich günstiger bewertet werden. An dieser Stelle soll vorgehend darauf hingewiesen werden, daß hier die Gefahr bestehen kann, daß sich die Waldbäume bei standortswidriger Bestockung aufgrund der starken Oberbodenversauerung trotz reichlicher Nährstoffe im Unterboden aus dem kurzgeschlossenen (kleinen) Nährstoffkreislauf versorgen und sich von den Vorräten im Unterboden abkoppeln (vgl. Kap. 4.5). Andererseits zeigen neuere Untersuchungen (RASTIN 1991), daß nicht nur die Oberböden wurzelrelevant sind, sondern selbst Fichten, deren Wurzeln einen hohen Sauerstoffbedarf haben und die deshalb Pseudogley nur schwach zu erschließen vermögen (nach KÖSTLER et al. 1968, BIBELRIETHER 1966, KREUTZER 1961), möglicherweise mehr als bisher angenommen mit vitalen Wurzeln selbst in wassergesättigte tiefere Bodenhorizonte (S_d) eindringen und die dortigen Vorräte erschließen können.

Grob geschätzt beträgt der Flächenanteil der Böden mit *sehr günstiger* und *günstiger* (Stufe 1 und 2) Nährstoffausstattung 13 % (ca. 40.000 ha). Im Hinblick auf die Bodenversauerung waren diese beiden Stufen nicht besetzt, da auch besser mit Nährstoffen ausgestattete Böden häufig auf fortgeschrittene Oberbodenversauerung hindeuten.

Böden der Bodengesellschaften mit mäßig günstigem Nährelementstatus (NEKZ 2.5 - 3.5, Stufe 3): BG 9, BG 12.1, BG 13.1, BG 18.1:

Trotz ähnlichen Ausgangssubstrats werden die Profile der BG 9 im Mittel günstiger bewertet als die der BG 10. Bei vergleichbarer Schwankungsbreite der NEKZ liegt der Median bei BG 9 ($\bar{x} = 3$) um den Betrag 1 niedriger als bei BG 10 ($\bar{x} = 4$; vgl. Abb. 5.6). Dies könnte in der unterschiedlichen Reliefausstattung dieser beiden Bodengesellschaften begründet sein. Die Mediane der NEKZ der restlichen Bodengesellschaften dieser Gruppe liegen ebenfalls um den Wert 3 oder knapp darunter (vgl. Abb. 5.6).

Bei diesen Böden ohne Mittellage ist der Tiefengradient der Nährstoffvorräte deutlich schwächer ausgeprägt. Ein deutlicher Anstieg der Nährstoffvorräte im Unterboden bleibt meist aus. Die Oberböden der Böden dieser Gruppe sind mit denen der vorangegangenen Gruppe vergleichbar mit Nährstoffen ausgestattet.

Die Bodengesellschaften mit durchschnittlich „mäßig günstig“ bewerteten Böden nehmen flächenmäßig den zweitgrößten Raum ein (ca. 27 % des Untersuchungsgebietes).

Böden der Bodengesellschaften mit ungünstigem Nährelementstatus (NEKZ 3.5 - 4.5, Stufe 4): BG 4, BG 6.1, BG 10:

Die Wertebereiche der NEKZ der Böden dieser Gruppe schwanken in weitem Rahmen und erstrecken sich fast über alle Bewertungsstufen. Die Böden der BG 4 und BG 6.1 befinden sich im Bereich der Quarzitzüge. Im Vergleich zu BG 2 und BG 3 macht sich jedoch vermutlich der hier größere Einfluß des Tonschiefers und die durchschnittlich geringere Höhenlage mit günstigeren periglazialen Sedimentationsbedingungen (Deckschichtenaufbau) bemerkbar. Die Böden der BG 10 nehmen den größten Raum der Hunsrückhochfläche ein. Obwohl insgesamt 30 % der Profile dieser Gruppe günstigeren Stufen zuzurechnen sind, deutet der Gesamteindruck auf ungünstige Nährelementausstattung hin. Vor allem die Unterböden sind in zunehmendem Maße stärker an Nährstoffen verarmt, der Tiefengradient in der Vertikalverteilung der Nährstoffe nimmt weiter ab.

Flächenmäßig hat diese Gruppe mit mehr als einem Drittel (43 %) der Gesamtfläche den größten Anteil am Untersuchungsgebiet.

Böden der Bodengesellschaften mit sehr ungünstigem Nährelementstatus (NEKZ 4.5 - 5.5, Stufe 5): BG 3:

Knapp die Hälfte (43 %) aller Profile der BG 3 liegen im Bereich der Stufe 5. Der Flächenanteil beträgt ca. 10 % an der Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes.

Böden der Bodengesellschaften mit äußerst ungünstigem Nährelementstatus (NEKZ > 5.5, Stufe 6): BG 2:

Dieser Gruppe sind nur die Böden der BG 2 zuzuordnen. Bei vier der insgesamt sieben untersuchten Profile dieser Bodengesellschaft haben die NEKZ den Wert 6. Im BOX-Plot fällt der Median daher mit dem 75-Perzentil zusammen (vgl. Abb. 5.6). Mit einer Fläche von ca. 2800 ha hat diese Kartiereinheit annähernd 1 % Anteil an der Gesamtfläche.

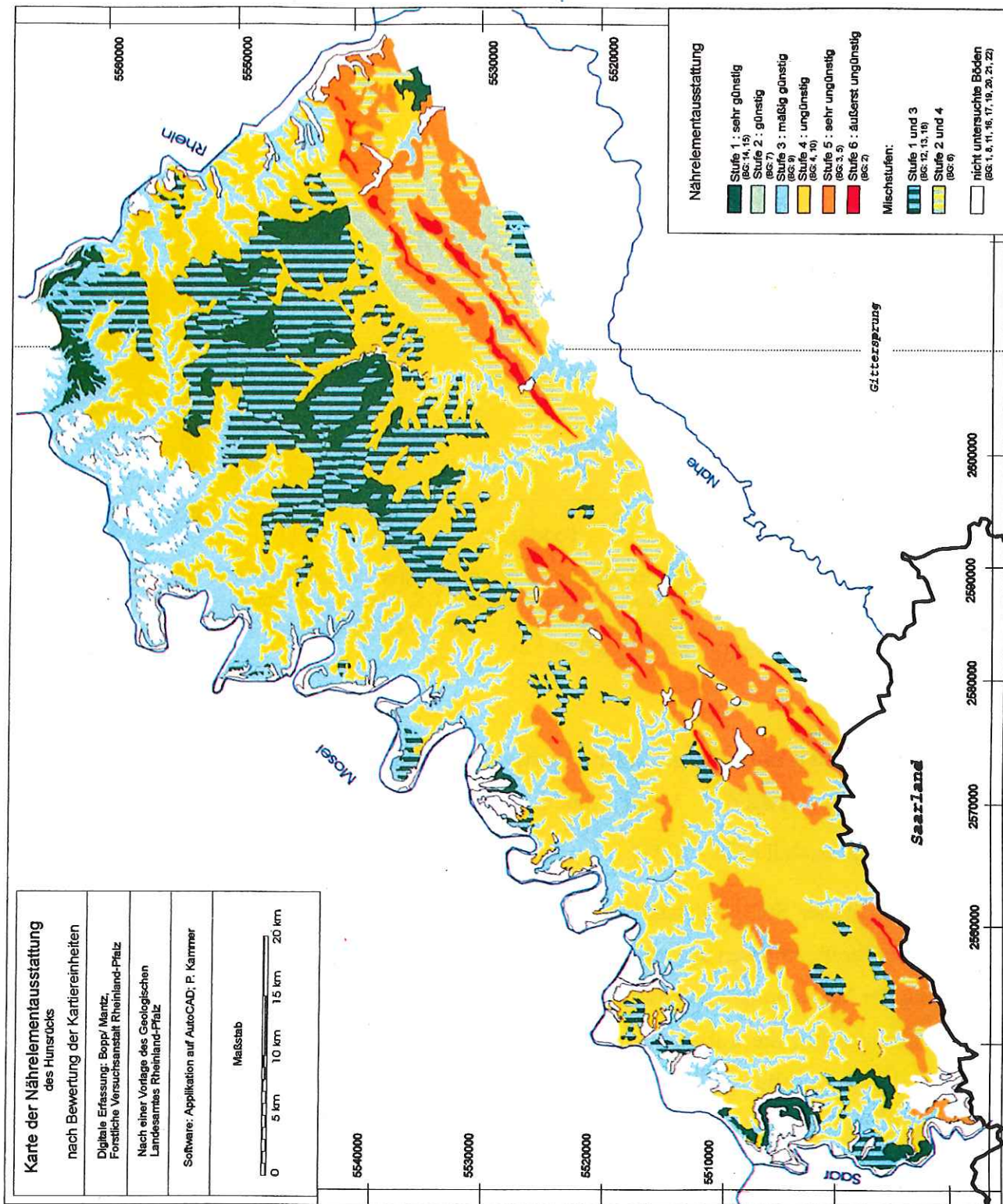
Somit sind die Bodengesellschaften 2 und 3, deren Böden sich über quarzitischem Ausgangssubstrat entwickelt haben, auch hinsichtlich der Nährelementausstattung die Befundeinheiten

mit dem schlechtesten Zustand innerhalb des Untersuchungsgebiets. Diese Böden sind tiefgreifend entbast. Der Mineralboden ist in allen Tiefenbereichen extrem an Nährstoffen verarmt. Die Nährelementbereitstellung wird vermutlich im wesentlichen durch humose Oberbodenhorizonte und dort durch Bindungsplätze der Huminstoffe gesteuert. Der Gradient der Nährstoffvorräte erscheint gegenüber den nährstoffreichen Böden umgekehrt. Es ist davon auszugehen, daß der Nährelementkreislauf hier weitgehend vom Mineralboden abgekoppelt ist.

Im Vergleich zur Karte des Bodenversauerungszustandes (Karte 5.2) zeigt sich der Nährelementstatus der Böden des Hunsrücks weitaus differenzierter. Das macht Karte 5.3 auf den ersten Blick farblich deutlich. Alle Bewertungsstufen sind vertreten. Wie bereits ausgeführt, steigt der Flächenanteil von Befundeinheiten, die hinsichtlich ihres Nährelementstatus besser als einschließlich „mäßig günstig“ (Stufe 1 - 3) bewertet sind, erheblich an. Die Flächenanteile der Bodengesellschaften mit „sehr ungünstigem“ bis „äußerst ungünstigem“ Nährelementstatus (Stufe 5 und 6) treten hingegen erheblich zurück.

Die Ursachen für günstigere Befunde bei der Nährelementausstattung sind in der Hauptsache darin zu suchen, daß durch Aufsummierung der Nährelementvorräte bis 90 cm Bodentiefe vor allem die tieferen Bodenbereiche zum Tragen kommen, die häufig weniger entbast sind als die Oberböden. In diesem Zusammenhang ist von wesentlichem Interesse, inwieweit und in welchem Ausmaß die Vorräte im tieferen Unterboden noch wurzelrelevant sind. Beim Bodenversauerungszustand wurden hingegen die für die Waldbäume besonders wichtigen Oberbodenbereiche stärker gewichtet, deren Versauerungsstatus dort augenscheinlich vergleichsweise einförmig erscheint.

Hinsichtlich der Versauerung haben die oberen Bodenhorizonte, zumindest in weiten Bereichen, daher offenbar ihre diagnostischen Eigenschaften verloren. Dieser Befund deckt sich weitgehend mit den Ergebnissen von BUBERL et al. (1994), die für entkalkte Böden unter Nadelwäldern in Baden-Württemberg eine weitgehende bodenchemische Nivellierung auf niedrigem Niveau feststellen (vgl. auch BEESE und MEIWES 1995).



Karte 5.3: Ergebniskarte Nährelementausstattung. Die Böden der Bodengesellschaften (BG) 6, 12, 13 und 18 wurden getrennt bewertet, aber als eine Einheit kartiert und deshalb schraffiert dargestellt. Alle Angaben sind nur für Waldgebiete gültig.

5.4.3 Gruppierung der Bodengesellschaften vergleichbarer Sensitivität: Gesamtergebnis

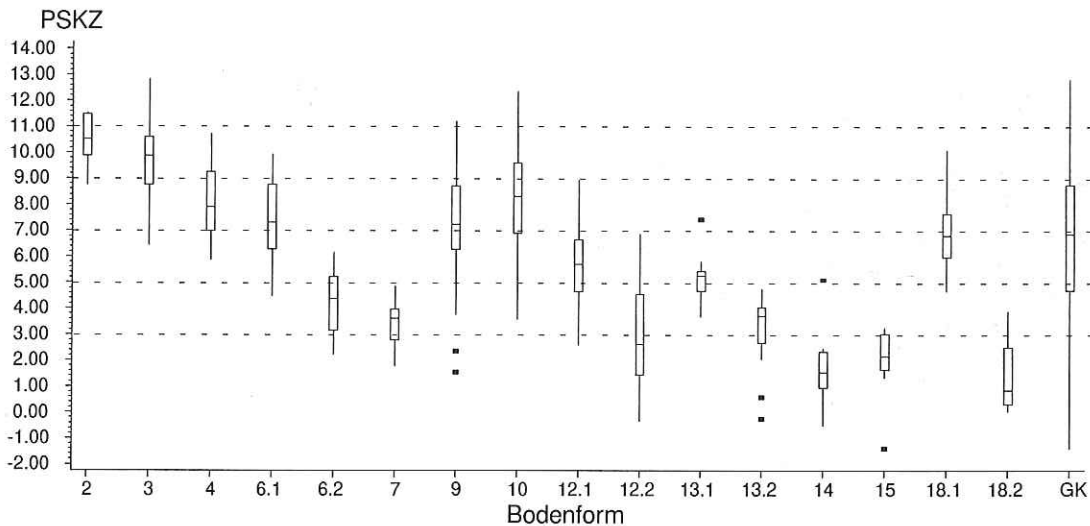


Abb. 5.7: Statistische Kennwerte der Bewertung der Bodensensitivität getrennt nach Boden(formen-)gesellschaften. PSKZ = Profilsensitivitätskennziffer, GK = Gesamtkollektiv (n = 337), Erläuterungen zur Box-Plot-Darstellung vgl. Kap. 4.3, die waagrecht gestrichelten Linien kennzeichnen die Grenzen der Gruppenzuordnung (vgl. Tab. 5.5)

Gruppe 1: Böden mit sehr geringer Sensitivität gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung (PSKZ ≤ 3 , vgl. Abb. 5.7): **BG 12.2, BG 14, BG 15, BG 18.2** (n = 38 Profile; Flächenanteil ca. 8 - 10 %):

Die Böden dieser Sensitivitätsgruppe zeichnen sich durch verhältnismäßig hohe Elastizität gegenüber Streßeinflüssen aus. Mittel- bis langfristig sind keine Engpässe in der Nährstoffversorgung der Waldbäume zu erwarten. 63 % der Profile dieser Gruppe weisen Mineralbodenhumusformen auf, die auf eine große Zahl von Zersetzerorganismen schließen lassen und damit auf hohe Stoffumsatzraten. Rohhumusartiger Moder und Rohhumus kommen nicht vor. An fast 60 % der Profile stockt Laubholz. Der Anteil der Fichte ist mit 30 % vergleichsweise gering. Die Waldbäume finden hohe bis sehr hohe Nährelementvorräte vor, die sich zum weit überwiegenden Anteil im Mineralboden befinden. Die Mg-Vorräte im Mineralboden von 0 - 90 cm liegen meist zwischen 830 und 2265 kg/ha (25 - 75-Perzentil; \bar{x} = 1600 kg/ha), die K-Vorräte zwischen 762 und 1321 kg/ha (25 - 75-Perzentil; \bar{x} = 1008 kg/ha) und die Ca-Vorräte zwischen 3133 - 7827 kg/ha (25 - 75-Perzentil; \bar{x} = 5456 kg/ha). Beachtenswert ist, daß sich davon durchschnittlich nur 5 % der Mg-Vorräte und 27 % der K-Vorräte im Bereich von 0 -

30 cm Bodentiefe befinden. Damit sind die Mg- und K-Vorräte selbst bei den nährstoffreichsten Profilen des Untersuchungsgebietes im Oberboden (0 - 30 cm) als eher mäßig bis gering einzuschätzen, während die unteren Bodenbereiche mit hohen bis sehr hohen Vorräten aufwarten.

Die Böden dieser Gruppe weisen zwar im Oberboden schon erkennbare, in den unteren Bodenbereichen aber geringe oder keine Versauerungsmerkmale auf. Bei ca. 74 % der Profile konnte die Versauerungsfront innerhalb der ersten 60 cm Bodentiefe - bei weiteren 16 % zwischen 60 - 90 cm Bodentiefe - festgestellt werden. Unter diesen bodenchemischen Bedingungen ist noch eine Nährstoffversorgung aus dem tieferen Mineralboden, d.h. über den „Großen Nährstoffkreislauf“ anzunehmen.

Ca. 74 % der Böden sind z.T. stark stauwasserbeeinflusst (BG 12.2, BG 15, BG 18.2). Denkbar ist, daß im Oberboden durch Versauerungsschübe freigesetzte Nährstoffe nicht mit dem Sickerwasserstrom aus dem System entweichen und im Ökosystem verbleiben. Demnach ist die Gefahr von Nährelementverlusten als gering einzuschätzen. Die Böden der BG 14 sind demgegenüber weniger von Stauwassereinflüssen betroffen. Doch sind dort in lößlehmreichen Deckschichten die Vorräte derart hoch (0 - 90 cm; \bar{x} = 10829 kg/ha), daß bei Belastungen auch längerfristig nicht mit Engpässen in der Nährstoffbereitstellung zu rechnen ist.

Die Reglerfunktion der Böden dieser Gruppe sind weitgehend intakt. Sie besitzen eine vergleichsweise hohe Elastizität gegenüber weiteren Säureinträgen. Das Risiko gegenüber Säuretoxizität und Nährelementverarmung wird daher als gering eingeschätzt. Im Ökosystem intern freigesetzte oder extern zugeführte Säuren sollten weitestgehend abgepuffert werden können. Die Qualität des aus dem Waldboden in den Untergrund absickernden Wasser sollte daher wohl zumindest kurz- bis mittelfristig kaum beeinträchtigt sein.

Bodenschutzkalkungen sind bei standortgerechter Bestockung *nicht erforderlich* und sollten zur Vermeidung unnötiger Risiken, z.B. durch Überschußnitrifikation, unterbleiben. Bezüglich der waldbaulichen Empfehlungen und Bodenbehandlungsmaßnahmen für diese Gruppe gelten die Vorschläge, die im Rahmen der Substratgruppen 12, 4 und 1 im Kapitel 4.5 erörtert wurden.

Gruppe 2: Böden mit geringer Sensitivität gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung (PSKZ 3 - 5, vgl. Abb. 5.7): **BG 6.2, BG 7, BG 13.2** (37 Profile; Flächenanteil ca. 5 - 7 %):

Aufgrund insgesamt hoher Nährelementvorräte in Gruppe 2 sind die Befunde der ersten Gruppe größtenteils auch auf diese Gruppe übertragbar. Die Mg-Vorräte im Mineralboden von 0 - 90 cm (25 - 75-Perzentil: 823 - 2782 kg/ha; \bar{x} = 1424 kg/ha) liegen in derselben Größenordnung. Die K-Vorräte sind etwas geringer als in Gruppe 1 (25 - 75-Perzentil: 511 - 790 kg/ha; \bar{x} = 623 kg/ha), die Ca-Vorräte ungefähr halbiert (25 - 75-Perzentil: 1578 - 3907 kg/ha; \bar{x} = 2043 kg/ha), eine unzureichende Ca-Bereitstellung ist dennoch nicht wahrscheinlich.

Bei den Böden dieser Gruppe handelt es sich ausschließlich um Pseudogleye oder stark pseudovergleyte Braunerden und Parabraunerden mit dem bereits erläuterten Phänomen stark ansteigender Vorräte an Nährstoffbasen im Unterboden. Auch hier befinden sich nur 7 % der Mg-Vorräte und 27 % der K-Vorräte im Bodenbereich von 0 - 30 cm. Im Unterschied zur vorangegangenen Gruppe sind die Böden hier im Oberboden stärker versauert, der Versauerungsgradient ist vertikal stärker ausgeprägt. Bei 16 % der Böden konnte die Versauerungsfront innerhalb der ersten 30 cm Bodentiefe festgestellt werden, bei weiteren 54 % im Bereich zwischen 30 - 60 cm Bodentiefe. Ungünstigere Zustände im Vergleich zur Gruppe 1 zeichnen sich ebenso bei den Humusformen ab. Ca. 57 % der Profile lagern feinhumusreiche und rohhumusartige Moder- und Rohhumus-Humusformen auf. 46 % der Profile sind mit Nadelholzbeständen bestockt. Vor allem die Buche und die Eiche sind im Vergleich zu Gruppe 1 rarer. Zwar ist bei den Böden dieser Gruppe die Gefahr von Nährstoffverlusten durch Tiefenversickerung ebenfalls gering. Jedoch ist hier im Vergleich zur ersten Gruppe die Gefahr größer, daß sich die Bestände unter weitgehender Aussparung des Mineralbodens aus dem kleinen Nährstoffkreislauf versorgen, wenn die Wurzelsysteme die Vorräte im Unterboden nicht erreichen können. Nach neueren Erkenntnissen sind die Ursachen der flachen Durchwurzelung hauptsächlich in der starken Versauerung der Oberböden und weniger in bodenmechanischen oder bodenhydrologischen Hindernissen zu suchen (EICHHORN 1987, RASTIN 1991, ULRICH 1991, MURACH 1984; vgl. auch Kap. 4.5).

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß bei Standorten, die im Unterboden gut mit Nährstoffvorräten ausgestattet sind (Gruppe 1 und 2), anders als bei tiefreichend versauerten Böden, keine gravierenden Probleme hinsichtlich der Nährstoffversorgung der Waldbestände zu erwarten sein sollten. Beim behutsamen Umgang mit den Ressourcen sollten die Reglerfunktionen der Böden dieser Gruppe weitgehend intakt bleiben.

Oberflächenkalkungen erscheinen auf diesen Substraten nur dann vordringlich, wenn die Tiefenversauerung bereits soweit fortgeschritten ist, daß auch bereits die derzeitige Bestockung keinen Anschluß an Bodenbereiche mit höherer Basenausstattung hat. Für diese Gruppe sind die in Kapitel 4.5 erläuterten Pflanzlochkalkungen von besonderem Interesse.

Bezüglich der waldbaulichen Empfehlungen und Bodenbehandlungsmaßnahmen für diese Gruppe gelten die Vorschläge, die im Rahmen der Substratgruppen 2, 3, 5, 10, 11, 13 und 14 im Kapitel 4.5 erörtert wurden.

Gruppe 3: Böden mit mittlerer bis geringer Sensitivität gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung (PSKZ 5 - 7, vgl. Abb. 5.7): **BG 12.1, BG 13.1, BG 18.1** (n = 37 Profile; Flächenanteil ca. 6 %):

Die Böden mittlerer bis geringer Sensitivität unterscheiden sich von den Böden der vorangegangenen Gruppe durch deutlich erkennbare Versauerungsmerkmale - nicht nur im Oberboden - und damit durch insgesamt reduzierte Elastizität gegenüber Säuretoxizität. Der Versauerungsstatus der Bodengesellschaften dieser Gruppe wurde dementsprechend mit „sehr ungünstig“ bewertet (vgl. Kap. 5.4.1). Der Tiefengradient der Bodenversauerung ist weniger stark ausgeprägt. Bei 84 % der Profile liegt die Versauerungsfront tiefer als 90 cm Bodentiefe. Bei Versauerungsschüben, die durch interne oder externe Säurequellen hervorgerufen werden, kann das Säurepufferungsvermögen der Böden bis in tiefere Bodenbereiche hinein überschritten werden.

Ein wesentlicher Teil der insgesamt verfügbaren Nährstoffvorräte dürfte bereits im Auflagehumus gespeichert sein. 51 % der Profile weisen ungünstigen Moder oder Rohhumus auf. Nur noch 24 % der Profile besitzen Mull-Humusformen. Auf den Böden stocken zu 73 % Nadelhölzer (Fichtenanteil 54 %), Laubbaumarten sind selten (Buche und Eiche zusammen nur 16 %).

Im Mineralboden befinden sich insgesamt noch Nährstoffkapazitäten, die durchschnittlich mit „mäßig günstig“ bewertet wurden (vgl. Kap. 5.4.2). Die Mg-Vorräte betragen im Mittel 267 kg/ha (25 - 75-Perzentil: 126 - 592 kg/ha), die K-Vorräte liegen durchschnittlich bei 506 kg/ha (25 - 75-Perzentil: 401 - 648 kg/ha) und die Ca-Vorräte bei 641 kg/ha (25 - 75-Perzentil: 380 - 1210 kg/ha). Davon befinden sich, gemessen am Vorrat von 0 - 90 cm Bodentiefe, 40 % der K-Vorräte und 13 % der Mg-Vorräte in den ersten 30 cm des Mineralbodens.

Zwar wurde bei 73 % der Böden dieser Gruppe ein S_w - oder S_d -Horizont diagnostiziert und somit die Böden noch häufig als pseudovergleyt angesprochen aber hier ist im Vergleich zu

den Böden der vorangegangenen Gruppe ein Anstieg der Vorräte im Unterboden oberhalb der Stauhohizonte nur abgeschwächt festzustellen. Die im Vergleich zu Gruppe 2 ungünstigere Nährelementausstattung der Böden der Gruppe 3 ist vermutlich in erster Linie auf eine andere Beschaffenheit und Wirkungsweise der Stausohle zurückzuführen (fehlende Mittellagen).

Die Böden der Bodengesellschaften 12, 13 und 18 gliedern sich in jeweils zwei Auswerteeinheiten, die verschiedenen Sensitivitätsgruppen zugeordnet wurden. Da die offenbar kleinräumig eng miteinander verwobenen Bodenformen nicht getrennt kartiert vorliegen, wurden diese Bodengesellschaften daher in der Sensitivitätskarte (Karte 5.4) als Mischgruppen (schraffiert) graphisch dargestellt. Zukünftig sollte der Verbreitung und Ausdehnung der Mittellagen, die allem Anschein nach entscheidend für die unterschiedliche Nährstoffausstattung innerhalb der Bodengesellschaften sind, besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Auch der Zusammenhang zwischen hydromorphen Böden und der Verbreitung der Mittellagen sollte hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Nährstoffhaushalt zukünftig eingehend untersucht werden.

Die Nährelementausstattung der Böden der Gruppe 3 ist allgemein noch so hoch einzuschätzen, daß mittelfristig nicht mit Nährstoffmangel für die Vegetation zu rechnen ist, wenn die Nährstoffe im tieferen Mineralboden von den Wurzeln erreicht werden. Durch die in dieser Gruppe bereits deutlich versauerten Oberböden besteht jedoch die Gefahr, daß sich die Pflanzenernährung vom Mineralboden abkoppelt und der tiefere Mineralboden in dem Maße an Bedeutung verliert, in dem die Auflage dazugewinnt. Bei einer Beschleunigung des „Kleinen Nährstoffkreislaufs“ wäre das Wachstum und die Entwicklung der betroffenen Wälder wesentlich höheren (z.B. witterungsbedingten) Schwankungen und Risiken unterworfen. Die Empfehlungen, die für die Gruppe 2 formuliert wurden, gelten daher für diese Gruppe in besonderem Maße. Die Nährstoffe durch Einbindung in den „Großen Nährstoffkreislauf“ im System zu halten ist deshalb besonders wichtig, weil in dieser Gruppe die Stauhohizonte einem Austrag von im Oberboden stressbedingt freigesetzten Nährelementen mit dem Sickerwasserstrom möglicherweise nicht mehr so effektiv entgegenwirken. Darüber hinaus gelten bezüglich der waldbaulichen Empfehlungen und Bodenbehandlungsmaßnahmen für diese Gruppe die Vorschläge, die im Rahmen der Substratgruppen 6 und 15 im Kapitel 4.5 unterbreitet wurden.

Gruppe 4: Böden mit mittlerer bis hoher Sensitivität gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung (PSKZ 7 - 9, vgl. Abb. 4.7): BG 4, BG 6.1, BG 9, BG 10 (n = 197 Profile; Flächenanteil ca. 62 %):

Die Gruppe der Böden mit mittlerer bis hoher Sensitivität besitzen im Mittel nur noch eingeschränkte Fähigkeiten, auf Streßeinflüsse elastisch zu reagieren. Sie nehmen den weitaus größten Raum des Untersuchungsgebietes ein. Es muß betont werden, daß die Variabilität der ökochemischen Ausstattung in dieser Gruppe sehr groß ist. Unterhalb des 10er Perzentils und oberhalb des 90er Perzentils weichen die Meßdaten daher z.T. deutlich von den häufigsten Werten ab und beschreiben andere als die hier nachfolgend angeführten Zustände. Diesem Sachverhalt muß bei der Planung von Maßnahmen im Einzelfall durch Überprüfung der standörtlichen Bedingungen Rechnung getragen werden.

Durchschnittlich besitzen die Böden der Gruppe 4 bis in den tieferen Mineralboden hinein kritische Säure-/Basezustände. Bei 91 % der Profile liegt die Versauerungsfront deutlich unterhalb von 90 cm Bodentiefe. 60 % der Profile haben in repräsentativen B- und C-Horizonten eine Basensättigung unter 15 % und zeigen damit tiefgreifend mangelhafte Ernährungs- und Pufferbedingungen an. Selbst in den humosen A-Horizonten liegt die Basensättigung bei 54 % der Profile unter 15 %. Die Gefahr einer weiteren Verarmung an Nährstoffbasen ist hoch einzuschätzen. Bodenarten und Porengrößenverteilung deuten auf hohe vertikale Durchlässigkeiten bei 80 % der Profile hin. Der Anteil pseudovergleyter Böden beträgt in dieser Gruppe nur 20 %. Damit kann bei hoher Säurebelastung die Qualität des den Waldboden in Richtung Gesteinszersatzzone bzw. Grundwasser verlassenden Sickerwassers zunehmend beeinträchtigt sein.

Die Ausstattung der Böden dieser Gruppe mit Nährstoffen ist zunehmend problematisch einzuschätzen. Nährelementengpässe sind vor allem dann wahrscheinlich, wenn die Wurzeln der aufstockenden Baumarten tieferliegende Nährstoffe nicht nutzen können und somit ein wesentlicher Teil der insgesamt spärlich vorhandenen Vorräte nicht in den Nährstoffkreislauf einbezogen sind. Die Mg-Vorräte bis 90 cm Bodentiefe schwanken zwischen 42 - 188 kg/ha (25 - 75-Perzentil; \bar{x} = 86 kg/ha), die K-Vorräte zwischen 209 - 444 kg/ha (25 - 75-Perzentil; \bar{x} = 322 kg/ha) und die Ca-Vorräte zwischen 166 - 526 kg/ha (25 - 75-Perzentil; \bar{x} = 284 kg/ha). Gemessen an den „Soll-Vorräten“ (vgl. Kap. 5.3.3.2., Tab.5.2) ist die Gefahr von Mg-Mangel im Vergleich zu Ca und K größer. Der Gradient in der vertikalen Verteilung der Nährelemente beginnt sich langsam zugunsten des Oberbodens zu verschieben. 43 % der K-Vorräte und 40 % der Mg-Vorräte von 0 - 90 cm Bodentiefe finden sich in den oberen 30 cm des Mineralbodens. Dieser Befund stimmt mit dem Humusformenspektrum gut überein. 70 %

aller Profile weisen Auflagehumusformen auf, in denen ein zunehmender Anteil der verfügbaren Nährstoffe gespeichert ist. Gerade dort ist die Nährstoffaufnahme, die von der Wasserversorgung abhängt, in Austrocknungsphasen stark behindert und es kann schnell zu Versorgungsengpässen kommen (FEGGER und RASPE 1992, FEGGER 1993, XU und FÖLSTER 1992). Ein Großteil der Waldbestände versorgt sich vermutlich aus dem kurzgeschlossenen „Kleinen Nährelementkreislauf“. Die bei starker Oberbodenversauerung besonders flach wurzelnde Fichte (vgl. EICHHORN 1987, MURACH 1984), die dann das ohnehin knappe Nährstoffangebot im Boden möglicherweise nur unvollständig nutzen kann, ist symptomatisch in dieser Gruppe mit über 56 % am stärksten vertreten. Der Anteil von Buchen und Eichen liegt nur bei 26 %.

Die Reglerfunktion der Böden sind weitgehend nicht mehr intakt. Auf tiefreichend versauerten und basenarmen Standorten der Gruppe 4 scheinen Maßnahmen zur Bodenstabilisierung, wie sie im Kapitel 4.5 für die Substratgruppen 6 und 15 vorgeschlagen wurden, unbedingt notwendig zu sein.

Der Elemententzug durch Holzernte kann beträchtlich sein. Er wirkt sich auf vom Ausgangssubstrat der Bodenbildung her nährstoffarme oder/und vorbelastete Böden in besonderem Maße aus. Intensiver Biomassenentzug durch Vollbaumernte kann von solchen Standorten durch die Silikatverwitterung kaum ausgeglichen werden und ist aufgrund des hohen Kationenentzugs (Basenexport) mit stark erhöhten Versauerungsraten verbunden (vgl. FEGGER 1993). Daher sollte der Schlagabraum unbedingt im Bestand bleiben. Die Nährstoffentzüge durch Stammholznutzung (ohne Rinde) vermag die „nachschaufende Kraft“ der Mineralverwitterung in gewissem Maß zu kompensieren.

Gruppe 5 und Gruppe 6: Böden mit hoher und sehr hoher Sensitivität gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung (PSKZ > 9, vgl. Abb. 5.7): **BG 2, BG 3** (n = 28 Profile; Flächenanteil ca. 11 %):

Ungefähr 11 % des Untersuchungsgebiets, dem entsprechen ca. 33.000 ha, sind mit Böden bedeckt, die nach den Befunden tiefgreifend starke Versauerungsmerkmale aufweisen. Sie nehmen den Raum der quarzitischer Hunsrückhochlagen ein, die lithogen und geogen an Basen von vornherein besonders schwach ausgestattet sind und aufgrund ihrer geographischen Lage gegenüber atmosphärischen Säureeinträgen besonders exponiert sind. 82 % der Profile dieses Kollektivs weisen im ganzen Solum eine Basensättigung unter 15 % auf. Dementsprechend liegt die Versauerungsfront bei *allen* Profilen unterhalb der Beprobungstiefe der Böden, häu-

fig unterhalb von 120 cm Bodentiefe. Die Elastizität der Böden hinsichtlich Säuretoxizität und Nährelementbereitstellung ist als äußerst gering einzustufen.

Die Nährelementvorräte in den Böden sind in aller Regel sehr gering. Die Mg-Vorräte betragen im Mittel im Mineralboden bis 90 cm Tiefe nur noch 26 kg/ha (25 - 75-Perzentil: 20 - 41 kg/ha), die K-Vorräte liegen bei 168 kg/ha (25 - 75-Perzentil: 124 - 250 kg/ha) und die durchschnittlichen Ca-Vorräte bei 126 kg/ha (25 - 75-Perzentil: 90 - 167 kg/ha). Somit sind die Ca-Vorräte in dieser Gruppe deutlich geringer als die K-Vorräte. Das bedeutet, daß, gemessen am Nährstoffvorrat mittlerer Baumhölzer (vgl. Kap. 5.3.3.2, Tab. 5.2), weit weniger als die Hälfte der Mg-, K- und Ca- Vorräte, die in der Biomasse der Waldbestände festgelegt sind, im Mineralboden gespeichert sind. Hauptsächlich bei Mg ist während Trockenphasen mit akuten Versorgungsengpässen zu rechnen. 70 % der ohnehin knappen Mg-Vorräte (50 % der K-Vorräte) von 0 - 90 cm Bodentiefe befinden sich bereits innerhalb der ersten 30 cm des Mineralbodens. Vor allem bei Mg können teilweise weit mehr als die Hälfte der insgesamt pflanzenverfügbaren Vorräte in der Humusaufgabe festgelegt sein. Mehr als 86 % der Profile besitzen Auflagehumusformen mit einer Tendenz zur Akkumulation inaktiver Rohhumusdecken. Im Gegensatz zu den Gruppen 1 und 2, wo der weit überwiegende Teil der insgesamt verfügbaren Vorräte im unteren Bodenbereich steckt, ist hier der Tiefengradient der Nährstoffversorgung gerade umgedreht. Die Bestände ernähren sich vermutlich im wesentlichen aus dem kurzgeschlossenen „Kleinen Nährstoffkreislauf“.

Es ist unstrittig, daß hier ein besonders behutsamer Umgang mit den vor allem im Auflagehumus gespeicherten Nährstoffen gefordert ist. Die oberflächennahen Nährstoffvorräte sind ohnehin in hohem Maße der Witterung ausgesetzt und unterliegen Schwankungen im Feuchtigkeits- und Wasserregime mit entsprechenden Mineralisierungsschüben. Das Risiko des Nährstoffverlustes während dieser Mineralisierungsphasen, die beispielsweise durch Bestandesauflichtung (höheres Wärmeangebot) oder hochdosierte Kalkungsmaßnahmen eingeleitet oder verstärkt sein können, ist besonders groß. Es ist plausibel anzunehmen, daß auf solchen von Natur aus armen und durch intensive Nutzung zusätzlich degradierten Standorten ein Verlust dieser oberflächennah festgelegten Vorräte über Jahrhunderte durch Silikatverwitterung nicht mehr ausgeglichen werden kann, was eine langfristige Degradierung dieser Böden und betroffenen Waldökosysteme bedeutet. Die Reglerfunktionen der Böden dieser Gruppe sind vermutlich weitgehend zusammengebrochen. Die Bestände ernähren sich überwiegend aus den in den Auflagen gespeicherten Nährelementvorräten unter weitestgehender Aussparung des tieferen Mineralbodens. Die möglicherweise resultierende Flachwurzelligkeit ist mit

hohen Risiken witterungsbedingter Versorgungsengpässe und Windwurfanfälligkeit bei Stürmen verbunden (EICHHORN 1991, 1992).

Hinzu kommt, daß die im Oberboden durch Versauerung und atmogene Einträge freigesetzten Kationbasen wahrscheinlich ungehindert in die Tiefe versickern können. Das ist besonders dann verstärkt der Fall, wenn sie durch die aufstockende Vegetation nicht aufgenommen werden können. Die Böden dieser Gruppe befinden sich in stark reliefiertem Gelände der Hunsrückhochlagen mit besonders hohen Niederschlagssummen. Die hohen Niederschläge haben durch den großen Auskämmeffekt der auf diesen Standorten meist in Reinbeständen stockenden Fichten besonders hohe Nitrat- und Sulfateinträge zur Folge, mit der Konsequenz gesteigerter Kationenmobilität.

Häufig besitzen die Böden sehr hohe Skelettanteile im Unterboden und der Feinboden ist vergleichsweise tonarm. 80 % der Böden weisen im Unterboden sandige Fraktionen auf, deren Porenraumgefüge eine hohe Durchlässigkeit des Sickerwasserstroms mit relativ kurzen Verweilzeiten im Untergrund erwarten läßt. Ein Durchschlagen der Versauerungsfront bis in die Grundwasserkörper oder kurzzeitige Versauerungserscheinungen mit gravierenden Folgen für die Qualität des Grundwassers, einschließlich der Oberflächenfließgewässer und des Trinkwassers ist nicht mehr auszuschließen. FRINGS (1993) weist darauf hin, daß in Rheinland-Pfalz bereits rund ein Drittel des zur Trinkwassergewinnung geförderten Grundwassers den durch Versauerung am stärksten betroffenen Gebieten entstammt.

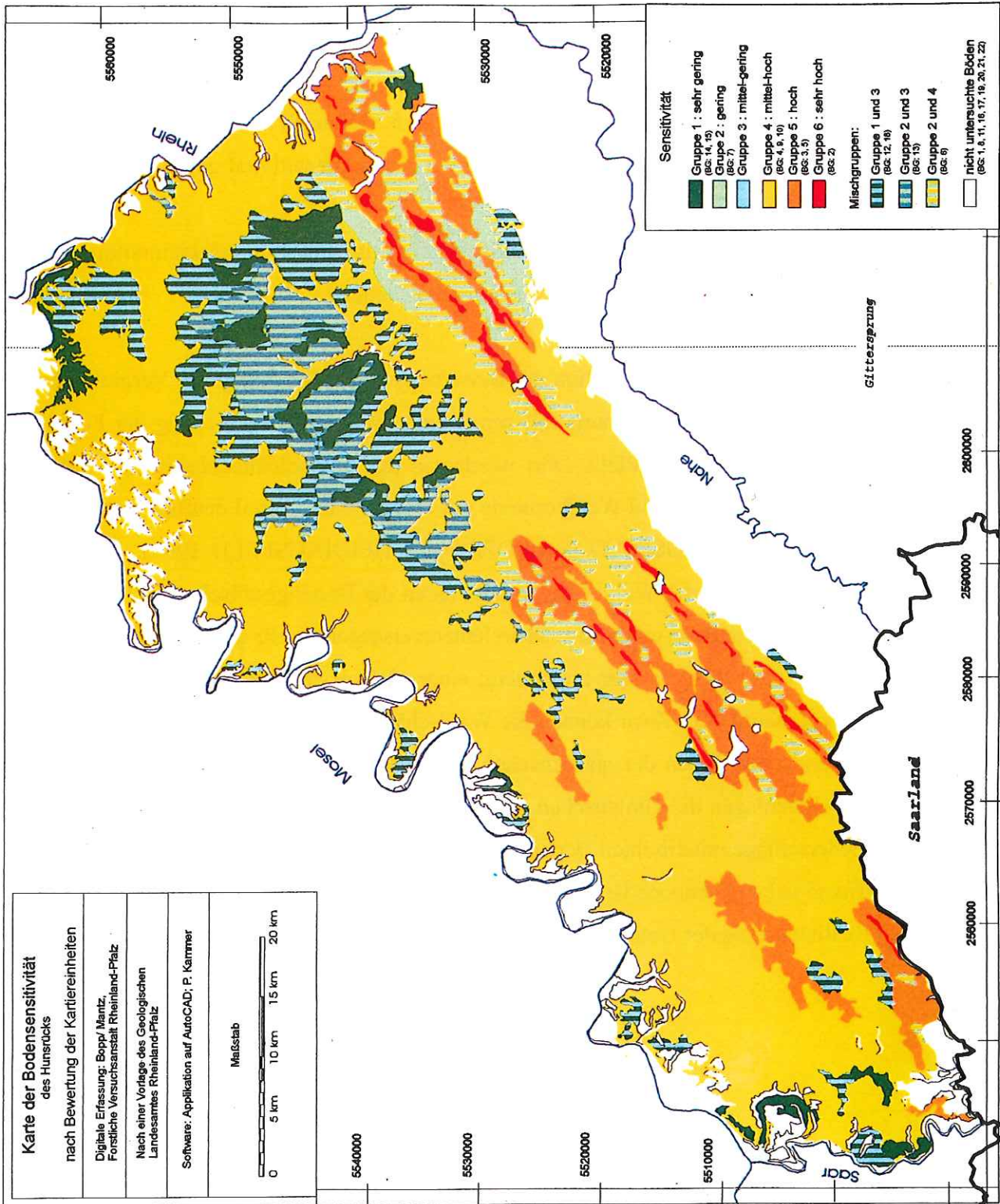
Auf diesen, gegenüber den aufgezeigten Belastungen hoch sensitiven Böden, sind Restaurationsmaßnahmen zur langfristigen Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit der Waldbestände unausweichlich. Bezüglich der waldbaulichen Empfehlungen und Bodenbehandlungsmaßnahmen für diese Gruppe gelten die Vorschläge, die im Rahmen der Substratgruppen 7, 8, 9 und 16 im Kapitel 4.5 unterbreitet wurden.

Maßnahmen zur Vermeidung fortschreitender systeminterner Bodenversauerung und zum Schutz der hauptsächlich im Auflagehumus gespeicherten Nährstoffvorräte sind hier besonders vordringlich. Eine behutsame und schonende Bodenrestoration ist sicherlich nicht kurzfristig wirksam, sondern kann erst im Verlauf von Jahrzehnten die erwünschte Wiederherstellung eines standortstypischen, ökochemischen Mineralbodenzustandes und Nährstoffkreislaufes erzielen, ist aber mit nur geringen Risiken für Ökosystem und Hydrosphäre verbunden.

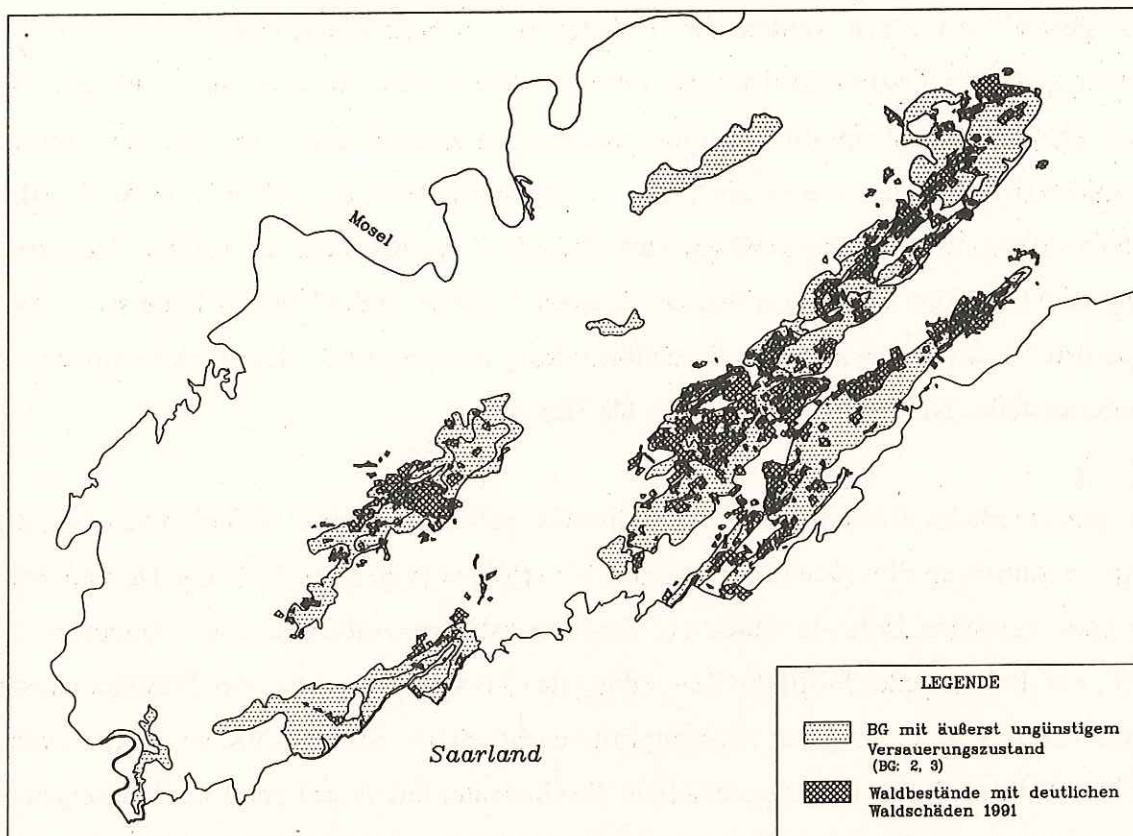
In Karte 5.4 ist die räumliche Verteilung der 6 ausgeschiedenen Sensitivitätsgruppen graphisch dargestellt. Das mit der Hilfe des Bewertungsverfahrens hergeleitete Gesamtergebnis liefert einen großräumigen Überblick mittlerer Zustände auf kleinmaßstäbiger Ebene. Es überwiegen Gelb- und Ockerfarbtöne der Gruppen 4 und 5. Demnach besitzen drei Viertel der Fläche des Untersuchungsgebietes mittlere bis hohe und hohe Sensitivität gegenüber den beschriebenen Belastungen.

Zu beachten ist, daß die Befunde nur für Waldgebiete gültig sind und daß kleinräumig von den Befunden erheblich abweichende Zustände vorliegen können.

Interessante Hinweise auf die Plausibilität der Bewertungsergebnisse bringt ein Vergleich der Befunde der vorliegenden Untersuchung mit denen einer früheren Untersuchung der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz. Dort wurden in den Hunsrückhochlagen aus Color-Infrarotaufnahmen flächendeckend Waldbestände mit einem hohen Anteil deutlich geschädigter Bäume kartiert (HEIDINGSFELD und BOPP 1992, HEIDINGSFELD 1993). Die Verschneidung derart geschädigter Waldbestände mit Böden der Bodengesellschaften 2, 3 und 5 (Versauerungszustand: äußerst ungünstig, Nährelementversorgung: sehr ungünstig bis äußerst ungünstig, Sensitivität: hoch bis sehr hoch) zeigt eindrucksvoll einen hohen Grad der Übereinstimmung (vgl. Karte 5.5). Zwar können die Waldschäden nicht ausschließlich auf die ungünstigen Zustände der Böden der quarzitischen Hunsrückhochlagen zurückgeführt werden, weil in diesen Höhenlagen die klimatischen Rahmenbedingungen (verkürzte Vegetationsperiode, hohe Niederschläge mit erhöhten Depositionsraten für Schadstoffe) sicherlich Einfluß auf den Waldzustand haben. Dennoch ist die augenfällig große Übereinstimmung ein Indiz für einen hohen Realitätsbezug der Untersuchung und die Praxisrelevanz des Verfahrens.



Karte 5.4: Gesamtergebnis: Karte der Bodensensitivität: Die Böden der Bodengesellschaften (BG) 6, 12, 13 und 18 wurden getrennt bewertet, aber als eine Einheit kartiert und deshalb schraffiert dargestellt. Alle Angaben sind nur für Waldgebiete gültig.



Karte 5.5: Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet mit Böden äußerst ungünstigen Versauerungszustands (gepunktete Flächen) und flächendeckend kartierten Waldschäden (schraffierte Flächen), BG = Bodengesellschaft

5.5 Überprüfung der Validität des Bewertungsverfahrens

Im vorstehenden Kapitel wurden die Befunde des im Rahmen der hiesigen Untersuchung entwickelten Bewertungsverfahrens dargestellt. Die rechnergestützte Bewertung ist zwangsläufig pragmatisch und globalisierend. So kann bei diesem Verfahren nur ein begrenzter Ausschnitt der Zustandskennwerte und ihre Verknüpfungen in die Bewertung einfließen. Zu den hier gewählten Kriterien, Wichtungen und Verknüpfungen gibt es eine Vielzahl von Alternativen. Um die Treffsicherheit des Verfahrens zu überprüfen, wurde daher eine Expertenbefragung durchgeführt. Hiermit sollte getestet werden, in welchem Umfang verständige und kenntnisreiche Experten, denen alle Daten der einzelnen Profile zur Verfügung stehen, zu abweichenden Bewertungen im Hinblick auf den Versauerungsstatus, den Nährelementstatus

und die Bodensensitivität am jeweiligen Profil kommen. Zu diesem Zweck konnten drei Bodenexperten¹¹ gewonnen werden, die im Umgang mit bodenchemischen Analysedaten sehr vertraut sind. Als Testkollektiv wurden durch Zufallsauswahl aus dem Gesamtkollektiv (337 Bodenprofile) 30 Bodenprofile bestimmt und dazu in tabellarischer Form alle zur Verfügung stehenden (Roh-) Daten übersichtlich zusammengestellt (Titeldaten, chemische Analysedaten, Nährelementvorräte). Um zu gewährleisten, daß alle Gutachter die ausgewählten Bodenprofile sinnlich bewerten, wurden im Begleitschreiben Zielsetzung der Untersuchung sowie für die Expertise als wichtig erachtete Informationen kurz erläutert (z.B. Begriffsdefinitionen: Versauerungsstatus, Nährelementstatus, Durchlässigkeit).

Die gutachterliche Bewertung der Einzelprofile sollte nach einer einheitlichen 6-stufigen Skala in Anhalt an die Tabelle 5.5 a und 5.5 b erfolgen (vgl. Kap. 5.4). Zur Dokumentation der gutachterlichen Befunde wurde ein Bewertungsbogen vorbereitet (vgl. Anhang 4, Tab. 4.23), auf dem für jedes Profil die Beurteilung des Versauerungsstatus, des Nährelementstatus sowie deren Verknüpfung zur Gesamtprofilbewertung (= Sensitivität) eingetragen werden konnte. Auf dem Bewertungsbogen sollten die Gutachter ihre jeweiligen Entscheidungen kurz begründen. Das erhöht die Transparenz der Expertise und ermöglicht die Nachvollziehbarkeit der Befunde. Diese Vorgehensweise stellt die Vergleichbarkeit der Expertisen untereinander sowie mit den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung sicher.

Neben der Überprüfung der Praxisrelevanz soll diese Befragung auch Rückschlüsse auf die im Rahmen des Bewertungsverfahrens getroffenen Einstellungen bezüglich Auswahl, Gewichtung und Verknüpfung der Kennwerte liefern. Gegebenenfalls können die Erkenntnisse, die aus dem Vergleich der Befunde der Expertenbefragung mit denen des Bewertungsverfahrens gewonnen werden, in die rechnergestützte Profilbewertung aufgenommen und das Verfahren somit optimiert werden.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Expertenbefragung vorgestellt und die Konsequenzen für das entwickelte Verfahren diskutiert (vgl. Kap. 5.5.4).

¹¹ Auch an dieser Stelle sei Herrn Dr. G. Schüler (Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz), Herrn Dr. J. Gauer (Forstdirektion Rheinhessen-Pfalz) und Herrn J. Diesler (Forstdirektion Koblenz) für die bereitwillige Bearbeitung der Bodenprofildaten gedankt.

5.5.1 Versauerungsstatus

Zum Vergleich der Bewertungsbefunde wurden die 30 Profile des Testkollektivs gemäß ihrer Einstufung durch das Bewertungsverfahren geordnet (Stufe 1 bis Stufe 6) und den Ergebnissen der einzelnen Gutachter gegenübergestellt. Die Befunde der insgesamt 90 Wertungen¹² sind in Tabelle 5.6 zusammengestellt. Ein Drittel aller Wertungen stimmten hinsichtlich des Versauerungsstatus mit der Zuordnung der hiesigen Untersuchung überein. Weitere 50% der Wertungen ordneten sich in eine benachbarte Stufe ein. Wird als Kriterium für die gültige Einschätzung der Profile eine maximale Abweichung von einer Stufe vom Bewertungsergebnis der hiesigen Untersuchung akzeptiert, so waren 83,3 % der Wertungen ausreichend treffsicher. 13 Wertungen (= 14,4 %) wichen um 2 Stufen, zwei (= 2,3 %) wichen um 3 Stufen ab.

Bezüglich der übereinstimmenden bzw. abweichenden Einstufung ist außer dem Betrag auch die Richtung der Abweichung von besonderem Interesse, um daraus auf mögliche Gründe für die andere Bewertung der Profile zu schließen. Von den 60 abweichenden Wertungen, wurde von den Gutachtern der Versauerungszustand 52 mal (= 87 %) günstiger und nur 8 mal (= 13 %) ungünstiger bewertet.

Die Auswertung der Begründungen liefert Hinweise, daß die pH-Werte und ihre Zuordnung zu den Pufferbereichen vermutlich für die Entscheidung der Experten das hauptsächlich ausschlaggebende Kriterium für die Bewertung des Versauerungsstatus sind. Bedingt durch die vergleichsweise einförmige chemische Ausstattung im Hunsrück auf niedrigem Niveau könnten daher bereits erste Anzeichen eines leichten Anstieges der pH-Werte mit der Mineralbodentiefe zur günstigeren Einschätzung der Bedingungen seitens der Experten führen.

¹² Zur Auswertung der Expertisen wurden zunächst alle 3 mal 30 Einzelbewertungen zusammengefasst und geprüft, wieviele der insgesamt 90 Wertungen mit denen des automatisierten Verfahrens identisch sind.

hiesige Untersuchung	GUTACHTER 1	GUTACHTER 2	GUTACHTER 3
Profile (ARNR) der STUFE 1	sehr günstig		
2202	1	1	1
Profile (ARNR) der STUFE 2	günstig		
keine			
Profile (ARNR) der STUFE 3	mäßig günstig		
7003	3	4	4
2444	3	4	4
Profile (ARNR) der STUFE 4	ungünstig		
7016	4	3	3
2245	4	4	4
2407	3	4	3
2411	3	3	2
2446	4	4	5
9005	4	4	3
1098	5	4	4
2145	4	4	4
2403	4	4	5
Profile (ARNR) der STUFE 5	sehr ungünstig		
2251	6	4	4
1077	5	5	5
1052	3	4	3
2394	5	4	4
2414	5	4	4
2330	4	4	4
2343	5	4	4
2433	4	4	4
2230	5	4	4
2493	4	4	4
7027	5	4	3
7014	4	4	4
Profile (ARNR) der STUFE 6	äußerst ungünstig		
1057	3	4	3
1060	6	4	4
2106	5	4	5
2234	5	4	4
2420	5	5	5
2448	5	4	5

Tab. 5.6: Ergebnis der Expertenbefragung: Versauerungsstatus. Die Reihenfolge der 30 Profile (ARNR = Archivnummer) ergibt sich aus ihrer Einstufung durch das Bewertungsverfahren. **Fettgedruckte** Ziffern = gleiche Einstufung der Profile durch die Experten

Die Befunde zeigen, daß den ersten 20 cm des mineralischen Oberbodens überragende Bedeutung zugemessen wird. Allerdings scheinen ungünstige Basensättigungen des Oberbodens sowie die Tiefenlage der Versauerungsfront im Mineralboden für die Gutachter eine eher geringere Rolle zu spielen (hauptsächlich Gutachter 2 und Gutachter 3, vgl. Tab. 5.6). So wird

das Profil 1057 (ähnlich Profile 1052, 1060) von den Gutachtern mit 2 bis 3 Stufen günstiger bewertet als vom hiesigen Verfahren, obwohl die Basensättigung bis 30 cm Bodentiefe weniger als 7% beträgt (Profil 1052 < 10 %, Profil 1060 < 6 %) und sich die Versauerungsfront bei allen Profilen unterhalb der Schürftiefe (> 120 cm Bodentiefe) befindet.

Mit großer Übereinstimmung wurden von den Gutachtern, anhand der dafür typischen Nähr-elementverhältnisse im obersten Mineralbodenhorizont, an ca. 50 % der Profile Bodenschuttkalkungen diagnostiziert. Auch dieser Befund dürfte zu der insgesamt günstigeren Einstufung des Versauerungsstatus beigetragen haben. Schließlich wurde von Gutachter 1 auch darauf hingewiesen, daß aufgrund unplausibel hoher C_{org} -Werte im A_h -Horizont bei einigen Profilen die scheinbar günstigen Bedingungen auch auf eine unsaubere Trennung von Humusauflage und Mineralboden bei der Probenahme zurückzuführen sein könnten.

5.5.2 Nährelementstatus

Die Befunde zur Einschätzung des Nährelementstatus sind, analog zur Vorgehensweise beim Versauerungsstatus, in Tabelle 5.7 dargestellt. Circa 29 % der Wertungen stimmten bezüglich ihres Nährelementstatus mit der automatisierten Bewertung überein, weitere 46 % ordneten sich in eine benachbarte Stufe ein. In Bezug auf den definierten Toleranzbereich (vgl. Kap. 5.5.1) fiel der Vergleich der Expertisen mit dem hiesigen Verfahren mit 74,4 % ausreichend treffsicherer Wertungen etwas schlechter aus als beim Versauerungsstatus. 19 Wertungen (= 21,2 %) wichen um 2 Stufen und 4 Wertungen um 3 Stufen (= 4,4 %) ab.

Im Blick auf die Richtung der abweichenden Einstufung stellt sich das Ergebnis im Vergleich zum Versauerungsstatus genau umgekehrt dar. Circa 13 % der abweichenden Wertungen wurden von den Gutachtern günstiger und ca. 87 % ungünstiger bewertet.

Die Ursache für diesen Sachverhalt liegt allem Anschein nach darin begründet, daß seitens der Gutachter die *kurzfristig* verfügbaren Nährstoffvorräte und die Nährstoffkreisläufe sehr stark unter Berücksichtigung der Nutzungsmöglichkeiten der *aktuell* aufstockenden Baumarten bewertet werden. Grundlage der Entscheidung wären demnach die nach bisherigen Erkenntnissen spezifischen Fähigkeiten der jeweiligen Baumarten, den Mineralboden in Abhängigkeit seiner Beschaffenheit zu durchwurzeln. Beispielsweise können demzufolge ähnlich hohe Vor-

ratskennwerte bei verschiedener Bestockung (Fichte, Eiche) seitens der Experten zu durchaus verschiedener Bewertung der Nährstoffvorräte führen. So bewertet Gutachter 1 die vor allem ab 30 cm Bodentiefe sehr reichlich verfügbaren Nährelementvorräte (0 - 90 cm Bodentiefe: Ca-Vorrat: 9290 kg/ha, Mg-Vorrat: 3540 kg/ha, K-Vorrat: 705 kg/ha) des mit Fichten bestockten Profils 2411 ungünstiger (Stufe 3: mäßig günstig) als die weitaus geringeren Nährelementvorräte des mit Buchen bestockten Profils 7003 (vgl. Tab. 5.6; Stufe 2: günstig; 0 - 90 cm Bodentiefe: Ca-Vorrat: 1490 kg/ha, Mg-Vorrat: 399 kg/ha, K-Vorrat: 314 kg/ha).

Demgegenüber bezieht die Bewertung des Nährelementstatus im Zuge des automatisierten Verfahrens die aktuell aufstockende Baumart und deren Möglichkeit, die insgesamt im Solum (0 - 90 cm) austauschbaren Vorräte zu nutzen, zunächst nicht ein.

Häufig bezieht sich die Begründung der Experten zur Bewertung des Nährelementstatus daher auf die Diskrepanz zwischen tatsächlicher Ausstattung zum einen und Verfügbarkeit der Nährstoffvorräte zur Versorgung der Bestände zum anderen. Beispielsweise wird die, im Rahmen des automatisierten Verfahrens positiv bewertete, verringerte Durchlässigkeit des Sickerwassers durch S_d -Horizonte und die damit häufig einhergehenden stark erhöhten Nährstoffvorräte im Unterboden (vgl. Kap. 5.5.4) von den Gutachtern in aller Regel aufgrund verringert Verfügbarkeit (wurzelfeindliches Milieu im S_d -Horizont) negativ beurteilt. Auch die Effekte, die dadurch möglicherweise ein gehemmtes Fortschreiten der Versauerungsfront in die Tiefe bewirken könnten, wurden demzufolge von den Experten nicht begünstigend taxiert.

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß der Nährelementstatus der ausgewählten Profile durchschnittlich von den Gutachtern 1, 2 und 3 (auch in dieser Reihenfolge, vgl. Tab. 5.7) ungünstiger eingestuft wurde als durch das Bewertungsverfahren der vorliegenden Untersuchung. Wie vorstehend ausgeführt, dürften die Gründe hierfür letztlich in unterschiedlichen Auffassungen bezüglich der Relevanz der Nährstoffvorräte des tieferen Mineralbodens für die Versorgung der Baumbestände liegen (vgl. dazu Kap. 5.5.4). Wie schon beim Versauerungsstatus hat die Beschaffenheit des Oberbodens für die Experten zur Beurteilung des Nährelementstatus herausragende Bedeutung.

hiesige Untersuchung	GUTACHTER 1	GUTACHTER 2	GUTACHTER 3
Profile (ARNR) der STUFE 1	sehr günstig		
2411	3	2	3
2444	1	2	3
2202	1	1	1
2145	3	3	4
Profile (ARNR) der STUFE 2	günstig		
2407	2	3	3
7014	3	3	4
Profile (ARNR) der STUFE 3	mäßig günstig		
1052	5	5	5
2414	6	4	6
2245	4	4	4
7003	2	3	4
9005	4	5	5
1098	4	4	5
2403	2	4	6
Profile (ARNR) der STUFE 4	ungünstig		
2251	4	6	6
2354	3	5	5
7016	4	4	6
2446	4	4	6
2234	4	4	5
2493	4	5	5
7027	4	5	6
2448	5	4	6
Profile (ARNR) der STUFE 5	sehr ungünstig		
1057	5	6	6
1060	5	6	6
1077	5	6	6
2343	4	6	6
2433	4	5	5
2238	5	6	6
2420	4	6	6
Profile (ARNR) der STUFE 6	äußerst ungünstig		
2330	5	6	6
2106	4	6	6

Tab. 5.7: Ergebnis der Expertenbefragung: Nähelementstatus. Die Reihenfolge der 30 Profile (ARNR = Archivnummer) ergibt sich aus ihrer Einstufung durch das Bewertungsverfahren. **Fettgedruckte** Ziffern = gleiche Einstufung der Profile durch die Experten

5.5.3 Bodensensitivität

Zuletzt sollten die Experten die Einzelresultate zur Gesamtprofilbewertung im Hinblick auf die Empfindlichkeit der Bodenprofile gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung zusammenführen. Tabelle 5.8 gibt diesbezüglich Aufschluß über die einzelnen Befunde.

Demnach stimmten 34,4 % der Wertungen der Gutachter mit dem hiesigen Bewertungsergebnis überein. Weitere 48,8 % der Wertungen ordneten sich in eine benachbarte Gruppe ein. Gemessen am Toleranzbereich (vgl. Kap. 5.5.1) ergaben sich somit zusammen 82,3 % ausreichend treffsichere Wertungen. 13 Wertungen (= 14,4 %) wichen um 2 Gruppen und nur 3 Wertungen (= 3,3 %) um 3 Gruppen ab.

Die Richtung der abweichenden Eingruppierung stellt sich ähnlich wie beim Nährelementstatus dar. So waren 15 % der abweichenden Wertungen günstiger und 85 % ungünstiger.

Bezüglich der Ursachen kann sinngemäß das im vorstehenden Kapitel Gesagte gelten. Offenbar pausen sich hier die Befunde des Nährelementstatus durch. Dies dürfte auch Ausdruck dafür sein, daß die Nährelementausstattung der Mineralböden für die Gutachter im Vergleich zur Bodenversauerung eine dominierende Stellung einnimmt. Bei beiden Indikatoren sind mehr oder weniger die ersten 30 cm des Mineralbodens für die Gutachter ausschlaggebend für die Bewertung.

Konsequenterweise wurde die Sensitivität der Profile vom automatisierten Bewertungsverfahren durchschnittlich am günstigsten beurteilt, weil der chemischen Beschaffenheit des tieferen Mineralbodens vergleichsweise hohe Bedeutung beigemessen wurde (vgl. Kap. 5.5.4).

hiesige Untersuchung	GUTACHTER 1	GUTACHTER 2	GUTACHTER 3
Profile (ARNR) der GRUPPE 1	sehr gering		
2411	5	2	2
2444	2	2	2
2202	1	1	1
2145	2	3	3
Profile (ARNR) der GRUPPE 2	gering		
2245	4	3	4
2407	5	3	3
7003	2	2	4
7014	4	3	4
Profile (ARNR) der GRUPPE 3	mittel - gering		
2354	4	5	4
2414	6	3	5
9005	4	5	4
2403	2	4	4
Profile (ARNR) der GRUPPE 4	mittel - hoch		
2251	5	5	5
1057	5	5	4
1052	6	4	4
7016	5	4	4
2446	4	4	5
1098	5	4	4
2238	6	5	6
2493	4	5	4
7027	5	4	5
2420	5	5	5
2448	5	4	5
Profile (ARNR) der GRUPPE 5	hoch		
1077	5	5	5
2343	5	5	5
2433	3	5	5
2106	5	4	5
2234	6	4	5
Profile (ARNR) der GRUPPE 6	sehr hoch		
1060	6	5	5
2330	5	5	5

Tab. 5.8: Ergebnis der Expertenbefragung: Gesamtprofilbewertung der Sensitivität gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung. Die Reihenfolge der 30 Profile (ARNR = Archivnummer) ergibt sich aus ihrer Einstufung durch das Bewertungsverfahren. **Fettgedruckte** Ziffern = gleiche Einstufung der Profile durch die Experten

5.5.4 Abschließende Wertung und Schlußfolgerungen

Die Überprüfung des automatisierten Bewertungsverfahrens durch eine Expertenbefragung hat gezeigt, daß die weit überwiegende Anzahl der Wertungen der Gutachter mit ausreichender Genauigkeit mit den Bewertungsstufen bzw. Bewertungsgruppen der hiesigen Untersuchung übereinstimmt.

Ein wesentlicher Grund für die festgestellten Abweichungen in den Bewertungen ist, daß das automatisierte Verfahren Profile mit diagnostizierten S_d -Horizonten aufgrund zu erwartender verminderter Durchlässigkeit für den Sickerwasserstrom generell mit einem Bonus versieht (durch den Abschlag von -2 beim Indikator Durchlässigkeit, vgl. Kap. 5.3.3.3). Demgegenüber wurden tiefliegende S_d -Horizonte und Pseudovergleyungsmerkmale bei tiefreichend versauerten und basenverarmten Böden von den Gutachtern nicht begünstigend eingewertet. Zudem ist davon auszugehen, daß der Anteil von Böden mit aktueller hydromorpher Dynamik durch die Feldansprache der Profile überschätzt wird (GAUER, mdl. Mittl. 1995, SPIES, mdl. Mittl. 1995). Solche Fehleinschätzungen erkannten die Gutachter in der Regel anhand der konkreten Datenlage, jedoch nicht das automatisierte Verfahren. Daher können in Einzelfällen solche Profile vom hiesigen Verfahren zu günstig bewertet werden. So wurde aufgrund des geschilderten Sachverhalts Profil 2238 vom automatisierten Verfahren hinsichtlich der Gesamtbewertung deutlich günstiger bewertet als von den Gutachtern, weil das Profil möglicherweise unzutreffend als hydromorph gekennzeichnet war.

Von Vorteil wäre, bei hydromorphen Böden bereits beim Feldbefund eine Trennung in basenreiche und basenarme Typen vorzunehmen und diese Einschätzung bzw. den Ansprachebefund anhand der Analysedaten zu überprüfen. Durch differenziertere Titeldaten zu den Bodenprofilen könnten künftig Stratifizierungen mit aussagekräftigeren Teilkollektiven durchgeführt und die Bewertungsergebnisse verbessert werden.

Zu gravierenden Bewertungsunterschieden zwischen den Gutachtern einerseits und dem hiesigen Verfahren andererseits kam es auch dann, wenn der Anteil der im Humus gespeicherten Nährelementvorräte an den Gesamtvorräten (Humusaufgabe plus Mineralboden) besonders hoch war (z.B. Profil 1052¹³, vgl. Tab. 26). Zwar wurden im Rahmen des automatisierten Verfahrens bei Vorliegen von Humusanalysen diese Vorräte in die Bewertung mit einbezogen

¹³ Humusvorräte: Ca = 355 kg/ha, Mg = 216 kg/ha, K = 489 kg/ha, Mineralbodenvorräte 0 - 90 cm : Ca = 390 kg/ha, Mg = 32 kg/ha, K = 390 kg/ha

(vgl. Kap. 5.3.3.2). Da aber nur für 5 der 30 Profile des Testkollektivs überhaupt Humusanalysen vorhanden waren, wurden diese den Gutachtern aus Gründen mangelnder Vollständigkeit des Datenmaterials nicht zur Verfügung gestellt. Dies erwies sich nachträglich als nachteilig, da ansonsten diese Profile seitens der Gutachter vermutlich treffsicherer taxiert worden wären.

Größere Abweichungen in der Zustandsbewertung der Gutachter sind in den allermeisten Fällen erklärbar und liegen hauptsächlich in unterschiedlichen Auffassungen bezüglich der Wurzelreichbarkeit von Nährelementen im Unterboden begründet.

Hier stellt sich die Frage, ob es gerechtfertigt ist, die Nährstoffvorräte des mineralischen Unterbodens in die Bewertung mit einzubeziehen (vgl. unten).

Nach der Auswertung der Expertenbefragung wird der Befund bekräftigt, daß im obersten Mineralbodenbereich eine weitestgehende Nivellierung der chemischen Ausstattung auf sehr niedrigem Niveau festzustellen ist. Dort befinden sich 98 % der untersuchten Profile im Aluminium- und ungünstigeren Pufferbereichen ($\text{pH}(\text{CaCl}_2) < 4.2$). Im anschließenden Bodenbereich (ca. 10 - 30 cm Bodentiefe) erfüllen diese Bedingungen immer noch 88 % aller Profile. Demgegenüber wurde bei ca. der Hälfte aller untersuchten Böden, vor allem bei Böden mit hydromorpher Dynamik bzw. lößlehmreichen Mittellagen vorzugsweise im unteren Bodenbereich (ca. 30 - 90 cm Bodentiefe), ein sprunghafter Anstieg potentiell pflanzenverfügbarer Nährelementvorräte festgestellt.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Nährstoffvorräte, die sich im tieferen Mineralboden befinden, in die Bewertung der Böden mit einbezogen. Diese Vorgehensweise ist zunächst einmal deshalb kritisch zu sehen, weil die Durchwurzelung des Bodens mit zunehmender Bodentiefe in der Regel rasch abnimmt. Es stellt sich demnach die Frage, ob und gegebenenfalls in welchem Ausmaß die aufstockenden Baumbestände in der Lage sind, auch tiefere Bodenbereiche zu durchwurzeln und die dort austauschbar vorliegenden Nährstoffe zu nutzen.

Durchwurzelungsintensität und Tiefenverteilung der Feinwurzeln werden durch eine Reihe von Faktoren gesteuert. Hier sind in erster Linie bodenchemisches Milieu, Lagerungsdichte sowie Bodenwasser- und Lufthaushalt zu nennen. Dabei sind nach den vorliegenden Erkenntnissen die Baumarten unterschiedlich in der Lage, mit der jeweiligen Bodenbeschaffenheit auszukommen und den Mineralboden horizontal und vertikal zu durchwurzeln (KREUTZER 1961, BIBELRIETHER 1966, KÖSTLER et al. 1968). Einige neuere Untersu-

chungen deuten darauf hin, daß möglicherweise die Ursachen mangelnder Tiefendurchwurzelung hauptsächlich in der starken Versauerung der Oberböden und weniger in bodenmechanischen oder bodenhydrologischen Hindernissen zu suchen sind (EICHHORN 1987, EICHHORN 1991, RASTIN 1991, ULRICH 1991, MURACH 1984). Wenn demnach unter den heutigen Bedingungen hoher Bodenazidität die Wurzeln stark versauerte Bodenbereiche vielfach nicht passieren können (vgl. Säuresperre, Kap. 4), besteht die Gefahr, daß vor allem jüngere Waldbestände nicht mehr in der Lage sind, die im Unterboden verfügbaren Nährstoffvorräte zu nutzen und in den großen Nährstoffkreislauf einzubeziehen (EICHHORN 1987, 1991). Darüber hinaus kann das Risiko wachsen, daß diese Vorräte langfristig durch die Tiefenversickerung für die aufstockenden Bestände für immer verloren gehen.

Andererseits erreichen bei ungehemmter Entwicklung aufgrund günstigen Bodenmilieus alle Baumarten mehr oder weniger die gleiche Tiefe mit ihren Wurzeln (BIBELRIETER 1966). Dabei hängt es auch stark von der Nährstoffverteilung im Boden ab, welche Baumart auf welchem Boden welche Wurzeltracht ausbildet. KREUTZER (1994 a, 1994 b) zeigt an gut nährstoff- und wasserversorgten Fichten im Höglwald, daß Wurzeln (im übrigen nicht nur der Fichte) sich durchaus an saure Bodenverhältnisse anpassen und effektive Entgiftungsmechanismen in der Rhizosphäre besitzen müssen. Allein Al-Konzentrationen oder pH-Werte im Oberboden lassen seines Erachtens keine ausreichenden Rückschlüsse auf die Versorgung und Vitalität der Bestände zu. Vielmehr sei der ganze Wurzelraum in die Betrachtung einzubeziehen. Unterhalb von 50 cm Bodentiefe weisen die Böden im Höglwald höhere pH-Werte und eine gute Nährstoffausstattung auf. Dort wurzeln die Fichten tiefer als 2 m und können diesen Nährstoffvorrat anzapfen (ROTHER 1994).

Nach der allgemeinen Lehrmeinung sind für zahlreiche Baumarten Stauschichten hydromorpher Böden aufgrund ihres für die Wurzeln dort ungünstigen Lufthaushaltes ein wesentlicher begrenzender Faktor der vertikalen Tiefenerschließung des Wurzelraums (KREUTZER 1961, ZOTH und BLOCK 1992, KÖSTLER et al. 1968). Dagegen fand RASTIN (1991) in Pseudogleyen unter Fichtenbeständen im Vorderen Hunsrück mit starker Oberbodenversauerung und guter Nährelementausstattung im Unterboden noch in 150 cm Bodentiefe in bemerkenswertem Umfang vitale Feinwurzeln in einem Bereich, der nach den am gleichen Standort durchgeführten, umfangreichen Tensiometermessungen von SCHMIDT (1992) lange Zeit im Jahr wassergesättigt ist.

Vergleichende Untersuchungen von Feinwurzelsystemen bei unterschiedlich geschädigten Altlichten an hessischen Dauerbeobachtungsflächen kamen zu dem Ergebnis, daß ungeschädigte Fichten im Unterboden auf Pseudogley-Braunerde eine bessere Tiefenerschließung mit vitalen Feinwurzeln aufweisen als Vergleichsbäume auf Podsol-Braunerde (EICHHORN 1987). Diese Untersuchungen könnten Hinweise liefern, daß, möglicherweise in stärkerem Maße als bisher angenommen, selbst Fichtenfeinwurzeln in der Lage sind, die in tieferen Horizonten vorliegenden Nährstoffe zu erreichen und zu nutzen, auch wenn diese Bereiche über längere Zeit im Jahr wassergesättigt sind.

Neuere Untersuchungen von Sickerwässern an rheinland-pfälzischen Bodendauerbeobachtungsflächen zeigen, daß die Lösungsphase durch „kapillaren Aufstieg“ des Bodensickerwassers nachweisbar mit Nährstoffionen angereichert ist und somit auf den Basenanstieg im Oberboden über Stauhohizonten stärker reagiert als die Festphase. Demzufolge könnten Bestände, die auf Pseudogleyen mit tieferliegenden Stauhohizonten stocken, möglicherweise zeitweilig auf diesem Wege von Nährstoffvorräten des Unterbodens profitieren.

Pseudogleye müssen im Blick auf die Bewirtschaftung von Waldbeständen differenziert beurteilt werden. Aus standörtlicher Sicht können unter Berücksichtigung der kleinräumlichen Gegebenheiten basenreiche Pseudogleye dann durchaus günstig zu beurteilen sein, wenn an diesem Standort angepaßte, tiefwurzelnde Bestände die oberhalb der Stauschichten angereicherten Nährstoffvorräte zu ihrer Versorgung nutzen können. All dies spricht dafür, den Nährstoffvorräten des tieferen Mineralbodens angemessenes Gewicht zu geben und sie in die Bewertung der stofflichen Beschaffenheit der Böden auch hinsichtlich der Nährstoffbereitstellung mit einzubeziehen. Konsequenterweise sollten daher forstliche Bewirtschaftungsmaßnahmen zum Ziel haben, die im tieferen Mineralbodenbereich häufig noch reichlicher vorhandenen, potentiell pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräte durch Förderung der Tiefendurchwurzelung zu erschließen und in den Nährstoffkreislauf einzuschleusen.

Insgesamt erscheint das automatisierte Bewertungsverfahren geeignet, den Bodenzustand mit hinreichender Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu taxieren. Die Überprüfung mit Hilfe der Expertenbefragung bestätigt diesen Befund. Es wurden keine systematischen Fehler oder grobe Bewertungsunterschiede in den Bewertungsmaßstäben erkannt. Größere Abweichungen begründen sich meist auf Bodenbesonderheiten oder auf individuelle Auffassungen der Gutachter. Es erscheint daher sinnvoll, die „Systemeinstellungen“ bezüglich Auswahl, Gewichtung und Verknüpfung der wertgebenden Kriterien beizubehalten. Die Intension des automa-

tisierten Verfahrens zielt nicht auf die Einschätzung der Nährelementausstattung zur Versorgung der aktuell aufstockenden Baumarten, sondern auf die objektive und vorurteilsfreie Bewertung der meßbar vorgefundenen Nährelementvorräte. Aus den Befunden soll anschließend geprüft werden, inwieweit der aufstockende Baumbestand in der Lage ist, aufgrund seiner erwarteten Fähigkeit zur Durchwurzelung des Mineralbodens, diese Vorräte zu nutzen. Somit dient der Nährelementstatus beim automatisierten Verfahren zur Herleitung von Empfehlungen für waldbauliche Maßnahmen im Hinblick auf die mittel- bis langfristige Aufrechterhaltung bzw. Wiederherstellung stabiler Waldbestände. Andererseits können bei aktuell nicht standortgerechter Bestockung die kurz- bis mittelfristigen Risiken und Gefahren für die Bestände und die Nährstoffvorräte im Boden aufgezeigt und Maßnahmen abgeleitet werden, die auf einen Wechsel der Bestockung hinausgehen. Durch ein rechnergestütztes Verfahren, das in der Lage sein soll, den Zustand einer großen Anzahl von Böden zu bewerten, werden - bei der großen Vielfalt der Ausprägungen - kaum alle Besonderheiten einzelner Böden treffsicher einzuordnen sein. Hier ist der Fachmann gefordert, die Plausibilität des Bewertungsergebnisses kritisch zu prüfen und gegebenenfalls Einzelbewertungen zu korrigieren.

5.6 Zusammenfassende Diskussion und Schlußfolgerungen

5.6.1 Konsequenzen aus den Untersuchungsbefunden für die bodenschutzrelevante Bodenkartierung und die bodenkundliche Feldaufnahme

Die Untersuchung der Bodengesellschaften bzw. der Auswerteeinheiten läßt den Schluß zu, daß die Mittellagen in der sonst vom geologischen Gesteinsuntergrund vergleichsweise homogenen Landschaft die wichtigsten ökologischen Differenzierungen hervorrufen (vgl. auch SEMMEL 1989) und damit auch für die Sensitivität der Böden gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung von besonderer Bedeutung sind. Um die Auswirkungen der vorzugsweise an Feldmerkmalen angesprochenen Lagen, insbesondere der Mittellagen, besser verstehen zu können, wären jedoch konkrete Kenntnisse über ihre stoffliche Zusammensetzung notwendig. Eine Überprüfung der diagnostischen Eigenschaften der Lagen durch bodenanalytische Kennwerte konnte im Zuge dieser Arbeit nicht geleistet werden, weil die zweifelsfreie Zuordnung der Tiefenstufen bzw. Horizonte zu den Lagen mit den zur Verfügung ste-

henden Daten leider nicht möglich ist¹⁴. Zur Untersuchung dieser und daraus aufgeworfener Fragestellungen wäre es wünschenswert, neben der üblicherweise praktizierten horizontweisen- bzw. tiefenstufenbezogenen Beprobung der Profile, die Böden auch lagenweise zu beproben. Damit könnte auch der Frage nachgegangen und durch quantitative Angaben der Bodenkennwerte beantwortet werden, in welchem Ausmaß der Deckschichtenaufbau die Pedodynamik nachweisbar beeinflusst, indem er der physikalischen Verwitterung auf autochthonem Festgestein vorgreift (VÖLKEL 1992). Zwar wird für verschiedene Mittelgebirgsregionen ein hoher Grad der Übereinstimmung zwischen Lagengrenzen der Deckschichten und Horizontgrenzen der Bodentypen beschrieben (VÖLKEL 1992: Bayerischer Wald, FRIED 1984: Odenwald, FELIX-HENNINGSSEN 1991: Osthunsrück, SABEL und FISCHER 1987: Niederwesterwald), jedoch wird von den meisten Autoren ebenso gefordert, die Ursache-Wirkungs-Beziehungen analytisch zu belegen.

Die Untersuchung der Böden im Hunsrück hat gezeigt, daß knapp die Hälfte der Böden hydromorphe Dynamik aufweisen und somit unterschiedlich starke Merkmale der Pseudovergleyung zeigen. Bodensystematisch sind die Böden den Pseudogleyen und ihren Braunerde-Subtypen zuzuordnen. Davon liegen ungefähr je die Hälfte als basenarme Formen bzw. als basenreiche Formen vor. Erstere weisen im Unterboden eine mittlere Basensättigung von ca. 27 %, letztere von ca. 70 % auf (vgl. Kap. 5.4.3, Sensitivitätsgruppen 2 und 3). Es erhebt sich die Frage, welche Faktoren diesen Tatbestand steuern.

Die Auswertung hydromorpher Bodenprofile läßt die Vermutung zu, daß dann mit einem sprunghaften Anstieg der Nährstoffvorräte im und oberhalb der S_d-Horizonte zu rechnen ist, wenn die Stausohle in lößlehmhaltigen oder lößlehmreichen Mittellagen mit hohem Tongehalt liegt. Dagegen scheint der Effekt stark erhöhter Vorräte im Unterboden sehr viel schwächer ausgeprägt zu sein, wenn die Stausohle durch eine dichtgelagerte Basislage oder einen stauenden geologischen Gesteinsuntergrund gebildet wird. Ein Indiz für die Richtigkeit dieser Annahme könnte der Befund sein, daß im erstgenannten Fall sich die Stausohle der Profile im Untersuchungsgebiet in einer mittleren Tiefe von ca. 40 cm unterhalb der Geländeoberfläche befindet, im zweiten Fall liegt sie dagegen, bedingt durch das Ausbleiben der Mittellage, im Mittel bei ca. 60 cm Bodentiefe. Auch deuten die Profildaten an, daß die basenreichere Vari-

¹⁴ Die Bodendaten entstammen der forstlichen Standortskartierung. Die Beprobung der Profile dient in erster Linie der Beschreibung der Standorte und ist auf die Bewirtschaftung der Waldbestände ausgerichtet. Bei der Profilbeschreibung erfolgt keine Aufnahme der Lagen.

ante tendenziell eher mächtigere und skelettärmere und somit wirkungsvollere Stausohlen aufzuweisen scheinen als basenärmere Pseudogleye. Erhärten sich diese Befunde, könnten sich hieraus Hinweise auf die Entwicklung der hydromorphen Böden ableiten. Ferner ließe sich eventuell bereits durch die Feldaufnahme auf den Basengehalt und damit die Sensitivität des Bodens gegenüber weiterer Versauerung schließen.

Im Untersuchungsgebiet Hunsrück scheinen primäre Pseudogleye mit mehrschichtigem Aufbau vorzuherrschen, deren Stausohle sich im Übergangsbereich zweier Deckschichten (Lagen) durch Material verschiedener Porengrößenverteilung und damit unterschiedlicher Wasserleitfähigkeit ausgebildet hat. Demnach wäre die Entwicklung der Böden geogen vorbestimmt. Bei Vorhandensein tonreicherer Mittellagen, hohen Niederschlägen und bei fehlendem lateralem Wasserentzug hätten sich demnach Pseudogleye entwickelt, während auf Standorten mit geringerem Wasserangebot Parabraunerden entstanden sind. Sekundäre (pedogene) Pseudogleye, die im Zuge der Bodenentwicklung z.B. durch Tonverlagerungsprozesse (Lessivierung) aus ehemaligen Parabraunerden mit der Stausohle in früheren B₁-Horizonten hervorgegangen sind, sind wahrscheinlich eher selten. Es muß bezweifelt werden, ob im Mittelgebirgsraum mit seinen starken denudativen Prozessen die Entwicklungszeit seit dem Ende des Pleistozäns überhaupt ausgereicht hat, um im Zuge der Pedogenese Pseudogleye aus Parabraunerdevorstufen zu entwickeln (vgl. REHFUESS 1990). Daher spielt vermutlich Tonverlagerung während der holozänen Pedogenese für die Profildifferenzierung keine nennenswerte Rolle (FELIX-HENNINGSEN 1991). Es ist zu erwarten, daß sekundäre Pseudogleye, wo sie auftreten, in der Regel vergleichsweise basenarm sind, weil sie wegen ihrer längeren Entwicklungszeit stärker vorverwittert und bedingt durch den nach unten gerichteten Sickerwasserstrom an Basen stärker verarmt sein können. Die Auswaschungsverluste von Nährstoffen hätten demnach stattgefunden, bevor sich ein die Tiefenversickerung hemmender Stauhorizont bildete. Genetisch und ökologisch völlig anders zu bewerten sind, im Vergleich zur Bodenentwicklung, rezente Prozesse der Oberbodenvernässung durch Oberbodenversauerung und andere anthropogene Einflußnahme (z.B. Verdichtung des Oberbodens durch Befahrung). Beispielsweise beschreibt ULRICH (1991) solche Prozesse, die durch nicht standortgerechten Waldbau initiiert werden (vgl. auch GENSSLER 1986). Können Bestände unter den gegebenen Bedingungen der Oberbodenversauerung das Grob- und Mittelporensystem durch ihre Wurzelröhren nicht aufrechterhalten, käme es in der Folge durch Konzentrierung des Feinwurzelsystems im humushaltigen Oberboden zur oberflächennahen Vernässung. Dieser Vorgang dürfte durch den Wegfall der Bioturbation im sauren Oberboden, durch verminderte Wasseraufnahme in-

folge reduzierter Transpiration der Bestände bei Kalamitäten oder durch Oberflächenverschlämmung bei Kahllagen im Verbund mit ungeschützter Niederschlagseinwirkung auf die Bodenoberfläche (ROTH et al. 1995) noch weiter verstärkt werden.

Darüber hinaus sind für die chemische Beschaffenheit der Deckschichten neben den bisher angeführten Faktoren Relief, anstehender Gesteinsuntergrund und äolische Einwehung noch weitere Kriterien ausschlaggebend, die zukünftig stärker berücksichtigt werden sollten. Es ist anzunehmen, daß präholozäne reliktsche Bodenbildungen die stofflichen Eigenschaften der Böden in geschützten Lagen entscheidend mit beeinflussen. ULRICH (1995) vermutet, daß Fließerden aus älteren Bodenbildungsphasen bereits als Folge präholozäner Versauerungsprozesse eine geringe Basensättigung aufweisen können (vgl. auch BENECKE 1995). Fossile Bodenbildungen, die in die Lagen eingearbeitet wurden, haben vermutlich für die Entstehung von Pseudogleyen eine besondere Bedeutung (SABEL und FISCHER 1987). Allerdings besteht die Gefahr, daß wegen reliktscher Merkmale die Bodenprofilansprache zu Fehlinterpretationen führt und dadurch beispielsweise der Anteil pseudovergleyter Böden überschätzt wird. Bei solchen Böden divergieren Profilmorphologie und rezenter Wasserhaushalt stark aufgrund früherer Stauwassermerkmale (REHFUESS 1990). Auch können nach SEMMEL (1989) Ausprägungen des Quarzit- und Tonschieferzersatzes durch Marmorierungen und hohen Anteilen an Fe-/Mn-Konkretionen aktuelle Hydromorphie vortäuschen. Danach ist davon auszugehen, daß auch ein gewisser Teil der Böden dieser Arbeit, die als Pseudogleye angesprochen wurden, aktuell keine hydromorphe Dynamik aufweisen.

Häufig wird für das Rheinische Schiefergebirge der Einfluß tertiärer reliktscher Verwitterungsprodukte auf die Neigung der Böden zur Staunässebildung erwähnt (SABEL und FISCHER 1987, FELIX-HENNINGSSEN 1991, SEMMEL 1989), doch sind diesbezüglich die Folgen für die Nährstoffausstattung weitgehend unbekannt. Auch hier ist anzunehmen, daß es sich dort um basenarme Pseudogleye handelt, wo sich die Stausohle im Bereich Basislage bzw. tertiäre Zersatzzone befindet, deren basenarmes Material (Saprolith) im Zuge der periglazialen Materialumlagerungen kryoturbat oder solifluidal (bzw. solimixtiv) in die hangenden Decklagen eingearbeitet wurde.

Die Frage, inwieweit Substrate, die sich im Liegenden der Deckschichten befinden und der tertiären Verwitterungsdecke entstammen, die Nährstoffausstattung der terrestrischen Böden mit beeinflussen, konnte im Rahmen dieser Untersuchung ebenso nicht aufgegriffen werden. Auch hier wäre eine gezielte Beprobung mit anschließender Analyse sinnvoll. Zwar untersu-

chen FELIX-HENNINGSEN und SPIES (1985) und ECKHARDT (1960) die mineralogische und chemische Beschaffenheit von tertiär zersetzten Tonschiefern, die im Rheinischen Schiefergebirge und insbesondere im Hunsrück verbreitet z.T. mehrere 10-m mächtig vorkommen. Das Augenmerk dieser Untersuchungen liegt jedoch in der tieferen Zersatzzone. Um Auskunft über den Einfluß der Zersatzzone auf die Böden zu erhalten, wäre jedoch die Kenntnis des chemischen Milieus an der Kontaktzone Zersatz/Boden von Interesse.

Ungefähr ein Drittel der Fläche des Untersuchungsgebietes nimmt den Raum der zentralen Tonschiefer-Hochflächen ein, auf denen sich zumeist Braunerden aus Hauptlage entwickelt haben (z.B. Bodengesellschaft 10). Die Untersuchungsbefunde zeigen, daß die stoffliche Beschaffenheit dieser Böden insgesamt ungünstig zu beurteilen ist, wobei die besonders große Spannweite der Merkmalsausprägungen hervorzuheben ist. Ein Drittel der Böden dieser Kartiereinheit ist sogar als besonders ungünstig zu beurteilen. Dort liegt selbst im Unterboden die Basensättigung unterhalb von 10 %. Es liegt die Vermutung nahe, daß es sich hierbei um Böden handelt, die vor allem im unteren Bodenbereich die Zone des tertiär verwitterten Saproliths anschneiden. Diese Zone ist im Feld anhand ihrer Dichtlagerung und der Färbung des Bodens gegenüber dem frischen Anstehenden zu erkennen. Es existieren, je nach Grad der Kaolinisierung und Verwitterung, Varietäten von rötlichen bis grauen Farbtönen (Graulehme). SEMMEL (1989) nimmt an, daß sich im tertiären Zersatz nurmehr geringe Nährstoffreserven befinden. Diesen Befund bestätigt SPIES (mdl. Mittl., 1995). Neue Untersuchungen im Hunsrück lassen vermuten, daß vor allem der vollständig kaolinisierte Saprolith besonders stark an Nährstoffen verarmt zu sein scheint¹⁵. Nach SPIES (mdl. Mittl., 1995) werden schätzungsweise 80% der Böden des östlichen Hunsrücks von Substraten aus tertiär verwittertem Tonschiefer unterlagert, während im westlichen Hunsrück dieser Anteil nur 60% beträgt, weil diese Bereiche des Hunsrücks stärker herausgehoben und damit stärker erodiert wurden. Eine Überprüfung dieses Zusammenhangs mit Daten der vorliegenden Untersuchung zeigt, daß die mittlere Basensättigung im Unterboden im Raum des durchschnittlich höher gelegenen westlichen Hunsrücks tatsächlich um einige Prozentpunkte (Basensättigung ca. 22%) höher liegt als im Ost-Hunsrück (Basensättigung ca. 15%). Dieser Befund widerlegt zumindest die Hypothese nicht, daß die Nährstoffausstattung der Böden durch die vorverwitterten, tertiären Zersatzprodukte mitbeeinflusst wird. Demnach dürfte bei diesen Böden frisch anstehender Tonschiefer oder Skelettanteile unverwitterten Tonschiefers in Hanglagen sich auf die Nährstoffausstat-

¹⁵ Die Untersuchungen werden vom Geologischen Landesamt Rheinland-Pfalz durchgeführt. Die Laborergebnisse liegen jedoch noch nicht vor.

tung positiv auswirken. Vor diesem Hintergrund wäre auch die hohe Streuung der Böden dieses Kollektivs plausibel.

Der Deckschichtenaufbau beeinflusst demnach Entwicklung und Chemismus der Böden entscheidend. Die Kenntnis des Deckschichtenaufbaus liefert wichtige Hinweise über die zu erwartende Ausstattung der Böden mit Nährstoffen. Insbesondere die im Untersuchungsgebiet weit verbreiteten Pseudogleye und ihre Braunerde-Parabraunerde-Subtypen können hierdurch hinsichtlich ihrer Basenausstattung charakterisiert werden. Der häufig beobachtete Anstieg der Nährstoffvorräte im Unterboden wäre demnach an das Vorhandensein lößlehmhaltiger bzw. lößlehmreicher Mittellagen gebunden, in denen sich zumeist primäre Stauhorizonte ausbilden. Liegt der Stauhorizont in der Basislage oder im tertiären Zersatz, sind die Böden auch im Unterboden allem Anschein nach basenärmer.

Die auffallend große Spanne der chemischen Kennwerte auf der zentralen Tonschiefer-Hunsrück-Hochfläche könnte darauf zurückzuführen sein, daß der Tonschiefer von Standort zu Standort in sehr unterschiedlichem Ausmaß Verwitterungsvorgängen ausgesetzt war. So ist anzunehmen, daß in abtragsgeschützten Geländepositionen tertiär verwitterter und daher tiefgründig basenverarmter Tonschiefer anzutreffen ist, während in (konvexen) Oberhangbereichen nahezu unverwitterter (frischer) Tonschiefer mit höheren Basengehalten ansteht.

Die vorstehenden Ausführungen belegen die Bedeutung des Deckschichtenaufbaus für den Versauerungsstatus, den Nährelementstatus und die Sensitivität der Böden gegenüber fortschreitender Bodendegradation. Daher sollte der Deckschichtenaufbau zukünftig auch bei forstlichen Bodenkartierungen berücksichtigt werden.

Im Zuge der Bearbeitung des vorliegenden Projekts entstand der Eindruck, daß zwischen dem Relief und dem Bodenzustand gesetzmäßige Beziehungen auftreten. Leider erwiesen sich die Beschreibungen der Geoparameter der einzelnen Profile zumeist als zu ungenau, um diese Zusammenhänge konkreter beschreiben zu können. Insbesondere die Reliefbeschreibungen und die Lageangaben waren häufig nicht präzise genug. Die im Rahmen dieser Untersuchung herangezogene Bodenübersichtskartierung des Hunsrücks (BÜK 200) orientiert sich zwar an reliefabhängigen Merkmalen (Deckschichtenaufbau), doch sind auch hier die entsprechenden Geoparameter nicht exakt genug definiert. Erfahrungsgemäß bestehen bei Kartierern hinsichtlich eines einheitlichen Reliefverständnisses in der Praxis große Interpretationsunterschiede. Ausgehend von einem Geländepunkt kann beispielsweise die Wölbung je nach kleinräumiger bzw. großräumiger Betrachtungsweise tendenziell durchaus gegensätzlich (konkav oder kon-

vex) sein. Bei der Erfassung von Geoparametern im Felde sollte daher berücksichtigt werden, daß spätere Auswertungen auf verschiedenen Maßstabsniveaus erfolgen können und dazu adäquate Informationen benötigt werden. Dabei ist die Definition eindeutiger Reliefhierarchiestufen zur maßstabsniveaubezogenen Ansprache der Geoparameter notwendig. Für den Kartierer im Gelände sind Begriffe wie Mikro-, Meso- und Makrorelief ohne weitere Angaben zur Größendimension sicherlich zu diffus und sollten konkretisiert werden. Im Blick auf bodenkundliche Fragestellungen böte sich beispielsweise an, die Geoparameter getrennt nach

- Großrelief (Dimension > 500 m)
- Kleinrelief (Dimension 50 m - 500 m)
- Kleinstrelief (Dimension 1 m - 50 m)

anzusprechen.

Größere Kartiervorhaben (landesweit bis bundesweit) mit mehreren Kartiererteams sollten darüber hinaus Abstimmungsveranstaltungen zur Erkennung und Bewertung der zu erfassenden Kriterien einplanen, um für alle Erfassungsebenen ein einheitliches Reliefverständnis zu schaffen. Damit könnte die Vergleichbarkeit der Kartiererergebnisse verbessert werden. Gegebenenfalls könnten die Kartierarbeiten durch Kontrolleure stichprobenartig überprüft werden, ähnlich dem Verfahren der Waldschadenserhebung in den Ländern (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN 1991). Damit wäre ein hohes Maß an Genauigkeit und Übereinstimmung bei der Kartierung gewährleistet.

Als Minimalforderung für die in Zukunft mögliche DGM-Analyse müssen die Koordinaten der Profilpunkte sicherlich mit einer Genauigkeit unter 10 m vorliegen, um plausible Ergebnisse erwarten zu können. Eventuell könnten bei den Bodenaufnahmen die Koordinaten der Profilgruben rasch und genau durch GPS-Messungen (Global-Positioning-System) erhoben werden.

5.6.2 Bewertung des Verfahrens

Das zum Zweck der chemischen Bodenzustandsbewertung entwickelte einfache Punkteverfahren ist durch seinen vielschichtigen Bewertungsansatz und ausgewählten Bewertungskriterien grundsätzlich geeignet, die Böden im Hinblick auf ihren Base/Säure-Zustand zu bewerten. Als zweckdienlich erwies sich hierbei, die ausgewählten wertgebenden Kriterien auf der Grundlage von bundesweit eingeführten Bewertungskriterien (Referenzdaten) zu klassifizieren und anschließend zu übergeordneten Wertmaßstäben (Indikatoren: Versauerungsstatus, Nährelementstatus und Durchlässigkeit) zu verknüpfen. Durch iteratives Vorgehen und Vergleich der Ergebnisse der Bewertungsläufe konnte die Systemeinstellung, d.h. Auswahl und Gewichtung im Blick auf die Zielsetzung bedeutsamer Merkmale, sukzessive optimiert werden. Ungeeignete oder redundante Merkmale konnten hierdurch eliminiert oder durch besser geeignete ersetzt werden. Aus ökologischer Sicht ist die hier gewählte Vorgehensweise deshalb besonders von Vorteil, weil nicht nur die aggregierten Gesamtwerte Maß der Gebietsbewertung sind, sondern alle Verfahrensschritte bis hin zu den ursprünglichen Rohdaten zurückverfolgt werden können. Nicht in allen Fällen konnte jedoch auf die denkbar optimale Merkmalskombination zurückgegriffen werden, weil teilweise Daten mit hohem indikatorischem Wert nicht in der erforderlichen Qualität oder überhaupt nicht vorlagen. Daher wurde in einigen Fällen der Versuch unternommen, fehlende Informationen mit vertretbarem Aufwand (z.B. Humusvorräte, Grobporenanteil, Versauerungsfront) mit Hilfe anderer Größen herzuleiten. Insbesondere das weitestgehende Fehlen von Humusanalysen hat sich als sehr nachteilig erwiesen, da ohne Kenntnis der in den Humusaufgaben gespeicherten Nährstoffe eine Beurteilung der Gesamtausstattung und der Funktionsweise der Nährelementkreisläufe nur unzureichend erfolgen kann. Zudem beziehen die Bewertungskriterien die in der Humusaufgabe gespeicherten Vorräte konsequenterweise mit ein, so daß im Rahmen dieser Arbeit zur Taxierung der Gesamtvorräte die in der Humusaufgabe gespeicherten Vorräte geschätzt werden mußten. Es wurde diesbezüglich wiederholt auf die Notwendigkeit hingewiesen, künftig generell Humusanalysen durchzuführen.

Weitere wesentliche Aspekte des vorgestellten Verfahrens sind die nachvollziehbare Auswahl, Gewichtung und Verknüpfung der Merkmale. Diese Offenlegung aller Systemeinstellungen und des Kriterienkatalogs steigert die Praktikabilität des Verfahrens. Eine Übertragung des Verfahrens auf andere Waldgebiete erscheint somit ohne Probleme möglich. Darüber hinaus erlaubt die transparente rechnergestützte Datenverarbeitung selbstverständlich die Einbezie-

hung beliebig vieler, zusätzlicher Profildaten, beispielsweise bei einer Wiederholung der Untersuchung mit erhöhtem Stichprobenumfang.

Der Einsatz einer relationalen Datenbank ist für das Management vielschichtiger Bodendaten geradezu optimal und hat sich auch im Hinblick auf das automatisierte Bewertungsverfahren ausgezeichnet bewährt. Die Organisation der Daten in den verschiedenen Tabellen gleicher Struktur und gleichen Inhalts ermöglicht bei weitestgehender Redundanzfreiheit einen komfortablen und flexiblen Zugriff auf die Daten. Hinsichtlich Datenmenge und Laufzeitverhalten bei Datenbankabfragen traten keinerlei Beschränkungen oder Hindernisse auf. Bei den häufigen und komplexen Datenselektionen ließen sich problemlos Datenkollektive gezielt extrahieren. Dabei hat sich als besonders günstig herausgestellt, daß Datenselektionen, die Daten verschiedener Tabellen beinhalten, wahlweise auch virtuell erzeugt werden können und somit hinsichtlich Datenverwaltung und Speicherkapazität keinen Mehraufwand darstellen.

Voraussetzung zur synoptischen Bewertung aller Bodenprofildaten ist die Existenz ökologisch vergleichbarer Mineralbodentiefenbereiche. Die zu diesem Zweck ausgeschiedenen drei Tiefenbereiche aus dem humusreichen Oberboden, dem sich anschließenden weiteren Hauptwurzelbereich und dem mineralischen Unterboden erwiesen sich für die vergleichende Auswertung ebenfalls als sehr gut geeignet. Allerdings steigerte die unterschiedliche Art der Probenahme den Arbeitsaufwand anfänglich erheblich, weil bei der horizontweisen Beprobung die entsprechende Auswahl der Tiefenbereiche, aufgrund extrem verschiedener Mächtigkeit und Mineralbodentiefe der Horizonte nicht rechnergestützt realisiert werden konnte, sondern alle betroffenen Profile einzeln begutachtet werden mußten. Aus synoptischer Sicht ist daher die Beprobung in fixen Tiefenstufen zu favorisieren. Außerdem spricht für die letztgenannte Beprobungsart, daß sich der Bodenchemismus allem Anschein nach häufig nicht mit den morphologisch-diagnostischen Eigenschaften der Bodenhorizonte parallelisieren läßt (BUBERL et al. 1994, ZEZSCHWITZ v. 1987). Damit entfällt ein ausschlaggebendes Argument für die horizontweise Beprobung.

Die Bewertung der Empfindlichkeit der Böden gegenüber fortschreitender Versauerung und Nährelementauswaschung in einem Verfahrensgang zu kombinieren, bedarf aus der Sicht ökosystemarer Stoffflüsse großer Sorgfalt, weil dabei der Tiefengradient der Böden berücksichtigt werden muß. Daher wurde versucht, diesem Sachverhalt durch eine durchdachte Merkmalskombination sowie unterschiedliche Gewichtung der Tiefenbereiche Rechnung zu

tragen. Eine andere Auffassung der ökosystemaren Zusammenhänge und ihrer Wechselwirkung bezüglich der Versorgung der aufstockenden Waldbestände kann folglich durchaus zu anderen Systemeinstellungen führen, die allerdings ohne größeren Aufwand vorgenommen werden können.

Nach den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung erscheint die Einbeziehung des tieferen Mineralbodens zur Bewertung der Befundeinheiten sehr sinnvoll. Zumindest im Untersuchungsgebiet zeigt die chemische Beschaffenheit der Oberböden weitverbreitet kaum signifikante Unterschiede. Erst im unteren Bodenbereich sind, vor allem die Nährelementausstattung der Standorte betreffend, zum Teil deutliche Unterschiede erkennbar. In diesem Zusammenhang ist die Frage von zentralem Interesse, inwieweit die aufstockenden Bestände in der Lage sind, die im unteren Bodenbereich potentiell verfügbaren Nährstoffvorräte zu nutzen.

Zur Überprüfung der Validität des Bewertungsverfahrens läßt sich feststellen, daß in der überwiegenden Zahl aller Fälle die Differenz der Wertungen je Profil nicht größer als eine Stufe war. Nur sehr selten wurden Profile mit mehr als einer Stufe Unterschied bewertet. Hauptsächlich war für die einzelfallweise abweichende Bewertung die unterschiedliche Experteneinschätzung der Profile im Hinblick auf die Verfügbarkeit der im unteren Mineralbodenbereich befindlichen Vorräte für die Versorgung der jeweils aktuell aufstockenden Baumbestände verantwortlich.

Allgemein hat sich jedoch gezeigt, daß die Ergebnisse des automatisierten Bewertungsverfahrens gut mit den Einschätzungen der Profile durch die Bodenexperten übereinstimmen. Dies wird als Indiz dafür gewertet, daß die im Zuge des Bewertungsverfahrens ausgewählten Merkmale sowie deren Skalierung und Gewichtung geeignet sind, den Zustand der Böden umfassend zu beurteilen.

Schließlich soll noch darauf hingewiesen werden, daß das im Zuge der hiesigen Untersuchung vorgestellte Bewertungsverfahren einen Versuch darstellt, den Zustand von Böden operationell zu quantifizieren. Es wird hiermit zur Diskussion gestellt und kann sicherlich noch weiterentwickelt oder im Hinblick auf andere bodenökologische Fragestellungen angepaßt bzw. verändert werden. Die Voraussetzungen für andere „Schaltereinstellungen“ sind durch die Offenheit des Systems geschaffen.

5.6.3 Abschließende Wertung

Das vorgestellte Verfahren zur Bodenzustandsbewertung versucht mit aktuell vorhandenem Datenmaterial und derzeitigem bodenkundlichen Kenntnisstand auf das Gefährdungspotential der Waldböden zu schließen. Dieser Ansatz geht von der Grundüberlegung aus, daß im Untersuchungsgebiet die kritischen Frachten für die Säurebelastung derzeitig großflächig überschritten werden und die Gefahr gravierender Veränderungen vor allem im Säure/Base-Zustand der Böden wesentlich von der momentanen Ausgangslage der Böden abhängt. Auf dieser Grundüberlegung basieren im übrigen auch die Bodenzustandserhebungen (BZE) der Bundesländer und der Europäischen Gemeinschaft. Die gegenwärtig sehr kontrovers diskutierte Frage, in welchem Umfang die atmogene Deposition von Säuren und Säurebildnern den derzeitigen Bodenzustand geprägt hat, ist daher für die vorliegende Arbeit nicht von entscheidender Bedeutung. Dennoch sollte die prognostizierte Veränderung des chemischen Bodenzustands durch den Einfluß von Luftverunreinigungen durch Zeitreihenuntersuchungen überprüft werden. Hierzu kann die im Rahmen dieses Projektes aufgebaute Waldbodendatenbank als Ausgangsbasis für eine wiederholte Beprobung mit identischen Probenahmepunkten und identischen Verfahren wertvolle Hilfe leisten.

Auch die Rolle des chemischen Bodenzustands im Zusammenspiel der verschiedenen Stressoren, die zu der Schadensentwicklung in den Wäldern geführt hat, wird bisher unterschiedlich beurteilt. Insbesondere umstritten sind diesbezüglich Kriterien und Kenngrößen zur Beurteilung des chemischen Bodenzustands. Es wurde mehrfach deutlich gemacht, daß die, mangels Alternativen, im Rahmen der vorliegenden Untersuchung zur Bodenzustandsbewertung hilfsweise herangezogenen Kennwerte der Göttinger Arbeitsgruppen daher sehr vorsichtig gehandhabt werden müssen. Vor allem die Interpretation der Ergebnisse ist demzufolge mit Unsicherheiten behaftet und muß stets aus einem kritischen Blickwinkel erfolgen. Kennwerte zur Beurteilung des chemischen Bodenzustands sind sicherlich keine festen, unveränderlichen Größen. Sie sind im Fluß und müssen weiterentwickelt und im Zuge des Erkenntnisfortschritts angepaßt werden.

Die vorgestellte Methode zur Regionalisierung von Bodenzustandsdaten erwies sich unter den gegebenen Datenvoraussetzungen als praktikabel. Sie zeichnet sich durch eine hohe Operationalität aus und liefert trotz ihrer Einfachheit einen plausiblen Gesamtüberblick über den zu erwartenden Bodenzustand des Untersuchungsgebietes.

Die kleinsten räumlichen Auswerteeinheiten (Skalenebenen) der vorliegenden Untersuchung sind die großräumigen Kartiereinheiten der Bodenübersichtskarte. Die Behandlungseinheiten bei Bodenschutzkalkungen sind dagegen Bestände oder forstliche Abteilungen. Daher können für Maßnahmen zur Walderhaltung die Untersuchungsergebnisse nur in Verbindung mit der Regionalität, der Beschaffenheit und der Geschichte der betroffenen Standorte Anwendung finden.

Dies bedeutet: vor dem Hintergrund knapper Haushaltsmittel soll kraft des mittleren bodenchemischen Zustands der großräumigen Auswerteeinheiten abgeschätzt werden, welche Standorte möglicherweise besonders belastet sind und wo daher Behandlungsvorschläge bevorzugt umgesetzt werden sollten. Zur Formulierung bestandesbezogener Behandlungsvorschläge müssen jedoch die jeweiligen standörtlichen Gegebenheiten berücksichtigt werden.

Es ist auch denkbar, das vorgestellte Verfahren für kleinräumigere Auswertungen einzusetzen, wenn die Datengrundlagen in ausreichend hoher Auflösung vorliegen. So könnte das Bewertungsverfahren bei ausreichender Anzahl chemischer Analysen beispielsweise künftig bei der Substratreihenkartierung der forstlichen Standortkartierung Anwendung finden. Substratreihen, die sich ökochemisch nicht wesentlich unterscheiden, könnten zusammengefaßt bzw. solche, deren Merkmalsausprägungen sehr weit streuen, gegebenenfalls weiter differenziert und die Qualität sowie die Praktikabilität der Substratreihenkartierung somit wesentlich verbessert werden.

Der gewählte Untersuchungsansatz erbringt den Nachweis, daß die Kartiereinheiten der Bodenübersichtskarte des Hunsrücks wichtige Informationen zum bodenchemischen Zustand enthalten. Die Bodenübersichtskarte kann somit einen Beitrag zum stofflichen Bodenschutz leisten. Liegen in Zukunft Kartenmaterialien besserer Qualität und höherer Auflösung, Bodenproben in höherer räumlicher Dichte sowie neuere Erkenntnisse über aussagekräftige bodenökologische Kennwerte vor, muß der im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgeschlagene Lösungsansatz überprüft und ggf. weiterentwickelt werden.

Das Kapitel 5 des vorliegenden Berichts beinhaltet wesentliche Auszüge einer Arbeit, die von der Geowissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br. als Dissertation angenommen wurde (Referent: Prof. Dr. H. GOSSMANN, Korreferent Priv. Doz. Dr. K.-H. FEGER).

Anschrift des Verfassers: Oliver Bopp, Heidenkopfstr. 12, 67705 Trippstadt

5.7 Literaturverzeichnis

- ALTERMANN, M. (1993 a):** Gliederung und Lithologie pleistozäner Lagen im Gebiet Sachsen-Anhalts. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 72: S. 819 - 824.
- ALTERMANN, M. (1993 b):** Gliederung von pleistozänen Lagen. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 72: S. 825 - 828.
- AUTODESK (1993):** AutoCAD Release 12.0, Referenzhandbuch. Schweiz, 731 S.
- BENECKE, P. (1995):** Verlagerung von Versauerungsfronten und Auswirkungen auf das Grundwasser. Internationales Symposium; Grundwasserversauerung durch atmosphärische Deposition; Ursachen - Auswirkungen - Sanierungsstrategien, 26.-28. Oktober 1994, Bayreuth. Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 3/1995, S. 153 - 168.
- BEESE, F. und MEIWES, K.J. (1995):** Stand und Perspektiven. Allgemeine Forst Zeitschrift 17: S. 946 - 949.
- BIBELRIETHER, H. (1966):** Die Bewurzelung einiger Baumarten in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften. Allgemeine Forst Zeitschrift, S. 808 - 815.
- BLOCK, J., BOPP, O., GATTI, M., HEIDINGSFELD, N. und ZOTH, R. (1991):** Waldschäden, Nähr- und Schadstoffgehalte in Nadeln und Waldböden in Rheinland-Pfalz. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 17/91, 237 S.
- BLUME, H.-P. (1984):** Definition, Abgrenzung und Benennung von Bodenlandschaften. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 40: S. 169 - 176.
- BODENKUNDLICHE KARTIERANLEITUNG (1982):** Herausgegeben von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland. 3. Auflage.
- BOPP, O. und KAMMER, P. (1994):** Anbindung von AutoCAD an eine Datenbank: Nutzung von AutoCAD als Informationssystem. Unveröffentlichte Programmreferenz der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, 50 S.
- BOPP, O. (1995):** Die Waldbodendatenbank der FVA. Allgem. Forst Zeitschrift, 2: S. 95 - 96.
- BOPP, O. (1995):** Regionalisierung von Bodenprofilaten zur Quantifizierung des stofflichen Bodenzustandes von Bodenkartiereinheiten und Entwicklung eines auf Bodenanalysedaten basierenden Bewertungsverfahrens, Dissertation, Universität Freiburg.
- BORLAND (1993):** dBASE IV für DOS, Handbuch, Befehle und Funktionen. Bd. 1 und 2.
- BUBERL, H.G., WILPERT, K.v., TREFZ-MALCHER, G. und HILDEBRAND, E.E. (1994):** Der chemische Zustand von Waldböden. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 1989 - 92 (BZE). Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Heft 182.
- BUNDESANSTALT FÜR LANDESKUNDE UND RAUMFORSCHUNG (Hrsg.) (1962):** Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. - 1: 608 S.; Bad Godesberg.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (BML) 1991:** Bericht über den Zustand des Waldes 1991. BML-Schriftenreihe A, Heft 405, Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag, 61 S. u. Anhang.
- EICHHORN, J. (1987):** Vergleichende Untersuchungen von Feinwurzelsystemen bei unterschiedlich geschädigten Altfeichten (*Picea abies* Karst.). Forschungsberichte der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt, Bd. 3, 179 S.

- EICHHORN, J. (1991):** Sturmschäden des Frühjahres 1990 in Hessen. Forschungsberichte der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt, Bd. 12, 162 S.
- EICHHORN, J. (1992):** Wurzeluntersuchungen an sturmgeworfenen Bäumen in Hessen. Forst und Holz 18: S. 555 - 559.
- ECKHARDT, F.-J. (1960):** Die Veränderung eines devonischen Tonschiefers durch die Mineralumwandlungen infolge der tertiären Zersetzung. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 112/I, S. 188 - 196.
- FEGER, K.-H. (1989):** Hydrologische und chemische Wechselwirkungsprozesse in tieferen Bodenhorizonten und im Gestein in ihrer Bedeutung für den Chemismus von Waldgewässern. Mitteilungen des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), Heft 17, 1989, S. 185 - 204.
- FEGER, K.-H. und RASPE, S. (1992):** Ernährungszustand von Fichtennadeln und -wurzeln in Abhängigkeit vom Nährstoffangebot im Boden. Forstwissenschaftliches Centralblatt 111: S. 73-86.
- FEGER, K.-H. (1993):** Bedeutung von ökosysteminternen Umsätzen und Nutzungseingriffen für den Stoffhaushalt von Waldlandschaften. Habilitationsschrift, Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Heft 31, 237 S.
- FEGER, K.-H. (1994):** Aktuelle Protonenbelastung und Kationenfreisetzung in einem Eisenhumuspodsol im Schwarzwald. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 74: S. 341 - 344.
- FEGER, K.-H. (1995):** Bedeutung atmogener Stoffdepositionen für Mobilisierung und Transport von Aluminium, Eisen und Mangan in sauren Böden. Internationales Symposium; Grundwasserversauerung durch atmosphärische Deposition; Ursachen - Auswirkungen - Sanierungsstrategien, 26.-28. Oktober 1994, Bayreuth. Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 3/1995, S. 133 - 142.
- FELIX-HENNINGSSEN, P. und SPIES, E.-D. (1985):** Mineralogische und geochemische Untersuchungen an jungmesozoisch-tertiären Verwitterungsprofilen des Rheinischen Schiefergebirges. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 43/II, S. 911 - 916.
- FELIX-HENNINGSSEN, P. (1991):** Bodenentwicklung in periglazialen Deckschichten des Osthunsrücks, Rheinisches Schiefergebirge. Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft 66, II, S. 779 - 782.
- FORSTLICHE STANDORTSAUFNAHME.** Fünfte Auflage in Vorbereitung. Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung.
- FRIED, G. (1984):** Gestein, Relief und Boden im Buntsandstein - Odenwald. Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie D, Bd. 4.
- FRINGS, H. (1993):** Versauerung des Grund- und Rohwassers sowie Beschreibung der betroffenen Flächen. In: Waldschäden, Boden- und Wasserversauerung durch Luftschadstoffe in Rheinland-Pfalz. Beiträge der Fachtagung in Mainz vom 08.12.1992, S. 41 - 54.
- GEHRMANN, J. (1993):** Zwischenbericht über Ergebnisse der Landesweiten Bodenzustandserhebung im Wald - BZE -. Stand September 1993; Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung, Recklingshausen, 36 S.
- GENSSLER, H. (1986):** Die Aufgabe der Forstwirtschaft in der Bodenschutz-Politik der Bundesrepublik Deutschland. Allgem. Forst Zeitschrift, 46, S. 1145 - 1146.
- HEIDINGSFELD, N. und BOPP, O. (1992):** Entwicklung einer bestandesbezogenen Luftbildkartierung von Waldschäden und Verbesserung der Identifikation permanenter Stichprobenkollektive. Schlußbericht zum EG-Forschungsvorhaben Nr. 90 60 DL 0130.
- HEIDINGSFELD, N. (1993):** Neue Konzepte zum Luftbildeinsatz für großräumig permanente Waldzustandserhebungen und zur bestandesbezogenen Kartierung flächenhafter Waldschäden. Mitteilung aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Dissertation, Nr. 23/93, 165 S.

- HILDEBRAND, E.E. (1990):** The influence of forest site fertilization on soil solution chemistry. Seminar über Schonung und Verbesserung des Bodens als Grundlage nachhaltiger Forstwirtschaft. München, 26.-30. Juni 1990, Gemeinschaftsauschuß für forstliche Technologie, Betriebsführung und Ausbildung der Economic Commission for Europe (ECE), Food and Agriculture Organisation (FAO) and International Labour Organisation, S. 193 - 201.
- HILDEBRAND, E.E. (1991):** Die chemische Untersuchung ungestört gelagerter Waldbodenproben - Methoden und Informationsgewinn -. Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF), 85: 201 S. und Anhang.
- HORN, R. (1989):** Bedeutung der Bodenstruktur für den Nährstofftransport. Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF) 55: S. 181 - 194.
- JANSEN, M., SCHROETTER, M., EBERL, C., MEIWES, K.-J., ULRICH, B. und SLOBODA, B. (1994):** Prototyp eines wissenschaftlichen Systems zur Planung von Kalkungsmaßnahmen im Westharz. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sekt. Forstliche Biometrie & Informatik Tagungsband, Ljubljana, Sept. 1994, S. 122 - 136.
- KÖSTLER, J.N., BRÜCKNER, E. und BIBELRIETHER, H. (1968):** Die Wurzeln der Bäume. Untersuchung zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 284 S.
- KREUTZER, K. (1961):** Wurzelbildung junger Waldbäume auf Pseudogleyböden. Forstwissenschaftliches Centralblatt 80: S. 356 - 392.
- KREUTZER, K. (1994 a):** Das Höglwaldprojekt. Allgemeine Forst Zeitschrift 14: S. 752 - 753.
- KREUTZER, K. (1994 b):** Folgerungen aus der Höglwald-Forschung. Allgemeine Forst Zeitschrift 14: S. 769 - 774.
- KRIETER, M. (1991):** Wasserkreislauf und Saure Niederschläge. Geographische Rundschau 6, S.326-333.
- MALESSA, V. (1995):** Die vorindustrielle Nutzung von Waldökosystemen und ihre Auswirkungen auf den Ökosystemzustand - Analyse zur Versauerung von Waldböden durch vorindustrielle Nutzungen und ihre Bedeutung für rezente Versauerungsprobleme am Beispiel Westharz; Forst und Holz 10: S. 307 - 311.
- MEIWES, K.-J., KÖNIG, N., KHANNA, P.K., PRENZEL, J. und ULRICH, B. (1984):** Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben, Bd. 7, S. 1-67.
- MERKEL, B. (1995):** Räumliche und zeitliche Variabilität der Schutzfunktion von Deckschichten. Internationales Symposium; Grundwasserversauerung durch atmosphärische Deposition; Ursachen - Auswirkungen - Sanierungsstrategien, 26.-28. Oktober 1994, Bayreuth. Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 3/1995, S. 125 - 132.
- MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, WEINBAU UND FORSTEN:** Neufassung des Merkblattes Bodenschutzkalkung (Merkblatt Nr. 9, 2. Auflage, der Merkblätter der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz, in Vorbereitung).
- MURACH, D. (1984):** Die Reaktion der Feinwurzeln von Fichten (*Picea abies* Karst.) auf zunehmende Bodenversauerung. Göttinger Bodenkundliche Berichte, 77, 126 S.
- ÖSTERREICHISCHE WALDBODEN-ZUSTANDSINVENTUR (1992):** Ergebnisse; Waldbodenbericht. Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, Band I und II.
- PAHLKE, U. (1992):** Langzeit-Entwicklung chemischer Bodeneigenschaften in säurebelasteten Waldstandorten Nordrhein-Westfalens - Ergebnisse einer dreifachen Bodeninventur. Forsch.-Ber. z. Förderprogramm d. Landes NRW „Luftverunreinigungen und Waldschäden“, Nr. 20, Dissertation, 143 S.

- RASTIN, N. (1991):** Untersuchungen zur Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung der Fichte auf Braunerde-, Braunerde-Pseudogley- und Pseudogleyböden im Vorderen Hunsrück. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 19/91, S. 79 - 90.
- REHFUESS, K. E. (1990):** Waldböden - Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. Parey Verlag Hamburg, 2. Auflage, 294 S.
- ROTH, H., HELMING, K. und FOHRER, N. (1995):** Oberflächenverschwemmung und Abflußbildung auf Böden aus Löß und pleistozänen Sedimenten. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 158: S. 43 - 53.
- ROTHE, A. (1994):** Auswirkungen auf Bodenchemie und Wasserqualität. Allgemeine Forst Zeitschrift 14: S. 754 - 759.
- SABEL, K.-J. und FISCHER, E. (1987):** Boden- und vegetationsgeographische Untersuchungen im Westerwald. Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Bd. 7, Serie D.
- SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR FORSTEN (1995):** Bodenschutzkalkung - Entscheidungshilfen (Merkblatt Nr. 3 der Sächsischen Landesanstalt für Forsten Graupa).
- SAS (1993):** SAS User's Guide: Statistics. SAS Institute Inc., Cary, North-Carolina.
- SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL (1984):** Lehrbuch der Bodenkunde. 11., neu bearbeitete Auflage. Enke Verlag Stuttgart.
- SCHILLING, B. und SPIES, E.-D. (1991):** Die Böden Mittel- und Oberfrankens. Bayreuther Bodenkundliche Berichte 17: S. 68 - 82.
- SCHMIDT, J. P. (1992):** Die Beziehung der hydromorphologischen Merkmale zum Wasserhaushalt auf drei Waldstandorten im Hunsrück. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 95, 149 S.
- SEMMEI, A. (1985):** Periglazialgeomorphologie. - Erträge der Forschung 231: 116 S.
- SEMMEI, A. (1989):** Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben „Entwicklung eines Aufnahmeverfahrens zur Herstellung einer Bodenübersichtskarte 1:200 000 und dessen Anwendung in der Bodenlandschaft Hunsrück. - Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz, Mainz. (unveröff. Manuskript.).
- ULRICH, B., MEIWES, K.J., KÖNIG, N., KHANNA, P.K. (1984):** Untersuchungsverfahren und Kriterien zur Bewertung der Versauerung und ihrer Folgen in Waldböden. Der Forst und Holzwirt 11: S. 278 - 286.
- ULRICH, B. und MALESSA, V. (1989):** Tiefengradienten der Bodenversauerung. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 152: S. 81 - 84.
- ULRICH, B. (1991):** Zusammenfassende ökologische Bewertung der Untersuchungsergebnisse des SIMS-Projektes. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 19/91, S. 130 - 140.
- ULRICH, B. (1995):** Der ökologische Bodenzustand - seine Veränderung in der Nacheiszeit, Ansprüche der Baumarten. Forstarchiv 66: S. 117 - 127.
- VÖLKEL, J. (1992):** Deckschichten und Bodenentwicklung im Bayer. Wald. Erste Ergebnisse im Rahmen Radioökologischer Untersuchungen. Bonner Geographische Abhandlungen, Heft 85, S. 130 - 148.
- VÖLKEL, J. (1993):** Spektren silikatischer Minerale der Tonfraktion als Indikatoren der Lößbeeinflussung der Böden im Mittelgebirgsraum. Berliner Geographische Arbeiten, Heft 78, S. 287 - 302.
- VÖLKEL, J. (1994):** Zur Frage der Merkmalcharakteristik und Gliederung periglazialer Deckschichten am Beispiel des Bayerischen Waldes. Petermanns Geographische Mitteilungen 138: Seite 207 - 217.
- VÖLKEL, J. (1995):** Zur Darstellung von Schichtenwechseln in periglazialen Decklagen des Bayerischen Waldes unter besonderer Berücksichtigung der Mittellage und ihrer Eigenschaften. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 158: S. 177 - 186.

XU, Y. und FÖLSTER, H. (1992): Vergleichende Untersuchung über Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung von Küstentanne und Fichte auf pseudovergleyten Böden. Forst und Holz 18: S. 560 - 565.

ZEZSCHWITZ, E. v. (1987): Reliefeinflüsse auf die Belastung der Waldböden durch Protonen und N-Verbindungen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 158: S. 136 - 147.

ZOTH, R. und BLOCK, J. (1992): Untersuchungen an Wurzelballen sturmgeworfener Bäume in Rheinland-Pfalz. Forst und Holz 18, S. 566 - 571.

6. Zusammenfassung

Maßnahmen zum Schutz der Waldböden vor fortschreitender Bodendegradation infolge des Eintrags von Luftverunreinigungen müssen gezielt gesteuert werden. Hierzu sind detaillierte Informationen über die Sensitivität von Waldböden gegenüber weiterer Versauerung und Nährelementverarmung sowie über die Lage und Verbreitung besonders empfindlicher Waldareale erforderlich. Zur Herleitung dieser Informationen wurden die Analysedaten von nahezu 1300 Waldbodenprofilen aus Rheinland-Pfalz ausgewertet.

Waldbodendatenbank

Voraussetzung für eine eingehende Auswertung der umfangreichen Daten war der Aufbau einer umfassenden Waldbodendatenbank, in der alle verfügbaren Titel- und Analysedaten von Waldbodenuntersuchungen aus der forstlichen Standortkartierung, der landesweiten Waldbodenzustandserhebung und aus dem forstlichen Versuchswesen zusammengeführt wurden. Gemäß den Anforderungen einer relationalen Datenbank wurden Daten gleicher Struktur in eigenen Tabellen zusammengefaßt. Die Beziehungen zwischen den Tabellen werden über ein Schlüsselfeld mit inhaltlich eindeutigen Archivnummern hergestellt. Für die Kommunikation unter den Tabellen und die Erzeugung von Auswahldatensätzen wird die strukturierte Datenbankabfragesprache SQL eingesetzt. Intern übernimmt ein Datenbankmanagementsystem die Verwaltung der Tabellen und ihrer Daten. Durch diesen Aufbau ist eine weitestgehend redundanzfreie Datenhaltung, ein komfortabler und flexibler Datenzugriff sowie eine rasche und einfache Datenfortschreibung gewährleistet.

Beziehungen zwischen Bodenparametern, Nadelinhaltsstoffen und Kronenzustand

Die Waldbodendaten wurden, soweit verfügbar, um Nadelspiegelwerte und Schätzwerte zum Nadel/Blattverlust in den Baumkronen ergänzt und mit Hilfe der kanonischen Korrelations- und Redundanzanalyse sowie der multiplen Korrelationsanalyse auf statistische Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Bodenkompartmenten (Humusaufgabe, Mineralboden in unterschiedlichen Tiefen und unterschiedlichen Phasen), Nadelspiegelwerten und Kronenzustand (Nadelverlust) überprüft. Hieraus wurden Hypothesen zum Ursache-Wirkungsgefüge Bodenversauerung-Nährelementverarmung-Kronenschäden abgeleitet.

Zwischen den unterschiedlichen Bodenkompartmenten wurden mit erklärten Varianzen zwischen 35 und 60 % enge statistische Zusammenhänge gefunden. Diese ließen sich aus den

Mustern der Faktorladungen insbesondere über Gemeinsamkeiten im Versauerungszustand und im „Manganstatus“ vielfach auch kausal deuten.

Die statistischen Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Bodenkompartmenten und den Nadelspiegelwerten sind mit 13 bis 28 % erklärter Varianz deutlich schwächer. Auch hier resultieren die Zusammenhänge anscheinend vor allem aus dem Versauerungsstatus der Ökosysteme sowie ihrem „Manganstatus“.

Unerwartet enge statistische Zusammenhänge mit adjustierten Bestimmtheitsmaßen von 36 bis 60 % ergaben sich zwischen der Humusaufgabe und der Mineralbodenfestphase beider untersuchten Tiefenbereiche (0-5 cm und 30-60 cm Tiefe) auf der einen Seite und dem mittleren Nadelverlust des untersuchten Kollektivs auf der anderen Seite. Die Strukturkoeffizienten zeigen an, daß mit einer Verschlechterung des Humuszustandes, zunehmender Versauerung des Mineralbodens und abnehmenden Kalium- und Calciumgehalten am Austauscher der mittlere Nadelverlust des Probebaumkollektivs zunimmt. Die statistischen Zusammenhänge lassen sich also durchaus auch kausal erklären. Allerdings dürfen diese Befunde vor allem angesichts eines geringen Stichprobenumfangs nur als erste Hinweise auf mögliche Kausalzusammenhänge gewertet werden und sollten anhand unabhängiger und umfangreicherer Stichprobenkollektive überprüft werden.

Ökochemische Ausstattung wesentlicher Waldbodensubstrate

Das umfangreiche Datenmaterial der Waldbodendatenbank wurde weiterhin genutzt, die ökochemische Ausstattung der wesentlichen rheinland-pfälzischen Waldbodensubstrate differenziert zu beschreiben und die Empfindlichkeit der unterschiedlichen Substrate gegenüber Bodendegradation durch Luftschadstoffbelastung zu bewerten. Hierzu wurden 1162 Bodenprofile der Waldbodendatenbank 16 Ausgangssubstratgruppen der Bodenbildung zugeordnet, die jeweils eine ähnliche chemisch-mineralogische Grundausrüstung erwarten ließen.

Die ökochemische Charakterisierung hinsichtlich Säuretoxizität und Nährelementbereitstellung erfolgte für die einzelnen Substratgruppen getrennt anhand der Summenhäufigkeitsverteilung der Analysewerte.

Zur Bewertung der Disposition der Substratgruppen gegenüber Bodenversauerung, Basenverarmung und Überschußnitrifikation sowie zur Ableitung notwendiger Bodenschutzmaßnahmen wurden als Kennwerte die Bodenreaktion, die Basensättigung, die Sättigung mit H⁺Fe-Ionen, der Anteil an Ca-, Mg- und K-Ionen an der effektiven Kationenaustauschkapazität so-

wie die Vorräte dieser Ionen und die Stickstoffvorräte im wurzelerreichbaren Boden herangezogen.

Den derzeit günstigsten chemischen Bodenzustand und die geringste Sensitivität gegenüber Bodenversauerung und Basenverarmung weisen die Ausgangssubstratgruppen „Auelehme, Schwemmlösse und karbonathaltige Fluß- und Bachablagerungen“, „Substrate aus karbonathaltigem Material“ und „basische Vulkanite“ auf. Im Hauptwurzelbereich sind die pH-Werte zumeist dem Silikat- und Karbonatpufferbereich zuzuordnen. Basensättigungen von deutlich über 20, meist über 50 % und hohe austauschbare Kalzium- und Magnesiumvorräte zeigen, daß diese Substratgruppen über eine hohe kurzfristige Säureneutralisationskapazität und damit über eine vergleichsweise hohe Elastizität gegenüber weiteren Säureeinträgen verfügen. Eine merkliche Oberbodenversauerung und Basenverarmung ist in der Regel nur bei Fichtenbestockung festzustellen. Zum Schutz der Basenvorräte im Boden und zum Schutz der Hydrosphäre vor Nitratbelastungen bei Abbau der überdurchschnittlich hohen Stickstoffvorräte sollten die Standorte dieser Substratgruppen dem Laubholzanbau vorbehalten werden. Flächige Kalkungen und Düngungsmaßnahmen sollten unterbleiben.

Die Böden der Substratgruppen „saure und intermediäre Vulkanite“, „Bims“, „Schluffsteine, Schiefer-ton“, „Lösse und teilentbaste Löss“, „Decklehme größerer Mächtigkeit“, „überwiegend karbonatfreie Sedimente pleistozäner Terrassen und holozäner Hochflutablagerungen“ und „Terrassensedimente der Kerb- und Durchbruchtäler“ sind im oberen und mittleren Mineralboden meist deutlich versauert und basenverarmt, verfügen aber im noch wurzelerreichbaren tieferen Mineralboden über eine ausreichende Basensättigung (> 20 %). Um die im tieferen Mineralboden vorhandenen beachtlichen Basenvorräte zu erschließen, sollten tiefwurzelnde Baumarten, wie z.B. Stiel- und Traubeneichen, zumindestens als Mischbaumarten in die Bestockungsziele einbezogen werden. Weiterhin sollte geprüft werden, ob gegebenenfalls mit Hilfe von Pflanzlochkalkungen die Tiefendurchwurzelung der neuen Waldgeneration gefördert werden kann. Oberflächenkalkungen erscheinen auf diesen Standorten nur dann vordringlich, wenn die Tiefenversauerung bereits so weit fortgeschritten ist, daß die derzeitige Bestockung keinen Anschluß an Bodenbereiche mit Basensättigungen über 20 % hat.

Weit fortgeschritten ist die Versauerung und insbesondere die Basenverarmung in den Böden der Ausgangssubstratgruppen „Tonschiefer“ und „Schwemmsandfächer“. An drei Vierteln der Profile dieser Substratgruppe liegt die Basensättigung bis in den Unterboden hinein unter 20 %. Die Mediane der Magnesium- und Kaliumvorräte im Mineralboden bewegen sich nur noch in gleicher Höhe wie die entsprechenden Vorräte in der Biomasse mittlerer Baumhölzer. Beide Substratgruppen weisen allerdings in ihren ökochemischen Kennwerten auffallend große

Spannen auf. Auf tiefreichend versauerten und basenarmen Standorten dieser beiden Substratgruppen erscheinen Oberflächenkalkungen zum Schutz vor fortschreitender Versauerung und weiterer Basenverarmung unausweichlich. Für Standorte mit Oberbodenversauerung, aber noch höheren Basengehalten im wurzelerreichbaren tieferen Mineralboden wurden vorstehend bereits Behandlungsvorschläge unterbreitet.

Sehr stark und tiefreichend versauert und basenarm sind die Böden der Substratgruppen „Sandstein außerhalb des Rheinischen Schiefergebirges“, „quarzreiche Substrate des Rheinischen Schiefergebirges“, „Mittlerer Buntsandstein“ und „Flug- und Dünensande“. Der Median der Basensättigung liegt bei allen vier Substratgruppen im mittleren Mineralboden bei 10 %, das 75-Perzentil deutlich unter 20 %. Auch im tieferen Mineralboden steigen die Basensättigungen kaum an. Die im Mineralboden austauschbar gebundenen Magnesium- und Kaliumvorräte liegen sehr deutlich unter den entsprechenden Vorräten in der Biomasse mittlerer Baumhölzer. Die Böden dieser Substratgruppen verfügen demnach nur über eine sehr geringe Elastizität im Hinblick auf Säuretoxizität und Nährelementbereitstellung. Bodenschutzkalkungen sind hier daher dringend erforderlich. Aufgrund der extremen Magnesium-Armut ist ein hoher Magnesiumkarbonatanteil im Kalkungsmaterial besonders bedeutsam. Alle waldbaulichen Maßnahmen müssen besonders humusschonend ausgerichtet sein, da in den Humusvorräten der größte Teil der Kationbasen des Ökosystems gespeichert ist. Um den Nährstoffkreislauf zu verbessern und die Gefahr ökosysteminterner Versauerungsphasen durch Entkopplung von Nährstoffkreisläufen zu reduzieren, sollten Nadelholzreinbestände auf diesen Standorten behutsam in laubholzreiche Bestockungen überführt werden. Bei besonders starker Oberbodenversauerung und Basenverarmung ist bei einer Einbringung der Laubbaumarten vermutlich eine Pflanzlochkalkung, gegebenenfalls ergänzt um eine Einbringung kaliumreicher silikatischer Gesteinsmehle, erforderlich.

Entwicklung von Sensitivitätskarten

In einem weiteren Teil des Projekts wurde versucht, die Disposition der Waldböden gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung flächenbezogen darzustellen. Da nur für den Hunsrück eine geeignete Kartenvorlage verfügbar war, mußte dieser Teil des Vorhabens als Pilotprojekt auf den Hunsrück beschränkt werden.

Grundlage der Bodenzustandsbewertung waren 337 Bodenprofile der Waldbodendatenbank, die sich den Kartiereinheiten einer vom Geologischen Landesamt Rheinland-Pfalz neu bearbeiteten Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:200.000 (BÜK 200) zuordnen ließen. Diese Karte scheidet Bodengesellschaften aus, die sich vor allem nach dem geologischen Ge-

steinsuntergrund, dem Deckschichtenaufbau (Lagenstratigraphie), der Geländemorphologie und der Bodentypologie differenzieren.

Die Bewertung der Sensitivität der einzelnen Kartiereinheiten im Hinblick auf mögliche weitere Bodendegradation durch Luftschadstoffbelastungen erfolgte anhand der Indikatoren *Versauerungsstatus* (pH-Wert, Basensättigung, Fe- + H-Sättigung, Versauerungsfront), *Nährelementstatus* (Ca-, Mg- und K-Vorräte, Humusform) und *Durchlässigkeit des Unterbodens*, die zu einer Sensitivitätskennziffer zusammengeführt wurden. Das rechnergestützte Bewertungsverfahren wurde mit Hilfe einer Expertenbefragung anhand einer Zufallsstichprobe aus dem Gesamtkollektiv validiert.

Die räumliche Verbreitung von Bodengesellschaften mit unterschiedlichem Versauerungsstatus, unterschiedlichem Nährelementstatus und unterschiedlicher Sensitivität gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung wurde in kleinmaßstäblichen Karten dargestellt und der jeweilige Flächenanteil geschätzt.

Trotz der vergleichsweise einförmigen, lithogenen Ausgangssituation im Hunsrück waren zwischen den Kartiereinheiten deutliche Unterschiede in der Ausprägung wesentlicher bodenchemischer Merkmale festzustellen. Die Befunde belegen, daß im Mittelgebirge zwischen dem Deckschichtenaufbau, als wesentlichem Element der Kartiereinheiten der BÜK, und der chemischen Bodenbeschaffenheit enge Beziehungen bestehen. Vor allem das Vorhandensein oder Fehlen einer Mittellage differenziert die Kartiereinheiten nach ihrem chemischen Bodenzustand. Allem Anschein nach bewirken vorhandene Mittellagen häufig einen Stau effekt, der die Auswaschung freigesetzter Nährstoffkationen verringert und zu einer deutlichen Anreicherung von basischen Nährelementkationen oberhalb der Stausohle führt. Zudem besitzen Mittellagen aufgrund höherer Lößanteile im Vergleich zu den benachbarten Lagen eine offensichtlich nährstoffreichere Mineralzusammensetzung.

Nur etwa 8 bis 10 % der Waldfläche des Hunsrücks nehmen Böden der Bodengesellschaften ein, die sich durch eine **sehr geringe Sensitivität** gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung auszeichnen. Hierbei handelt es sich im wesentlichen um Pseudogleye, Pseudogley-Braunerden und Pseudogley-Parabraunerden mit lößlehmreichen Deckschichten der Tonschiefer-Hochflächen sowie der Terrassen der Hauptvorfluter. Hohe Ca-, Mg- und K-Vorräte im Mineralboden und der durch Stauschichten vermutlich merklich verminderte Austrag freigesetzter Nährstoffkationen mit dem Sickerwasser lassen auf diesen Standorten mittelfristig keine gravierenden Engpässe in der Bereitstellung von Kationbasen erwarten.

Böden mit **geringer Sensitivität** gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung sind auf etwa 5 bis 7 % der Waldfläche des Hunsrücks anzutreffen. Dieser Sensitivitätsgruppe

konnten Braunerde-Pseudogleye und Pseudogleye mit geringmächtigen, löblehmhaltigen Mittellagen sowie Pseudogleye aus löblehmreichen Deckschichten jeweils an schwach bis mitteltgeneigten Mittel- und Unterhangabschnitten der Quarzitzüge und Parabraunerde-Braunerde-Pseudogleye und Pseudogleye aus löblehmhaltigen Deckschichten über Tonschiefer der Tonschiefer-Hochflächen zugeordnet werden. Die Böden dieser Gruppe zeigen einen deutlichen Tiefengradienten in der Versauerung und in der Ausstattung mit basischen Nährstoffen. Im Vergleich zur vorgenannten Gruppe ist hier die Gefahr größer, daß flachwurzelnde Baumarten die vor allem im unteren Mineralboden befindlichen Vorräte an basischen Nährstoffen nicht erreichen.

Böden mit **mittlerer bis geringer Sensitivität** gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung nehmen etwa einen Flächenanteil von 6 % ein. Hierbei handelt es sich um Parabraunerde-Braunerden und Braunerden sowie Braunerde-Pseudogleye aus Hauptlage über Tonschiefer der Tonschiefer-Hochflächen und um Braunerden aus Hauptlage über Terrassensedimenten der Hauptvorfluter. Die Böden dieser Sensitivitätsgruppen sind meist tiefreichend versauert, weisen aber noch mittlere Vorräte an Kationbasen auf. Die Nährelementausstattung der Böden dieser Gruppe läßt mittelfristig keinen Nährstoffmangel für die Vegetation erwarten, wenn die Nährstoffe im tieferen Mineralboden von den Wurzeln erreicht werden können. Durch die in dieser Gruppe bereits deutlich versauerten Oberböden besteht jedoch die Gefahr, daß sich die Nährelementversorgung vom Mineralboden abkoppelt und der tiefere Mineralboden in dem Maß an Bedeutung verliert, in dem die Humusaufgabe dazugewinnt.

Mit einem Flächenanteil von 62 % dominieren im Hunsrück Böden mit **mittlerer bis hoher Sensitivität** gegenüber Bodenversauerung und Nährelementverarmung. Dieser Gruppe sind Braunerden aus quarzitreicher Hauptlage über Tonschiefer in Mittel- bis Unterhanglage, Ranker und skelettreiche Braunerden aus Hauptlage über Tonschiefer an stark geneigten Hängen der Kerbtäler und Braunerden aus Hauptlage über Tonschiefer der Hochflächen zuzuordnen. Der weit überwiegende Teil der dieser Gruppe zugeordneten Bodenprofile zeigt bis in den C-Horizont Basensättigungen unter 15 %. Die Ca-, Mg- und K-Vorräte im Boden liegen meist bereits unter den entsprechenden Vorräten in der Biomasse mittlerer Baumhölzer. Ein erheblicher Anteil der Bodenvorräte ist in der Humusaufgabe gespeichert.

Böden mit **hoher bis sehr hoher Sensitivität** sind auf ca. 11 % der Waldflächen des Hunsrücks anzutreffen. Hierbei handelt es sich um Ranker, skelettreiche Braunerden und Braunerden aus Hauptlage über Quarzit in Kulminationsbereichen und mittel bis stark geneigten Hängen der stark reliefierten Quarzitzüge. Die Böden dieser Gruppe sind im gesamten Solum sehr stark versauert und besitzen nurmehr ein äußerst geringes Säurepufferungsvermögen. Die Ca-,

Mg- und K-Vorräte im Boden liegen bei weniger als der Hälfte der in mittleren Baumhölzern gespeicherten Vorräte. Vor allem bei Magnesium sind teilweise mehr als die Hälfte der insgesamt pflanzenverfügbaren Vorräte in der Humusaufgabe gespeichert. Ein Großteil der Waldbestände dürfte sich unter diesen Bedingungen im wesentlichen aus dem kurzgeschlossenen kleinen Nährstoffkreislauf unter weitgehender Aussparung des tieferen Mineralbodens ernähren.

Ein Vergleich der räumlichen Lage von Bodengesellschaften mit hoher bis sehr hoher Sensitivität und Waldbeständen mit hohem Anteil deutlicher Kronenschäden zeigte eine sehr gute Übereinstimmung. Dies deutet auf einen hohen Realitätsbezug der Sensitivitätsbeurteilung hin.

7. Summary

In order to control the measures which are taken to protect the forest soils from the ongoing soil degradation caused by air pollution, detailed information on the sensitivity of forest soils towards further acidification and nutrient deficiency as well as data concerning the location of especially sensitive forest areas are required. To obtain this information, analysis data of nearly 1300 forest soil samples from the area of Rheinland-Pfalz were evaluated.

Forest Soil Data Base

Prerequisite for a detailed evaluation of the numerous data was the establishment of a comprehensive data base which includes all available title and analysis data of forest soil investigations which were collected within the framework of silvicultural site mapping, state-wide forest status surveys and research on experimental forest sites. According to the requirements of a relational data base, data of the same structure were summarized in tables of their own. The relation between these tables is made via key fields containing clear serial numbers. For the communication within the tables and the generation of data records, the Structured Query Language (SQL) was used. A data base management system is responsible for the internal management of the tables and their corresponding data. This structure guarantees an almost redundancy-free data management, easy and flexible data access as well as fast and user-friendly data editing functions.

Relation between Soil Parameters, Needle Nutrient Contents and Crown Condition

To the extent as data were available, needle analysis data and estimates concerning the needle/leaf loss in the crowns were added to the forest soil data. By using the canonical correlation and redundancy analysis as well as the multiple correlation analysis, the correlation between different soil compartments (humus layer, mineral soil at various depths and various phases), element content of needles and crown condition (needle loss) were investigated. On the basis of these results, hypotheses on the cause and effect structures of soil acidification, nutrient deficiency and crown damages were deduced.

Close statistical correlations were found between the various soil compartments, with explained variances between 35% and 60%. With the help of intraset correlation patterns these

correlations could often be explained causally, especially via similarities in the acidification status as well as in the „manganese status“.

With an explained variance of 13% to 28%, the statistical correlation between the various soil compartments and the element content of needles are significantly lower. In this case, the correlations also seem to be a result of the acidification status of the ecosystems as well as their „manganese status“.

Unexpected statistical correlations with an adjusted determination coefficient of 36 to 60 % were found between the humus layer and the mineral soil (solid state) at both investigated soil depths (0-5 cm and 30-60 cm depth) on one side and the mean needle loss of the trees on the other side. The structural coefficients indicate that a deterioration of the humus condition, increasing acidification of the mineral soil and decreasing exchangeable potassium and calcium contents lead to an increased needle loss of the sample trees. The statistical correlations therefore may also be explained causally. However, due to the relatively small sample size these findings may only be seen as first indications for possible causal relations and should be verified via independent and more comprehensive samples.

Ecochemical Condition of Essential Forest Soils

The comprehensive data material of the forest soil data base was also used for a detailed description of the ecochemical condition of the most important forest soils of Rheinland-Pfalz and for an evaluation of the sensitivity which the various soils showed towards the soil degradation caused by air pollution. For this purpose 1162 soil samples of the forest soil data base were allocated to 16 soil groups for which a similar chemical-mineralogical composition was to be expected.

Based on the cumulative frequency distribution of the analysis data, the ecochemical characterization (as far as acid toxicity and provision of nutrient elements are concerned) was performed for each soil group individually.

The parameters soil pH, base saturation, saturation with H⁺Fe-ions, the percentage of Ca-, Mg- and K-ions at the effective cation exchange capacity and the supply of these ions as well as the nitrogen supply in the root-accessible soil area were used as a basis for the evaluation of the various soil groups' disposition towards soil acidification, base cation deficiency and excess nitrification on the one hand, and for finding the appropriate soil protection measures on the other hand.

Currently the most favourable soil condition and the lowest sensitivity towards soil acidification and base cation deficiency is found in the soil groups *deluvial and alluvial calcareous*

loams and *calcareous loamy fine-sands* as well as in *non-acid volcanic soils*. In the main rooting zone the pH-values can mostly be allocated to the silicate and carbonate buffer range. Base saturations which lie significantly above 20%, mostly above 50 % and high exchangeable calcium and magnesium supplies show that these soil groups have a high short-term acid neutralization capacity and therefore a relatively high elasticity in respect to further acidification. As a rule, a noticeable acidification of the upper soil can only be found in spruce stands. In order to protect the base cation supplies in the soil and to protect the hydrosphere from nitrate stress caused by the mineralization of high nitrogen supplies, the locations of these soil groups should be exclusively reserved for deciduous trees. Neither bulk liming nor bulk fertilization measures should be taken in these areas.

The soils of the soil groups *acid volcanic rocks*, *clays*, *loess*, *periglacial slope deposits* and *non-calcareous fluvial sediments* mostly show a significant acidification and base cation deficiency in the upper and medium-depth mineral soil. However in the lower regions of the mineral soil which is still accessible for roots, their base saturation is still sufficient (> 20%). To be able to take advantage of the significant base cation supplies in the mineral subsoil, deep-rooting tree species, e.g. oaks, should at least be included into silvicultural objectives as admixed tree species. Furthermore it should be investigated whether the liming of the planting hole might be conducive to the deep rooting of the new forest generation. Top-soil liming only seems to be necessary at these locations if the acidification is so striking that even the current stands are not able to take advantage of subsoil regions whose base saturation lies above 20 %. The acidification and especially the base cation deficiency has progressed further in the soils of the soil groups *clayey shale* and *non-calcareous alluvial sands*. In three fourths of the samples which were taken in this soil groups, the base saturation of the entire solum is less than 20 %. The medians of the magnesium and potassium supplies in the mineral soil are similar to the respective supplies in the tree biomass. The ecochemical parameters of both soil groups show large ranges. At deeply acidified and base deficient sites extensive surface liming seems inevitable. For those sites which are characterized by acidification of the upper soil regions but higher base contents in the root-accessible deeper mineral soil regions, suggestions for treatment have already been offered.

The soil groups *quartziferous sandstone*, *triassic sandstone* and *dune sands* are strongly acidified and nutrient deficient, with the acidification reaching down to the deeper soil regions. For those soil groups the median of the base saturation in the medium-depth mineral soil is 10 %, the 75-percentile lies significantly below 20%. Even in the deeper mineral soil there is hardly any increase in the base saturation. The exchangeable magnesium and potas-

sium supplies are significantly below the respective supplies which are found in the tree biomass, which means that the soils of these soil groups only have a very low elasticity in respect to acid toxicity and nutrient supply. Liming against soil acidification is therefore urgently required. Due to the extreme magnesium-deficiency, it is of special importance that the liming substance should contain a high percentage of magnesium carbonate. All silvicultural measures have to be geared towards protecting the humus layer, as the humus supplies contain the majority of the ecosystem's base cation. To improve the nutrient cycle and reduce the danger of acidification phases within the ecosystem which are caused by a disruption of nutrient cycles, pure coniferous stands at such locations should slowly be reduced in favour of deciduous stands. In the event that the upper soil regions suffer from high acidification and base deficiency, it will most probably be necessary to lime the planting hole when planting the deciduous tree species and, if needed be, to add potassium-rich rock meal.

Development of Sensitivity Maps

By using the Hunsrück as an example, it was attempted to show the disposition of the forest soils towards soil acidification and nutrient deficiency in a „sensitivity map“.

The assessment of the soil condition was based on 337 soil samples which were taken from the forest soil data base and which could be allocated to the map units of a recently updated reference map (scale 1:200 000). This map excludes map units whose main differences consist of geological material, slope deposits, soil types and relief parameters.

The evaluation of the sensitivity towards further soil degradation was based on the indicators *soil acidification* (pH, base saturation, Fe- + H-saturation), *nutrient element* status and *hydraulic properties of the subsoil*, which were combined in a sensitivity code. The computer-assisted evaluation procedure was validated by taking random samples from the entire collective and asking experts to allocate those samples to the defined groups.

The spatial distribution of map units with various acidification status, various nutrient element status and various sensitivity towards soil acidification and nutrient deficiency were shown in small-scale maps, their respective percentage of the entire area was estimated.

Clear differences in respect to essential chemical soil properties were found in the different map units. The findings prove that in the lower mountain ranges there are close relations between the slope deposits and the chemical constitution of the soil. The chemical soil condition of the individual map units are especially differentiated by the presence of a „middle layer“. Apparently the presence of „middle layers“ often results in stagnant moisture caused by a less permeable layer which reduces the eluviation of the dissolved nutrient cations and leads to

higher concentration of base cations above the less permeable layer. Compared to the neighbouring layers, the „middle layers“ have a higher loess content and therefore their mineral composition shows a higher percentage of nutrients. The soils of the map units which are characterized by **very low sensitivity** towards soil acidification and nutrient deficiency only make up between 8% and 10% of the forest area of the Hunsrück. Essentially these are simili-gley and pseudogleyed lessivé soils with loessy slope deposits of the Hunsrück plateau (clayey shale). Due to the high Ca-, Mg- and K-supplies in the mineral soil and the decreased discharge of dissolved nutrient cations with the percolating water (which is probably greatly reduced by the impermeable soil layers), it looks like no serious bottlenecks in the supply of cation bases have to be expected at these locations in the near future.

Soils with **low sensitivity** towards soil acidification and nutrient deficiency can be found on 5% to 7% of the Hunsrück forest area. Simili-gley and pseudogleyed brown soils with very shallow loessy slope deposits of the middle and lower slopes of the quartziferous higher regions of the Hunsrück plateau could be allocated to this particular group. The soils of this group show a significant depth gradient as far as their acidification and supply with base cations are concerned. Compared to the previously mentioned group, in this case the danger is more imminent, that those tree species which only root in the upper mineral soil do not reach the nutrient supply of the subsoil.

Soils with **medium to low sensitivity** towards soil acidification and nutrient deficiency constitute approximately 6% of the investigated forest area. The soils which are part of this group are lessivé soils, brown soils, pseudogleyed brown soils of the Hunsrück plateau and fluvial sediments of the main valleys. The soils of these sensitivity groups are mostly characterized by acidification which reaches into the lower soil areas. The nutrient status condition of these soils justifies the assumption, that in the medium term no nutrient deficiency is to be expected for the vegetation as long as the roots are able to reach the nutrients which are present in the lower mineral soil. However, the strong top-soil acidification could lead to a nutrient cycle which excludes the deeper mineral soil.

With a percentage of 62% of the entire area, those soils dominate in the Hunsrück area which show a **medium to high sensitivity** towards soil acidification and nutrient deficiency. This group includes coarse acid brown soils from the quartziferous „main layer“ and clayey shale of the Hunsrück plateau which is found in a strongly sloping exposure. The majority of the soil samples which can be allocated to this group show subsoil base saturations below 15%. The Ca-, Mg- and K-supplies in the soil are mostly below the comparable biomass supplies. A significant percentage of the soil supplies is stored in the humus layer.

Soils with **high to very high sensitivity** can be found on approximately 11 % of the Hunsrück forest areas. The soils belonging to this group are mostly coarse acid brown soils of the complex quartzitic highest regions of the Hunsrück ridges in a steep exposure. The soils of this group are highly acidified in the entire solum and have an extremely low acid buffer capacity. The Ca-, Mg- and K-supplies in the soil constitute less than half the supplies which are stored in the tree biomass. Especially in the case of magnesium sometimes more than half the supplies which are available to the plant are stored in the humus layer. Under these conditions it can be assumed that most forest stands supply themselves via the nutrient cycle which excludes the deeper soil regions.

It was shown that the spatial distribution of the map units with high to very high sensitivity corresponds with forest stands which show a high percentage of crown damages.

Anhang

- Anhang 1:** Tabellen zu Kapitel 2
(Aufbau einer Waldbodendatenbank)
Tab. 1.1 bis 1.8
- Anhang 2:** Tabellen zu Kapitel 3
(Beziehungen zwischen Bodenparametern, Nadelinhaltsstoffen
und Kronenzustand)
Tab. 2.1a bis 2.4e
- Anhang 3:** Schlüsselverzeichnis der Ausgangssubstrate sowie Tabellen und
Abbildungen zu Kapitel 4 (ökochemische Ausstattung wesentlicher
Waldbodensubstrate und Bewertung ihrer Empfindlichkeit gegenüber
Bodendegradation durch Luftschadstoffbelastung)
Tab. 3.1 bis 3.31 und Abb. 3.1 bis 3.10
- Anhang 4:** Beschreibung der Bodengesellschaften und Tabellen zu Kapitel 5
(Bewertung der Sensitivität großräumig bodenkundlich kartierter
Flächeneinheiten gegenüber fortschreitender Bodenversauerung und
Nährelementverarmung)
Tab. 4.1 bis 4.23

Anhang 1: Tabellen zu Kapitel 2 (Aufbau einer Waldbodendatenbank)

Feldname	Typ	Erklärung
ARNR	Numerisch	Probenschlüssel
FAMT	Numerisch	Forstamt
RECHTS	Numerisch	Rechtswert
HOCH	Numerisch	Hochwert
WUBEZ	Numerisch	Wuchsbezirk
HOEHE	Numerisch	Höhe über NN
RLFORM	Zeichen	Reliefform
NEIG	Numerisch	Hangneigung
ORICHT	Numerisch	Hangrichtung
BALT	Numerisch	Baumalter
BAUART	Numerisch	Baumart
DUENG	Zeichen	Düngungsmaßnahme
HUFORM	Zeichen	Humusform
BODTYP	Zeichen	Bodentyp
POD	Numerisch	Podsolierungsgrad
DICHTE	Numerisch	Durchlässigkeit
GFORM	Zeichen	Grundform
DATUM	Numerisch	Aufnahmedatum
WE	Numerisch	eff. Durchwurzelungstiefe in cm
AUSGA1	Numerisch	Ausgangssubstrat
AUSGA2	Numerisch	Ausgangssubstrat
AUSGA3	Zeichen	Ausgangssubstrat
AUSGR	Numerisch	Gruppeneinteilung der Ausgangssubstrate
DGB	Logisch	durchgängig beprobt
BF	Numerisch	Bodenformgesellschaft
SR	Numerisch	Substratreihe
AUSGRK	Numerisch	Klassifikation der Ausgangssubstratgruppen
HUMFKLAS	Numerisch	Klassifikation der Humusformen

Tab. 1.1: Struktur der Relation KOPFDAT der Waldbodendatenbank

Feldname	Typ	Erklärung
ARNR	Numerisch	Probenschlüssel
HORIZ	Zeichen	Horizont
OTIEF	Numerisch	Obere-Tiefe
UTIEF	Numerisch	Untere-Tiefe
BOART	Zeichen	Bodenart
TRD	Numerisch	Trockenraumdichte
SKEL	Numerisch	Skelett
PH_CACL2	Numerisch	pH-Wert
PH_H2O	Numerisch	pH-Wert
CN	Numerisch	CN-Verhältnis
CP	Numerisch	CP-Verhältnis
C	Numerisch	Kohlenstoffgehalt in mg/g
N	Numerisch	Stickstoffgehalt in mg/g
P	Numerisch	Phosphorgehalt in mg/g
K	Numerisch	Kaliumgehalt in MYMOL (EQ)/g
NA	Numerisch	Natriumgehalt in MYMOL (EQ)/g
MG	Numerisch	Magnesiumgehalt in MYMOL (EQ)/g
CA	Numerisch	Calciumgehalt in MYMOL (EQ)/g
H	Numerisch	Wasserstoffgehalt in MYMOL (EQ)/g
AL	Numerisch	Aluminiumgehalt in MYMOL (EQ)/g
FE	Numerisch	Eisengehalt in MYMOL (EQ)/g
MN	Numerisch	Mangangehalt in MYMOL (EQ)/g
AKE	Numerisch	eff. Kationenaustauschkapazität
CAV	Numerisch	Ca-Vorrat in kg/ha
MGV	Numerisch	Mg-Vorrat in kg/ha
KV	Numerisch	K-Vorrat in kg/ha
PV_	Numerisch	P-Vorrat in kg/ha
NV	Numerisch	N-Vorrat in kg/ha
FEINB	Numerisch	Feinbodenmenge (kg/ha)
BASEN	Numerisch	Basensättigung
XSK	Numerisch	Anteil K an der AKE in MYMOL (EQ)/g
XSNA	Numerisch	Anteil Na an der AKE in MYMOL (EQ)/g
XSMG	Numerisch	Anteil Mg an der AKE in MYMOL (EQ)/g
XSCA	Numerisch	Anteil Ca an der AKE in MYMOL (EQ)/g
XSH	Numerisch	Anteil H an der AKE in MYMOL (EQ)/g
XSAL	Numerisch	Anteil Al an der AKE in MYMOL (EQ)/g
XSFE	Numerisch	Anteil Fe an der AKE in MYMOL (EQ)/g
XSMN	Numerisch	Anteil Mn an der AKE in MYMOL (EQ)/g

Tab. 1.2: Struktur der Relation MINERAL der Waldbodendatenbank

Feldname	Typ	Erklärung
ARNR	Numerisch	Probenschlüssel
TIEFE	Numerisch	fortlaufende Horizontferschl.
HORIZ	Zeichen	Horizont
OTIEF	Numerisch	Obere-Tiefe
UTIEF	Numerisch	Untere-Tiefe
BOART	Zeichen	Bodenart
SKEL	Numerisch	Skelett

Tab. 1.3: Struktur der Relation HORIZONT der Waldbodendatenbank (für die in Tiefenstufen beprobten Profile)

Feldname	Typ	Erklärung
ARNR	Numerisch	Probenschlüssel
RPKT	Numerisch	Rasterpunkt
CHU	Numerisch	Kohlenstoffgehalt in mg/g
NHU	Numerisch	Stickstoffgehalt in mg/g
PHU	Numerisch	Phosphorgehalt in mg/g
SIHU	Numerisch	Siliciumgehalt in mg/g
KHU	Numerisch	Kaliumgehalt in mg/g
CAHU	Numerisch	Calciumgehalt in mg/g
MGHU	Numerisch	Magnesiumgehalt in mg/g
MNHU	Numerisch	Mangangehalt in mg/g
FEHU	Numerisch	Eisengehalt in mg/g
ALHU	Numerisch	Aluminiumgehalt in mg/g
ASCHEHU	Numerisch	Aschegehalt in mg/g
CNHU	Numerisch	CN-Verhältnis
PBHU	Numerisch	Bleigehalt in mg/g
CUHU	Numerisch	Kupfergehalt in mg/g
ZNHU	Numerisch	Zinkgehalt in mg/g
CDHU	Numerisch	Cadmiumgehalt in mg/g
PHH2OHU	Numerisch	pH-Wert
PHKHU	Numerisch	pH-Wert
PHCAHU	Numerisch	pH-Wert
HMENGE	Numerisch	Humusmenge (T/ha)
CAVHU	Numerisch	Ca-Vorrat in Humusschicht [kg/ha]
MGVHU	Numerisch	Mg-Vorrat in Humusschicht [kg/ha]
KVHU	Numerisch	K-Vorrat in Humusschicht [kg/ha]
PVHU	Numerisch	P-Vorrat in Humusschicht [kg/ha]
NVHU	Numerisch	N-Vorrat in Humusschicht [kg/ha]

Tab. 1.4: Struktur der Relation HUMUS der Waldbodendatenbank

Feldname	Typ	Erklärung
ARNR	Numerisch	Probenschlüssel
RPKT	Numerisch	Rasterpunkt
NJG	Numerisch	Nadeljahrgang
BAUART	Zeichen	Baumart
N	Numerisch	Stickstoffgehalt in %
P	Numerisch	Phosphorgehalt in %
K	Numerisch	Kaliumgehalt in mg/kg
CA	Numerisch	Calciumgehalt in mg/kg
MG	Numerisch	Magnesiumgehalt in mg/kg
MN	Numerisch	Manganengehalt in mg/kg
S	Numerisch	Schwefelgehalt in mg/kg
CL	Numerisch	Chlorgehalt in mg/kg
AL	Numerisch	Aluminiumgehalt in mg/kg
FE	Numerisch	Eisengehalt in mg/kg
ASCH	Numerisch	Aschegehalt in mg/kg
SI	Numerisch	Siliciumgehalt in mg/kg
NA	Numerisch	Natriumgehalt in mg/kg
CD	Numerisch	Cadmiumgehalt in mg/kg
CU	Numerisch	Kupfergehalt in mg/kg
ZN	Numerisch	ZinKgehalt in mg/kg
PB	Numerisch	Bleigehalt in mg/kg
VERG	Numerisch	Schlüssel für Vergilbungsprozent
JAHR	Numerisch	Aufnahmedatum

Tab. 1.5: Struktur der Relation NADEL der Waldbodendatenbank

Feldname	Typ	Erklärung
ARNR	Numerisch	Probenschlüssel
TIEFE	Numerisch	Schlüssel für Tiefenbereich 1 bis 3
OTIEF	Numerisch	Obere-Tiefe
UTIEF	Numerisch	Untere-Tiefe
BASEN	Numerisch	Basensättigung

Tab. 1.6: Struktur der Relation BASEN der Waldbodendatenbank

Feldname	Typ	Erklärung
ARNR	Numerisch	Probenschlüssel
TIEFE_BIS	Numerisch	Schlüssel für Tiefenbereich 1 bis 3
CA	Numerisch	Ca-Vorrat in kg/ha
MG	Numerisch	Mg-Vorrat in kg/ha
K	Numerisch	K-Vorrat in kg/ha
P	Numerisch	P-Vorrat in kg/ha
N	Numerisch	N-Vorrat in kg/ha

Tab. 1.7: Struktur der Relation VORRAT/VORRAT2 der Waldbodendatenbank

Feldname	Typ	Erklärung
ARNR	Numerisch	Probenschlüssel
BF	Numerisch	Bodenformgesellschaft
AUSGR	Numerisch	Gruppeneinteilung der Ausgangsgesteine
AUSGRK	Numerisch	Klassifikation der Ausgangsgesteinsgruppen
XSFEHK1	Numerisch	Anteil Fe an der AKE für Tiefe1, klassifiziert
XSFEHK2	Zeichen	Anteil Fe an der AKE für Tiefe2, klassifiziert
XSFEHK3	Zeichen	Anteil Fe an der AKE für Tiefe3, klassifiziert
PH_CACL2K1	Numerisch	pH-Wert CACL2 für Tiefe1, klassifiziert
PH_CACL2K2	Zeichen	pH-Wert CACL2 für Tiefe2, klassifiziert
PH_CACL2K3	Zeichen	pH-Wert CACL2 für Tiefe3, klassifiziert
BASENK1	Numerisch	Basensättigung für Tiefe1, klassifiziert
BASENK2	Zeichen	Basensättigung für Tiefe2, klassifiziert
BASENK3	Zeichen	Basensättigung für Tiefe3, klassifiziert
VFRONTK	Numerisch	Versauerungsfrontklassen
HUMFKLAS	Numerisch	Humusformklassen
DICHTE	Numerisch	Durchlässigkeit
KK	Numerisch	K-Vorrat klassifiziert
CAK	Numerisch	Ca-Vorrat klassifiziert
MGK	Numerisch	Mg-Vorrat klassifiziert
XSFE1	Numerisch	Anteil Fe an der AKE für Tiefe 1 (%)
XSFE2	Numerisch	Anteil Fe an der AKE für Tiefe 2 (%)
XSFE3	Numerisch	Anteil Fe an der AKE für Tiefe 3 (%)
HUMGK1	Numerisch	Humusgehalt für Tiefe1, klassifiziert
HUMGK2	Zeichen	Humusgehalt für Tiefe2, klassifiziert
HUMGK3	Zeichen	Humusgehalt für Tiefe3, klassifiziert

Tab. 1.8: Struktur der Relation KLASSFBF der Waldbodendatenbank. (Nur 337 Profile für automatisiertes Bewertungsverfahren. Alle Daten sind klassifiziert, vgl. Kap. 5).

Anhang 2: Tabellen zu Kapitel 3 (Beziehungen zwischen Bodenparametern, Nadelinhaltsstoffen und Kronenzustand)

Tab. 2.1: In die statistische Analyse einbezogene Kennwerte und deren Variabilität

a) Kronenzustand (> 15-jährige Fichten; 58 Beobachtungen)

Parameter	Minimum	25 %- Perzentil	Median	75 %- Perzentil	Maximum	Mittelwert	Variations- koeff. [%]
mittl. Nadel- verlust der 24 Stichproben- bäume [%]	0	7	12	20	34	13,1	64,5

b) Nadelspiegelwerte (> 15-jährige Fichten, 1. Nadeljahrgang des 7. Quirls; 57 Beobachtungen)

Parameter	Minimum	25 %- Perzentil	Median	75 %- Perzentil	Maximum	Mittelwert	Variations- koeff. [%]
Asche [%]	2.14	2.84	3.30	3.70	5.77	3.36	20.08
N [%]	1.21	1.41	1.48	1.59	1.72	1.49	8.18
P [%]	0.09	0.12	0.13	0.15	0.20	0.13	16.03
K [ppm]	3350	4500	5400	6000	7800	5453	21.70
Ca [ppm]	1850	3000	3850	5250	12400	4241	47.00
Mg [ppm]	450	695	810	915	1300	814.8	21.28
Mn [ppm]	235	1300	1900	2850	4550	2034.0	52.21
S [ppm]	805	933	1010	1106	1435	1021.6	12.28
Cl [ppm]	310	453	539	638	1292	582.6	33.86
Al [ppm]	54	75	87	112	223	102.4	39.64
Fe [ppm]	47	63	80	97	173	85.8	33.26
Si [ppm]	1100	2000	2400	3200	5200	2621.1	37.49
Na [ppm]	1	16	27	42	160	33.2	90.10
Cd [ppm]	0.04	0.12	0.18	0.26	0.63	0.20	60.53
Cu [ppm]	2.00	2.60	2.90	3.20	4.60	2.92	17.94
Zn [ppm]	16	29	35	43	73	37.3	32.97
Pb [ppm]	0.34	0.73	0.97	1.20	2.26	1.00	39.15

c) Humusaufgabe (124 Beobachtungen)

Parameter	Minimum	25%- Percentil	Median	75%- Percentil	Maximum	Mittelwert	Variations- koeff.[%]
pH _{H2O}	2.50	3.00	3.50	4.00	5.50	3.53	22.54
pH _{KCl}	2.53	2.99	3.27	3.80	5.75	3.43	18.59
pH _{CaCl2}	2.75	3.19	3.51	4.06	5.80	3.67	17.65
C/N	14.87	21.48	24.36	26.45	33.87	24.20	14.45
C/P	126.05	326.79	404.28	496.56	868.89	424.66	34.43
C [mg/g]	116.10	235.05	334.15	382.95	466.00	311.68	28.08
N [mg/g]	5.80	11.00	13.10	15.35	18.90	12.88	25.18
P [mg/g]	0.38	0.60	0.78	0.94	1.67	0.78	30.06
Si [mg/g]	9.51	81.53	124.35	203.74	336.57	143.11	154.01
K [mg/g]	0.78	1.61	2.87	5.06	18.50	3.92	82.76
Ca [mg/g]	1.21	2.19	3.11	5.58	20.36	4.48	78.01
Mg [mg/g]	0.28	0.71	1.30	2.33	7.45	1.75	83.65
Mn [mg/g]	0.07	0.44	1.10	2.04	7.03	1.55	94.51
Fe [mg/g]	1.58	5.00	7.75	12.25	34.21	9.66	67.78
Al [mg/g]	2.17	5.95	9.93	18.92	40.96	13.07	68.89
Pb [mg/g]	0.02	0.06	0.10	0.15	0.41	0.12	62.23
Cu [mg/g]	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02	37.22
Zn [mg/g]	0.03	0.06	0.08	0.09	0.16	0.08	32.81
Cd [mg/g]	0.0002	0.0004	0.0006	0.0007	0.0011	0.0006	34.66
Basensättig. *	0.02	0.06	0.10	0.17	0.76	0.13	83.28
Humusmenge [t/ha]	3.34	24.50	75.64	100.26	183.76	69.37	65.69
C [t/ha]	0.64	7.28	17.50	32.71	61.04	21.44	74.14
Si [t/ha]	0.26	2.42	7.99	15.36	41.41	10.48	89.93
N [kg/ha]	27.02	326.76	794.04	1275.92	2186.74	849.13	66.95
P [kg/ha]	1.79	21.38	47.97	70.28	121.05	48.35	60.33
K [kg/ha]	6.29	72.35	156.44	343.23	1180.07	238.51	97.18
Ca [kg/ha]	9.65	127.88	174.70	286.60	944.28	231.46	74.23
Mg [kg/ha]	3.05	32.72	68.73	129.58	540.87	100.48	96.52
Mn [kg/ha]	3.26	27.64	49.82	85.91	268.03	66.03	80.24
Fe [kg/ha]	17.30	197.84	492.21	918.84	2207.48	625.33	82.50
Al [kg/ha]	28.60	242.72	619.24	1189.57	3063.98	832.80	88.43
Pb [kg/ha]	0.18	1.73	7.21	13.00	36.51	9.28	91.54
Cu [kg/ha]	0.05	0.40	0.94	1.64	3.56	1.16	73.77
Zn [kg/ha]	0.13	2.13	4.77	7.12	18.12	5.00	70.33
Cd [kg/ha]	0.00	0.02	0.03	0.06	0.14	0.04	70.07

*) Basensättigungsgrad: Ca / (Ca+Al+Fe)

d) Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe (129 Beobachtungen)

Parameter	Minimum	25%- Percentil	Median	75%- Percentil	Maximum	Mittelwert	Variations- koeff. [%]
TRD* [g/cm ³]	0.70	0.90	1.08	1.23	1.54	1.08	19.39
Skelettgehalt [%]	0.00	4.00	7.00	20.00	85.00	13.90	114.38
C/N	3.33	16.24	19.57	23.14	33.33	19.68	29.10
C/P	4.37	92.63	135.18	196.40	750.00	157.85	62.70
C [mg/g]	2.00	30.08	44.60	59.10	120.90	46.63	49.18
N [mg/g]	0.50	1.50	2.20	3.10	5.50	2.44	49.94
P [mg/g]	0.04	0.20	0.36	0.46	1.30	0.37	58.33
pH CaCl ₂	2.70	3.12	3.35	3.70	6.40	3.46	15.28
pH KCl	2.43	2.90	3.20	3.40	6.20	3.22	15.72
AKe** [μmoleq/g]	19.40	57.47	85.39	111.18	229.63	87.92	44.98
H [μmoleq/g]	0.00	3.05	6.06	14.69	34.20	9.40	87.20
Na [μmoleq/g]	0.09	0.52	0.68	0.97	4.43	0.93	87.41
K [μmoleq/g]	0.30	1.28	2.00	2.74	5.83	2.16	54.13
Ca [μmoleq/g]	0.84	3.73	6.51	12.28	153.29	13.09	172.44
Mg [μmoleq/g]	0.26	1.22	2.00	3.19	77.30	3.80	224.15
Fe [μmoleq/g]	0.00	0.00	1.35	3.24	14.65	2.26	125.41
Mn [μmoleq/g]	0.00	0.61	2.90	5.80	18.29	3.89	100.82
XSK***	0.00	0.02	0.02	0.03	0.07	0.03	49.60
XSNa***	0.00	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	72.58
XSMg***	0.01	0.02	0.03	0.04	0.34	0.04	113.92
XSCa***	0.01	0.05	0.08	0.17	0.71	0.14	104.26
XSH***	0.00	0.03	0.08	0.22	0.55	0.14	102.02
XSAI***	0.00	0.45	0.61	0.73	0.90	0.58	32.58
XSF _e ***	0.00	0.00	0.02	0.04	0.10	0.03	98.81
XSMn***	0.00	0.01	0.03	0.07	0.22	0.05	98.18

* TRD = Trockenraumdichte

** AKe = effektive Kationenaustauschkapazität

*** XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

e) Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe (129 Beobachtungen)

Parameter	Minimum	25%- Percentil	Median	75%- Percentil	Maximum	Mittelwert	Variations- koeff. [%]
TRD* [g/cm ³]	0.75	1.25	1.46	1.60	1.90	1.42	17.36
Skelettgehalt [%]	0.00	6.00	30.00	50.00	85.00	29.73	79.71
pH CaCl ₂	3.53	3.88	4.03	4.25	7.25	4.11	10.73
pH KCl	2.95	3.55	3.80	4.03	6.90	3.81	12.10
N [mg/g]	0.00	0.30	0.60	0.90	3.50	0.74	83.52
P [mg/g]	0.06	0.13	0.23	0.35	1.07	0.26	69.82
AKe** [μmoleq/g]	8.08	20.38	42.65	60.78	277.58	48.49	80.27
H [μmoleq/g]	0.00	0.00	0.00	0.46	6.53	0.53	210.89
Na [μmoleq/g]	0.00	0.37	0.59	1.03	9.20	0.99	121.85
K [μmoleq/g]	0.11	0.63	1.19	2.02	24.76	1.60	145.50
Ca [μmoleq/g]	0.00	0.46	1.14	5.07	156.09	9.02	263.96
Mg [μmoleq/g]	0.03	0.16	0.59	3.82	83.55	5.32	241.22
Fe [μmoleq/g]	0.00	0.00	0.00	0.00	2.71	0.15	264.60
Mn [μmoleq/g]	0.00	0.16	0.71	1.30	9.09	0.92	123.51
XSK***	0.01	0.02	0.03	0.04	0.28	0.03	84.01
XNa***	0.00	0.01	0.02	0.03	0.12	0.02	89.21
XSMg***	0.00	0.01	0.01	0.08	0.51	0.06	159.30
XSCa***	0.00	0.02	0.03	0.11	0.74	0.10	151.82
XSH***	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	194.11
XSAI***	0.00	0.70	0.86	0.90	0.95	0.75	33.33
XSF ^e ***	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	272.61
XSMn***	0.00	0.00	0.02	0.03	0.07	0.02	89.68

* TRD = Trockenraumdichte

** AKe = effektive Kationenaustauschkapazität

*** XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

f) Nährstoffvorräte im Mineralboden bis 60 cm Tiefe (56 Beobachtungen)

Parameter	Minimum	25%- Percentil	Median	75%- Percentil	Maximum	Mittelwert	Variations- koeff. [%]
Ca [kg/ha]	32.39	118.87	246.47	1011.84	15383.25	1271.52	233.34
Mg [kg/ha]	11.04	28.08	82.66	277.08	4343.07	390.50	232.34
K [kg/ha]	56.05	169.50	281.04	384.58	1653.05	339.13	85.06
P [kg/ha]	341.51	1026.09	1543.90	1998.20	3962.63	1582.75	47.12
N [kg/ha]	1365.32	4105.86	5547.57	7041.24	17006.00	5962.19	47.62

g) Wäßriger Extrakt des Oberbodens (109 Beobachtungen)

Parameter	Minimum	25%- Percentil	Median	75%- Percentil	Maximum	Mittelwert	Variations- koeff. [%]
pH	3.63	4.33	4.53	4.74	6.64	4.58	10.30
DOC [mg/l]	9.70	57.00	76.50	109.50	198.50	83.76	50.80
Na [mg/l]	0.45	1.13	1.85	2.58	6.90	2.03	59.01
K [mg/l]	0.32	1.73	2.50	3.35	8.28	2.75	53.02
Mg [mg/l]	0.21	0.68	1.04	1.69	5.13	1.36	72.47
Ca [mg/l]	0.43	1.27	2.12	3.76	11.20	3.00	83.72
NH ₄ N [mg/l]	0.15	0.45	0.69	0.98	1.47	0.72	50.56
NO ₃ N [mg/l]	0.06	0.22	0.57	1.10	4.78	0.92	112.43
Cl [mg/l]	0.72	1.71	2.38	3.29	12.15	2.89	60.85
SO ₄ S [mg/g]	2.16	4.26	5.48	9.05	21.30	7.21	58.51
PO ₄ P [mg/l]	0.00	0.01	0.02	0.04	0.25	0.04	136.70
Al [mg/l]	0.17	1.38	2.60	3.68	7.48	2.74	58.96
Mn [mg/l]	0.03	0.88	3.30	6.50	21.30	4.59	104.67
Fe [mg/l]	0.01	0.15	0.37	1.10	4.43	0.76	118.86
Aziditätsgrad*	0.16	0.47	0.60	0.69	0.84	0.57	29.39
Ca/Al **	0.06	0.32	0.60	1.35	29.18	1.40	219.94
Mg/Al **	0.13	0.24	0.53	0.95	12.10	0.97	171.23

* Aziditätsgrad (H + Al + Mn + Fe) / (Ca + Mg + K + H + Al + Mn + Fe) [moleq/moleq]

** berechnet in mol/mol

h) Wäßriger Extrakt des Unterbodens (88 Beobachtungen)

Parameter	Minimum	25%- Percentil	Median	75%- Percentil	Maximum	Mittelwert	Variations- koeff. [%]
pH	4.30	4.61	4.83	5.29	7.80	5.16	17.18
DOC [mg/l]	6.20	10.55	10.05	25.60	84.50	20.38	69.04
Na [mg/l]	0.16	0.89	1.55	3.13	25.10	2.65	126.85
K [mg/l]	0.29	1.44	1.97	3.03	7.55	2.37	64.20
Mg [mg/l]	0.04	0.31	0.80	2.30	6.50	1.44	102.36
Ca [mg/l]	0.02	0.76	1.54	2.98	37.25	3.50	180.72
NH ₄ N [mg/l]	0.04	0.15	0.26	0.38	1.10	0.30	69.59
NO ₃ N [mg/l]	0.05	0.12	0.20	0.36	3.76	0.39	136.22
Cl [mg/l]	0.43	1.05	1.64	2.26	18.35	2.32	107.52
SO ₄ S [mg/g]	0.53	2.50	4.43	7.33	23.29	5.51	74.05
PO ₄ P [mg/l]	0.00	0.01	0.01	0.02	0.68	0.04	260.22
Al [mg/l]	0.09	0.28	0.57	1.29	3.37	0.89	88.39
Mn [mg/l]	0.01	0.14	0.42	1.42	13.85	1.14	175.77
Fe [mg/l]	0.01	0.07	0.13	0.34	1.73	0.26	122.45
Aziditätsgrad*	0.01	0.16	0.32	0.45	0.74	0.32	58.95
Ca/Al **	0.03	0.68	1.43	4.55	117.93	6.25	273.81
Mg/Al **	0.11	0.52	1.01	3.95	41.60	4.25	171.74

* Aziditätsgrad (H + Al + Mn + Fe) / (Ca + Mg + K + H + Al + Mn + Fe) [moleq/moleq]

** berechnet in mol/mol

Tab. 2.2: Bivariate Korrelationen

Tab. 2.2.1: Korrelationsmatrix „Nadelspiegelwerte“

	N	P	K	Ca	Mg	Mn	S	Cl	Al	Fe	Asche	Si	Na	Cd	Cu	Zn	Pb
N	1																
P	0,18	1															
K	0,05	0,29	1														
Ca	-0,52	-0,15	-0,09	1													
Mg	-0,24	0,22	-0,12	0,51	1												
Mn	-0,11	-0,19	-0,40	0,16	0,17	1											
S	0,40	0,19	0,21	-0,22	-0,15	-0,38	1										
Cl	0,17	0,09	-0,22	0,02	0,17	0,15	0,11	1									
Al	0,18	0,16	0,10	-0,10	0,03	-0,04	-0,01	-0,08	1								
Fe	0,20	0,23	0,05	-0,06	-0,09	-0,16	-0,02	-0,09	0,59	1							
Asche	-0,33	0,03	0,13	0,83	0,53	0,16	-0,02	0,24	0,04	-0,03	1						
Si	0,06	0,03	-0,17	0,15	0,18	-0,05	0,39	0,14	-0,21	-0,03	0,29	1					
Na	0,00	-0,15	-0,16	0,10	-0,08	0,07	-0,16	0,30	0,07	0,34	0,09	0,04	1				
Cd	-0,15	-0,08	-0,04	0,40	0,26	0,34	-0,34	0,05	0,02	0,16	0,39	0,04	0,37	1			
Cu	0,34	0,21	0,36	-0,24	-0,09	0,02	0,21	-0,12	0,48	0,35	-0,01	-0,11	0,11	0,15	1		
Zn	-0,19	0,08	0,44	0,41	0,32	-0,12	0,01	-0,42	0,13	0,20	0,41	0,01	-0,22	0,35	0,24	1	
Pb	0,22	0,08	0,00	-0,15	-0,18	-0,03	0,06	0,04	0,30	0,71	-0,15	-0,03	0,52	0,26	0,30	0,02	1

Tab. 2.2.2: Korrelationsmatrix „Humusaufgabe“

	C	N	P	Si	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Al	Pb	Cu	Zn	Cd	pH _{H2O}	pH _{KCl}	pH _{CaCl₂}	C/N
C	1																	
N	0,86	1																
P	0,34	0,61	1															
Si	-0,94	-0,89	-0,52	1														
K	-0,21	-0,06	0,33	0,07	1													
Ca	0,21	0,29	0,43	-0,32	0,06	1												
Mg	-0,34	-0,17	0,40	0,13	0,42	0,50	1											
Mn	0,16	0,35	0,48	-0,24	0,22	0,42	0,14	1										
Fe	-0,43	-0,23	0,41	0,21	0,55	0,01	0,75	0,06	1									
Al	-0,44	-0,20	0,39	0,22	0,57	-0,03	0,61	0,13	0,85	1								
Pb	0,00	-0,01	0,08	-0,04	0,22	-0,35	0,06	-0,30	0,38	0,35	1							
Cu	0,13	0,24	0,49	-0,27	0,29	0,10	0,43	0,02	0,52	0,43	0,50	1						
Zn	0,18	0,34	0,60	-0,35	0,30	0,23	0,53	0,23	0,63	0,49	0,24	0,58	1					
Cd	0,33	0,41	0,48	-0,40	0,12	0,24	0,19	0,33	0,26	0,20	0,18	0,41	0,58	1				
pH_{H2O}	-0,13	0,04	0,45	-0,05	0,43	0,41	0,47	0,47	0,47	0,53	0,16	0,31	0,36	0,26	1			
pH_{KCl}	-0,20	-0,01	0,39	0,06	0,22	0,72	0,56	0,54	0,21	0,22	-0,42	0,04	0,20	0,11	0,53	1		
pH_{CaCl₂}	-0,13	0,03	0,38	-0,01	0,18	0,78	0,56	0,49	0,17	0,17	-0,42	0,05	0,20	0,09	0,52	0,90	1	
C/N	0,50	0,00	-0,38	-0,33	-0,34	-0,07	-0,38	-0,27	-0,48	-0,53	-0,01	-0,16	-0,22	-0,06	-0,37	-0,39	-0,33	1
C/P	0,53	0,16	-0,55	-0,33	-0,48	-0,20	-0,56	-0,34	-0,64	-0,68	-0,09	-0,27	-0,30	-0,10	-0,54	-0,53	-0,48	0,79
BS	0,41	0,34	0,12	-0,37	-0,28	0,76	-0,01	0,23	-0,49	-0,53	-0,42	-0,14	-0,12	0,07	0,03	0,40	0,48	0,22
HM	-0,05	-0,30	-0,53	0,16	-0,23	-0,50	-0,32	-0,63	-0,15	-0,18	0,32	-0,07	-0,25	-0,22	-0,46	-0,65	-0,60	0,44
C-Vor.	0,32	0,03	-0,37	-0,21	-0,28	-0,41	-0,38	-0,56	-0,25	-0,30	0,33	0,04	-0,12	-0,09	-0,47	-0,67	-0,59	0,60
N-Vor.	0,26	0,03	-0,34	-0,16	-0,24	-0,44	-0,36	-0,57	-0,19	-0,24	0,37	0,05	-0,12	-0,10	-0,46	-0,67	-0,60	0,45
P-Vor.	0,09	-0,07	-0,16	-0,05	-0,07	-0,44	-0,17	-0,53	0,06	0,04	0,52	0,18	0,00	-0,06	-0,29	-0,58	-0,52	0,29
Si-Vor.	-0,56	-0,67	-0,62	0,68	-0,13	-0,45	-0,18	-0,48	-0,05	-0,04	0,12	-0,28	-0,40	-0,33	-0,34	-0,38	-0,40	0,07
K-Vor.	-0,22	-0,24	-0,04	0,17	0,67	-0,29	0,16	-0,22	0,40	0,41	0,55	0,26	0,07	-0,02	0,11	-0,27	-0,27	-0,07
Ca-Vor.	0,08	-0,08	-0,19	-0,06	-0,13	0,29	0,19	-0,27	-0,06	-0,16	0,16	0,08	0,01	-0,01	-0,13	-0,07	0,07	0,28
Mg-Vor.	-0,30	-0,32	-0,03	0,21	0,24	0,01	0,57	-0,22	0,51	0,43	0,45	0,32	0,28	0,00	0,10	-0,05	-0,02	-0,06
Mn-Vor.	-0,07	-0,05	0,08	0,05	0,21	-0,02	0,12	0,36	0,25	0,26	0,18	0,12	0,20	0,25	0,25	0,08	0,05	-0,10
Fe-Vor.	-0,30	-0,34	-0,06	0,23	0,27	-0,36	0,26	-0,33	0,61	0,54	0,64	0,35	0,29	0,03	0,08	-0,33	-0,33	-0,04
Al-Vor.	-0,34	-0,35	-0,04	0,25	0,30	-0,37	0,21	-0,29	0,55	0,65	0,61	0,26	0,18	-0,02	0,15	-0,31	-0,32	-0,09
Pb-Vor.	0,03	-0,13	-0,20	-0,01	0,04	-0,42	-0,10	-0,48	0,16	0,13	0,85	0,33	0,05	0,00	-0,07	-0,55	-0,51	0,26
Cu-Vor.	0,10	-0,11	-0,23	-0,06	-0,04	-0,40	-0,10	-0,51	0,11	0,03	0,61	0,43	0,09	-0,01	-0,24	-0,58	-0,53	0,37
Zn-Vor.	0,08	-0,12	-0,26	-0,04	-0,09	-0,39	-0,09	-0,48	0,13	0,04	0,49	0,23	0,26	0,04	-0,25	-0,55	-0,48	0,36
Cd-Vor.	0,10	-0,13	-0,33	-0,01	-0,15	-0,40	-0,22	-0,47	-0,02	-0,08	0,44	0,13	0,03	0,24	-0,33	-0,58	-0,54	0,42

BS = Basensättigungsgrad Ca / (Ca + Al + Fe)
 HM = Humusmenge

Tab. 2.2.2: Korrelationsmatrix „Humusaufgabe“ (Fortsetzung)

	C/P	BS	HM	C-Vor.	N-Vor.	P-Vor.	Si-Vor.	K-Vor.	Ca-Vor.	Mg-Vor.	Mn-Vor.	Fe-Vor.	Al-Vor.	Pb-Vor.	Cu-Vor.	Zn-Vor.	Cd-Vor.
C																	
N																	
P																	
Si																	
K																	
Ca																	
Mg																	
Mn																	
Fe																	
Al																	
Cu																	
Zn																	
Cd																	
pH _{H2O}																	
pH _{KCl}																	
pH _{CaCl2}																	
C/N																	
C/P	1																
BS	0,21	1															
HM	0,47	-0,27	1														
C-Vor.	0,65	-0,14	0,90	1													
N-Vor.	0,54	-0,19	0,92	0,98	1												
P-Vor.	0,21	-0,32	0,87	0,86	0,92	1											
Si-Vor.	0,10	-0,31	0,74	0,40	0,45	0,48	1										
K-Vor.	-0,18	-0,40	0,41	0,29	0,36	0,53	0,34	1									
Ca-Vor.	0,21	0,37	0,50	0,49	0,49	0,50	0,29	0,24	1								
Mg-Vor.	-0,24	-0,17	0,37	0,23	0,29	0,49	0,33	0,57	0,64	1							
Mn-Vor.	-0,21	-0,13	0,13	0,07	0,12	0,27	0,12	0,37	0,31	0,40	1						
Fe-Vor.	-0,20	-0,55	0,56	0,41	0,48	0,71	0,45	0,70	0,32	0,75	0,42	1					
Al-Vor.	-0,27	-0,57	0,51	0,34	0,41	0,66	0,45	0,71	0,22	0,67	0,39	0,93	1				
Pb-Vor.	0,19	-0,37	0,72	0,71	0,74	0,81	0,40	0,60	0,39	0,51	0,18	0,73	0,67	1			
Cu-Vor.	0,31	-0,30	0,82	0,83	0,85	0,88	0,42	0,52	0,48	0,52	0,21	0,70	0,59	0,87	1		
Zn-Vor.	0,34	-0,31	0,83	0,83	0,84	0,86	0,45	0,43	0,50	0,52	0,27	0,72	0,59	0,78	0,89	1	
Cd-Vor.	0,42	-0,25	0,84	0,83	0,83	0,81	0,52	0,40	0,48	0,37	0,26	0,56	0,48	0,73	0,80	0,83	1

BS = Basensättigungsgrad Ca / (Ca + Al + Fe)
 HM = Humusmenge

Tab. 2.2.3: Korrelationsmatrix „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“

	TRD	SKEL	C/N	C/P	C	N	P	AKe	H	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	XSK	XNa	XSMg	XSCa	XSH	XSAI	XSAI	XSFc	XSMn	pH _{CaCl2}	pH _{KCl}
TRD	1																									
SKEL	-0,10	1																								
C/N	0,14	-0,04	1																							
C/P	0,17	-0,10	0,80	1																						
C	-0,34	0,33	0,25	0,21	1																					
N	-0,41	0,39	-0,21	-0,16	0,85	1																				
P	-0,39	0,44	-0,51	-0,56	0,42	0,71	1																			
AKe	-0,40	0,35	-0,28	-0,29	0,46	0,53	0,58	1																		
H	0,19	0,04	0,63	0,60	0,18	-0,15	-0,36	-0,15	1																	
Na	-0,22	0,15	-0,06	-0,15	0,09	0,10	0,18	0,28	0,03	1																
K	-0,29	0,30	-0,61	-0,54	0,06	0,36	0,60	0,46	-0,58	0,19	1															
Ca	0,04	0,25	-0,37	-0,27	-0,09	0,10	0,31	0,52	-0,33	-0,06	0,52	1														
Mg	0,04	0,13	-0,29	-0,22	-0,08	0,03	0,17	0,52	-0,26	-0,04	0,35	0,90	1													
Fe	-0,18	-0,07	0,31	0,23	0,53	0,30	0,05	0,33	0,45	0,13	-0,29	-0,25	-0,16	1												
Mn	-0,17	0,49	-0,45	-0,48	0,08	0,35	0,57	0,25	-0,53	0,22	0,63	0,27	0,10	-0,45	1											
XSK	0,02	0,02	-0,44	-0,36	-0,29	-0,04	0,11	-0,28	-0,53	0,00	0,67	0,14	0,01	-0,52	0,44	1										
XNa	0,02	-0,08	0,04	-0,02	-0,19	-0,19	-0,15	-0,22	0,03	0,81	-0,03	-0,21	-0,17	-0,08	0,09	0,18	1									
XSMg	0,11	0,10	-0,34	-0,27	-0,16	0,01	0,16	0,34	-0,34	-0,09	0,42	0,88	0,92	-0,28	0,16	0,21	-0,14	1								
XSCa	0,13	0,23	-0,40	-0,26	-0,18	0,05	0,24	0,22	-0,39	-0,13	0,56	0,87	0,67	-0,40	0,34	0,40	-0,17	0,81	1							
XSH	0,35	-0,16	0,61	0,65	-0,13	-0,42	-0,56	-0,50	0,84	-0,18	-0,67	-0,31	-0,25	0,15	-0,57	-0,36	0,07	-0,27	-0,29	1						
XSAI	-0,39	-0,11	-0,02	-0,16	0,28	0,25	0,16	0,18	-0,18	0,19	-0,10	-0,59	-0,48	0,29	-0,01	-0,22	0,00	-0,62	-0,73	-0,40	1					
XSFc	0,02	-0,21	0,48	0,42	0,28	0,00	-0,24	-0,04	0,61	-0,02	-0,54	-0,34	-0,22	0,86	-0,65	-0,56	-0,04	-0,30	-0,44	0,50	0,08	1				
XSMn	-0,04	0,31	-0,42	-0,44	-0,09	0,15	0,33	-0,06	-0,56	0,14	0,50	0,12	-0,01	-0,52	0,89	0,61	0,20	0,11	0,28	-0,51	-0,05	-0,68	1			
pH _{CaCl2}	-0,06	0,12	-0,60	-0,50	-0,15	0,12	0,33	0,44	-0,71	0,00	0,66	0,82	0,79	-0,42	0,44	0,41	-0,10	0,80	0,74	-0,66	-0,27	-0,59	0,41	1		
pH _{KCl}	-0,10	0,04	-0,55	-0,43	-0,14	0,10	0,27	0,42	-0,68	-0,03	0,58	0,78	0,79	-0,39	0,34	0,34	-0,13	0,77	0,67	-0,60	-0,23	-0,53	0,30	0,96	1	

TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skeletgehalt
 AKe = effektive Kationenaustauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

Tab. 2.2.4: Korrelationsmatrix „Mineralbodentfestphase in 30-60 cm Tiefe“

	TRD	SKEL	N	P	AKe	H	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	XSK	XNa	XSMg	XCa	XSH	XSAI	XFe	XSMn	pH _{Cac}	pH _{KCl}	
TRD	1																						
SKEL	-0,01	1																					
N	-0,30	0,21	1																				
P	-0,27	0,28	0,74	1																			
AKe	0,02	0,18	0,41	0,41	1																		
H	0,00	0,14	0,12	0,09	0,36	1																	
Na	-0,12	0,07	0,15	0,13	0,23	0,20	1																
K	-0,14	0,06	0,13	0,14	0,40	0,14	0,38	1															
Ca	0,12	0,01	0,30	0,28	0,85	0,16	0,09	0,32	1														
Mg	0,21	-0,05	0,21	0,20	0,83	0,24	0,14	0,34	0,89	1													
Fe	-0,07	0,18	-0,03	0,04	0,05	0,04	0,19	-0,04	-0,12	-0,12	1												
Mn	-0,21	0,29	0,40	0,47	0,35	0,21	0,42	0,20	0,26	0,12	-0,02	1											
XSK	-0,20	-0,06	-0,01	0,00	0,00	-0,04	0,29	0,86	0,01	0,03	-0,08	0,08	1										
XNa	-0,08	-0,10	-0,13	-0,16	-0,21	-0,02	0,77	0,08	-0,18	-0,15	0,22	0,12	0,21	1									
XSMg	0,22	0,00	0,17	0,20	0,60	0,24	0,20	0,38	0,65	0,84	-0,14	0,20	0,16	-0,10	1								
XCa	0,11	0,03	0,29	0,26	0,67	0,13	0,13	0,39	0,86	0,78	-0,16	0,32	0,16	-0,15	0,79	1							
XSH	-0,04	0,14	0,06	0,08	0,15	0,87	0,16	0,05	-0,01	0,06	0,10	0,21	-0,04	0,01	0,12	0,02	1						
XSAI	-0,11	-0,03	-0,25	-0,25	-0,65	-0,24	-0,30	-0,50	-0,78	-0,80	0,11	-0,36	-0,30	0,00	-0,91	-0,94	-0,14	1					
XFe	0,02	0,06	-0,16	-0,15	-0,10	-0,01	0,12	-0,09	-0,12	-0,13	0,81	-0,12	-0,07	0,29	-0,15	-0,14	0,12	0,09	1				
XSMn	-0,25	0,13	0,22	0,27	0,05	0,15	0,35	0,10	-0,04	-0,09	-0,08	0,80	0,16	0,17	0,05	0,06	0,21	-0,16	-0,18	1			
pH _{Cac2}	-0,02	-0,13	0,25	0,19	0,31	-0,30	0,01	0,21	0,59	0,55	-0,21	-0,07	0,15	-0,02	0,45	0,58	-0,34	-0,52	-0,17	-0,19	1		
pH _{KCl}	-0,02	-0,25	0,12	0,03	0,04	-0,50	-0,12	0,00	0,35	0,29	-0,13	-0,28	0,03	0,04	0,12	0,27	-0,49	-0,16	-0,07	-0,33	0,90	1	

TRD = Trockenraumdichte

SKEL = Skeletgehalt

AKe = effektive Kationenaustauschkapazität

XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

Tab. 2.2.5: Korrelationsmatrix „Nährstoffvorräte im Mineralboden bis 60 cm Tiefe“

	Ca	Mg	K	P	N
Ca	1				
Mg	0,89	1			
K	0,69	0,75	1		
P	0,00	0,16	0,16	1	
N	0,02	0,11	0,21	0,52	1

Tab. 2.2.6: Korrelationsmatrix „wäßriger Extrakt des Oberbodens“

	pH	DOC	Na	K	Mg	Ca	NH ₄ N	NO ₃ N	Cl	SO ₄ S	PO ₄ P	Al	Mn	Fe	Azid.	Ca/Al	Mg/Al
pH	1																
DOC	-0,33	1															
Na	0,21	0,05	1														
K	-0,27	0,55	0,07	1													
Mg	0,20	0,21	0,72	0,26	1												
Ca	0,26	0,34	0,52	0,37	0,69	1											
NH ₄ N	-0,40	0,62	-0,20	0,46	-0,11	-0,05	1										
NO ₃ N	0,00	0,15	0,11	0,29	0,20	0,43	0,04	1									
Cl	-0,06	0,19	0,67	0,20	0,48	0,35	0,11	0,13	1								
SO ₄ S	-0,06	0,06	0,71	0,09	0,61	0,39	-0,10	0,15	0,56	1							
PO ₄ P	-0,23	0,57	-0,28	0,41	-0,13	0,10	0,40	0,00	-0,18	-0,29	1						
Al	-0,50	0,55	0,04	0,28	-0,01	-0,08	0,55	-0,21	0,34	0,09	0,23	1					
Mn	-0,01	0,12	0,21	0,01	-0,12	0,11	0,00	0,42	0,24	0,63	-0,17	-0,17	1				
Fe	-0,43	0,63	-0,25	0,30	-0,17	-0,05	0,51	-0,19	-0,02	-0,30	0,59	0,59	-0,34	1			
Azid.	-0,58	0,21	-0,50	-0,12	-0,62	-0,64	0,42	-0,19	-0,14	-0,15	0,18	0,53	0,18	0,38	1		
Ca/Al	0,27	-0,17	0,23	-0,08	0,31	0,50	-0,21	0,25	0,06	0,21	-0,12	-0,37	0,04	-0,19	-0,53	1	
Mg/Al	0,28	-0,24	0,30	-0,07	0,54	0,42	-0,29	0,17	0,06	0,28	-0,19	-0,43	0,03	-0,26	-0,62	0,87	1

Azid. = Aziditätsgrad

Tab. 2.2.7: Korrelationsmatrix „wäßriger Extrakt des Unterbodens“

	pH	DOC	Na	K	Mg	Ca	NH ₄ N	NO ₃ N	Cl	SO ₄ S	PO ₄ P	Al	Mn	Fe	Azid.	Ca/Al	Mg/Al
pH	1																
DOC	0,05	1															
Na	0,44	0,02	1														
K	-0,27	0,15	0,00	1													
Mg	0,62	0,15	0,50	-0,03	1												
Ca	0,74	0,15	0,45	-0,06	0,61	1											
NH ₄ N	-0,38	0,28	-0,24	0,11	-0,22	-0,22	1										
NO ₃ N	0,07	0,20	0,18	-0,04	0,28	0,02	0,08	1									
Cl	0,11	0,08	0,61	-0,04	0,25	0,18	-0,12	0,26	1								
SO ₄ S	0,11	0,18	0,56	0,30	0,55	0,44	0,14	0,18	0,23	1							
PO ₄ P	0,04	0,03	0,04	-0,09	-0,02	-0,02	-0,06	-0,03	-0,07	-0,02	1						
Al	-0,10	0,48	-0,11	0,05	-0,10	-0,08	0,39	0,03	-0,07	0,13	0,07	1					
Mn	-0,25	0,52	-0,04	0,15	-0,04	-0,09	0,43	0,30	0,09	0,42	-0,06	0,28	1				
Fe	0,30	0,34	0,14	-0,07	0,06	0,01	-0,13	-0,05	0,00	-0,14	0,13	0,45	-0,14	1			
Azid.	-0,54	0,28	-0,44	0,05	-0,61	-0,47	0,52	-0,12	-0,31	-0,19	0,05	0,66	0,39	0,13	1		
Ca/Al	0,56	0,00	0,57	-0,04	0,48	0,77	-0,24	0,00	0,25	0,44	-0,03	-0,24	-0,12	-0,13	-0,44	1	
Mg/Al	0,36	-0,07	0,55	-0,06	0,70	0,44	-0,20	0,17	0,28	0,46	-0,05	-0,38	-0,11	-0,21	-0,60	0,65	1

Azid. = Aziditätsgrad

Tab. 2.2.8: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen der „Humusaufgabe“ (waagrecht) und den Variablen der „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“ (senkrecht)

	C/N	C/P	C	N	P	Si	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Al	Pb	Cu	Zn	Cd	pH _{H2O}	pH _{KCl}
TRD	0,17	0,24	0,00	-0,10	-0,29	0,14	-0,31	0,02	-0,19	0,06	-0,40	-0,41	-0,38	-0,27	-0,32	-0,23	-0,33	0,11
SKEL	-0,12	-0,22	0,19	0,29	0,45	-0,24	0,17	0,36	0,28	0,32	0,22	0,12	0,13	0,29	0,35	0,36	0,37	0,24
C/N	0,48	0,59	0,11	-0,14	-0,52	0,04	-0,43	-0,26	-0,36	-0,35	-0,38	-0,48	0,11	-0,23	-0,25	-0,12	-0,45	-0,49
C/P	0,45	0,63	0,05	-0,19	-0,56	0,10	-0,38	-0,31	-0,37	-0,40	-0,36	-0,41	0,03	-0,21	-0,23	-0,13	-0,45	-0,45
C	-0,05	-0,09	0,20	0,26	0,29	-0,23	0,05	0,04	0,05	-0,04	0,14	0,08	0,26	0,25	0,22	0,24	-0,03	-0,15
N	-0,27	-0,35	0,16	0,33	0,54	-0,25	0,26	0,20	0,21	0,15	0,30	0,29	0,17	0,35	0,36	0,34	0,21	0,10
P	-0,37	-0,52	0,10	0,33	0,77	-0,26	0,29	0,34	0,41	0,24	0,50	0,41	0,17	0,46	0,46	0,41	0,40	0,25
AKe	-0,11	-0,33	0,18	0,25	0,53	-0,32	0,23	0,30	0,43	0,01	0,41	0,38	0,32	0,49	0,43	0,28	0,33	0,21
H	0,45	0,64	0,28	0,07	-0,43	-0,11	-0,33	-0,32	-0,46	-0,46	-0,48	-0,54	0,14	-0,13	-0,33	-0,23	-0,56	-0,59
Na	0,03	-0,08	0,08	0,06	0,13	-0,15	0,05	0,01	0,06	-0,05	0,15	0,12	0,33	0,27	0,17	0,06	0,16	-0,12
K	-0,32	-0,51	-0,01	0,16	0,58	-0,18	0,36	0,58	0,50	0,46	0,46	0,41	-0,13	0,31	0,45	0,34	0,59	0,61
Ca	-0,17	-0,30	-0,10	-0,03	0,28	-0,01	0,14	0,61	0,58	0,14	0,26	0,20	-0,23	0,23	0,24	0,10	0,39	0,70
Mg	-0,13	-0,21	-0,11	-0,06	0,17	0,01	0,12	0,52	0,56	0,07	0,20	0,18	-0,18	0,15	0,12	-0,01	0,30	0,62
Fe	0,21	0,20	0,16	0,06	-0,10	-0,12	-0,20	-0,30	-0,27	-0,50	-0,12	-0,10	0,34	0,00	-0,14	-0,09	-0,27	-0,48
Mn	-0,28	-0,44	0,09	0,26	0,55	-0,19	0,31	0,38	0,23	0,74	0,27	0,32	-0,07	0,26	0,32	0,44	0,50	0,43
XSK	-0,29	-0,32	-0,22	-0,10	0,15	0,13	0,23	0,36	0,22	0,54	0,19	0,16	-0,42	-0,09	0,12	0,10	0,39	0,54
XSNa	0,12	0,12	-0,05	-0,12	-0,20	0,06	-0,13	-0,09	-0,16	-0,05	-0,13	-0,12	0,03	-0,08	-0,11	-0,14	-0,03	-0,15
XSMg	-0,19	-0,31	-0,21	-0,14	0,17	0,11	0,15	0,62	0,62	0,14	0,19	0,15	-0,32	0,08	0,09	-0,03	0,32	0,77
XSCa	-0,22	-0,35	-0,23	-0,15	0,22	0,13	0,18	0,60	0,55	0,23	0,26	0,17	-0,38	0,12	0,22	0,09	0,38	0,77
XSH	0,43	0,69	0,14	-0,07	-0,56	0,04	-0,41	-0,32	-0,47	-0,42	-0,55	-0,61	-0,08	-0,26	-0,44	-0,29	-0,61	-0,47
XSAI	-0,07	-0,12	0,13	0,18	0,17	-0,16	0,11	-0,39	-0,19	-0,03	0,16	0,27	0,46	0,10	0,13	0,11	0,03	-0,45
XSF	0,32	0,43	0,12	-0,03	-0,36	-0,02	-0,37	-0,38	-0,41	-0,62	-0,34	-0,35	0,20	-0,18	-0,33	-0,22	-0,48	-0,55
XSMn	-0,29	-0,41	-0,03	0,12	0,37	-0,03	0,25	0,30	0,14	0,80	0,17	0,25	-0,20	0,07	0,17	0,30	0,47	0,44
pH _{CaCl2}	-0,39	-0,55	-0,25	-0,08	0,39	0,09	0,33	0,55	0,68	0,36	0,46	0,48	-0,19	0,20	0,31	0,13	0,57	0,78
pH _{KCl}	-0,39	-0,53	-0,30	-0,15	0,32	0,14	0,31	0,45	0,67	0,25	0,48	0,51	-0,14	0,23	0,27	0,07	0,50	0,69

Tab. 2.2.8: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen der „Humusaufgabe“ (waagrecht) und den Variablen der „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“ (senkrecht) (Fortsetzung)

	pH _{CaCl2}	BS	HM	C-V	N-V	P-V	Si-V	K-V	Ca-V	Mg-V	Mn-V	Fe-V	Al-V	Pb-V	Cu-V	Zn-V	Cd-V
TRD	0,04	0,21	-0,02	-0,02	-0,04	-0,20	0,06	-0,28	-0,05	-0,20	-0,12	-0,35	-0,38	-0,24	-0,15	-0,16	-0,10
SKEL	0,21	0,20	-0,20	-0,13	-0,12	-0,05	-0,23	0,06	0,13	0,13	0,24	0,04	0,00	0,02	-0,02	-0,04	-0,01
C/N	-0,45	0,05	0,51	0,49	0,44	0,28	0,38	-0,08	0,30	0,07	-0,11	0,07	-0,03	0,33	0,35	0,38	0,45
C/P	-0,42	-0,01	0,53	0,51	0,46	0,27	0,40	-0,09	0,21	-0,02	-0,18	0,05	-0,04	0,28	0,37	0,42	0,50
C	-0,08	-0,04	0,11	0,17	0,21	0,29	-0,04	0,12	0,15	0,14	0,02	0,23	0,20	0,23	0,22	0,20	0,19
N	0,14	-0,02	-0,13	-0,07	-0,02	0,13	-0,21	0,12	0,02	0,10	0,08	0,16	0,18	0,05	0,03	0,01	-0,02
P	0,24	0,03	-0,35	-0,29	-0,25	-0,07	-0,35	0,07	-0,08	0,05	0,06	0,07	0,10	-0,10	-0,14	-0,19	-0,22
AKe	0,26	-0,04	-0,11	-0,02	0,00	0,18	-0,27	0,14	0,05	0,21	0,04	0,28	0,27	0,19	0,15	0,12	0,02
H	-0,50	0,07	0,58	0,65	0,64	0,44	0,30	0,05	0,30	-0,03	-0,27	-0,01	-0,10	0,41	0,46	0,41	0,45
Na	-0,09	-0,10	0,10	0,12	0,13	0,20	-0,02	0,12	0,11	0,16	0,02	0,25	0,21	0,30	0,27	0,22	0,06
K	0,60	0,16	-0,50	-0,47	-0,47	-0,34	-0,40	-0,06	-0,09	0,00	0,13	-0,04	-0,06	-0,31	-0,33	-0,31	-0,36
Ca	0,65	0,31	-0,31	-0,30	-0,30	-0,25	-0,22	-0,15	0,05	0,03	0,01	-0,12	-0,15	-0,27	-0,21	-0,20	-0,24
Mg	0,58	0,21	-0,27	-0,25	-0,26	-0,23	-0,20	-0,13	-0,01	0,01	-0,10	-0,13	-0,14	-0,21	-0,19	-0,21	-0,24
Fe	-0,38	-0,20	0,49	0,54	0,57	0,60	0,20	0,16	0,18	0,09	-0,29	0,31	0,33	0,51	0,45	0,41	0,44
Mn	0,39	0,15	-0,50	-0,47	-0,47	-0,34	-0,37	-0,02	-0,17	-0,06	0,46	-0,08	-0,05	-0,29	-0,31	-0,33	-0,31
XSK	0,49	0,14	-0,48	-0,53	-0,54	-0,52	-0,21	-0,18	-0,20	-0,16	0,15	-0,24	-0,25	-0,49	-0,49	-0,44	-0,42
XSNa	-0,16	0,01	0,17	0,12	0,10	0,06	0,16	-0,02	0,05	-0,01	-0,01	0,03	0,01	0,12	0,14	0,14	0,03
XSMg	0,73	0,31	-0,37	-0,38	-0,40	-0,36	-0,21	-0,20	0,03	0,02	-0,11	-0,24	-0,25	-0,34	-0,32	-0,34	-0,35
XSCa	0,70	0,33	-0,35	-0,39	-0,40	-0,35	-0,16	-0,18	0,04	0,01	0,07	-0,18	-0,23	-0,40	-0,31	-0,27	-0,30
XSH	-0,47	0,15	0,49	0,52	0,48	0,24	0,34	-0,09	0,20	-0,12	-0,27	-0,18	-0,26	0,18	0,30	0,25	0,35
XSAI	-0,39	-0,45	0,05	0,07	0,10	0,23	-0,05	0,27	-0,15	0,12	0,11	0,35	0,43	0,29	0,14	0,15	0,09
XSF _e	-0,50	-0,10	0,58	0,61	0,62	0,54	0,32	0,05	0,23	0,01	-0,37	0,15	0,14	0,44	0,44	0,40	0,48
XSMn	0,39	0,13	-0,52	-0,54	-0,54	-0,45	-0,30	-0,08	-0,24	-0,13	0,44	-0,16	-0,11	-0,38	-0,41	-0,41	-0,38
pH _{CaCl2}	0,71	0,10	-0,52	-0,55	-0,54	-0,40	-0,30	-0,08	-0,16	0,05	0,13	-0,06	-0,01	-0,36	-0,39	-0,36	-0,42
pH _{KCl}	0,61	0,01	-0,46	-0,51	-0,50	-0,35	-0,24	-0,04	-0,19	0,07	0,08	0,01	0,05	-0,31	-0,32	-0,32	-0,39

- TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe
 BS = Basensättigungsgrad Ca / (Ca + Al + Fe)
 HM = Humusmenge
 -V = -Vorrat

Tab. 2.2.9: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen der „Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe“ (waagrecht) und den Variablen der „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“ (senkrecht)

	TRD	SKEL	N	P	Ake	H	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	XSK	XNa	XSM _g	XSCa	XSH	XSAI	XFe	XSM _n	pH _{CaCl2}	pH _{KCl}
TRD	0,55	-0,08	-0,32	-0,29	-0,07	-0,08	-0,16	-0,14	0,08	0,09	0,00	-0,18	-0,15	-0,04	0,02	0,01	-0,13	0,02	0,04	-0,15	0,04	0,10
SKEL	-0,23	0,64	0,31	0,40	0,32	0,22	0,14	0,11	0,17	0,06	0,17	0,50	-0,05	-0,09	0,06	0,14	0,23	-0,14	0,00	0,31	-0,06	-0,21
C/N	0,06	-0,07	-0,53	-0,48	-0,34	-0,11	-0,10	-0,19	-0,29	-0,28	0,26	-0,29	-0,11	0,14	-0,32	-0,37	-0,08	0,37	0,30	-0,26	-0,24	-0,05
C/P	0,02	-0,05	-0,47	-0,48	-0,33	-0,20	-0,15	-0,17	-0,22	-0,24	0,31	-0,37	-0,09	0,11	-0,32	-0,31	-0,16	0,34	0,42	-0,40	-0,12	0,08
C	-0,30	0,24	0,04	0,18	0,01	-0,04	0,05	-0,06	-0,12	-0,15	0,06	0,04	-0,11	-0,02	-0,18	-0,20	-0,03	0,22	0,00	-0,08	-0,03	-0,02
N	-0,31	0,32	0,27	0,45	0,15	0,05	0,12	0,03	0,00	-0,05	-0,07	0,25	-0,06	-0,07	-0,03	-0,01	0,06	0,03	-0,14	0,08	0,01	-0,09
P	-0,28	0,34	0,57	0,69	0,33	0,12	0,18	0,09	0,20	0,12	-0,14	0,49	-0,06	-0,13	0,20	0,25	0,11	-0,23	-0,23	0,27	0,08	-0,11
Ake	-0,17	0,23	0,50	0,46	0,56	0,04	0,19	0,10	0,45	0,42	-0,10	0,23	-0,13	-0,12	0,32	0,36	-0,01	-0,32	-0,15	0,01	0,42	0,25
H	0,08	-0,02	-0,33	-0,29	-0,28	-0,15	-0,11	-0,29	-0,30	-0,31	0,44	-0,35	-0,24	0,14	-0,43	-0,44	-0,11	0,48	0,41	-0,39	-0,25	0,00
Na	-0,18	0,05	0,11	0,09	0,10	0,19	0,53	0,12	-0,03	-0,02	0,27	0,24	0,13	0,50	0,01	-0,03	0,21	-0,09	0,21	0,27	-0,09	-0,13
K	-0,19	0,27	0,58	0,52	0,52	0,27	0,16	0,41	0,43	0,39	-0,15	0,42	0,28	-0,19	0,42	0,51	0,21	-0,53	-0,21	0,29	0,24	-0,06
Ca	0,07	0,15	0,35	0,33	0,64	0,06	-0,01	0,18	0,80	0,71	-0,11	0,26	-0,05	-0,22	0,59	0,77	0,00	-0,68	-0,12	0,01	0,71	0,50
Mg	0,09	0,04	0,24	0,24	0,49	-0,01	-0,02	0,10	0,62	0,61	-0,08	0,06	-0,07	-0,17	0,50	0,59	-0,04	-0,53	-0,10	-0,09	0,76	0,62
Fe	-0,12	-0,05	-0,08	-0,06	-0,16	-0,19	-0,01	-0,17	-0,21	-0,21	0,11	-0,23	-0,14	0,08	-0,24	-0,27	-0,18	0,30	0,10	-0,26	-0,04	0,09
Mn	-0,13	0,41	0,40	0,48	0,32	0,41	0,21	0,23	0,18	0,18	-0,11	0,63	0,11	-0,09	0,31	0,26	0,40	-0,35	-0,19	0,54	-0,06	-0,33
XSK	-0,02	0,12	0,15	0,14	0,10	0,22	0,04	0,41	0,09	0,08	-0,11	0,24	0,50	-0,10	0,21	0,27	0,19	-0,33	-0,15	0,32	-0,02	-0,22
XNa	-0,04	-0,10	-0,16	-0,17	-0,15	0,13	0,42	0,09	-0,17	-0,16	0,28	0,11	0,23	0,58	-0,09	-0,11	0,17	-0,01	0,28	0,24	-0,17	-0,14
XSMg	0,14	0,07	0,22	0,22	0,46	0,03	-0,06	0,12	0,60	0,59	-0,09	0,08	-0,03	-0,20	0,52	0,62	-0,01	-0,57	-0,14	-0,06	0,68	0,52
XSCa	0,12	0,19	0,25	0,22	0,51	0,11	-0,04	0,24	0,68	0,60	-0,12	0,26	0,07	-0,23	0,57	0,75	0,06	-0,68	-0,13	0,06	0,51	0,28
XSH	0,17	-0,14	-0,44	-0,42	-0,40	-0,21	-0,23	-0,32	-0,29	-0,31	0,39	-0,42	-0,22	0,12	-0,41	-0,40	-0,16	0,45	0,42	-0,42	-0,21	0,08
XSAI	-0,23	-0,10	0,08	0,07	-0,18	-0,02	0,18	-0,02	-0,39	-0,33	-0,19	0,02	0,05	0,10	-0,25	-0,41	-0,01	0,34	-0,17	0,17	-0,32	-0,29
XFe	-0,03	-0,20	-0,28	-0,24	-0,33	-0,25	-0,13	-0,28	-0,29	-0,29	0,22	-0,37	-0,20	0,12	-0,34	-0,37	-0,21	0,40	0,24	-0,37	-0,10	0,12
XSMn	-0,06	0,31	0,21	0,28	0,18	0,40	0,17	0,25	0,06	0,08	-0,13	0,50	0,22	-0,04	0,24	0,19	0,39	-0,29	-0,21	0,56	-0,14	-0,37
pH _{CaCl2}	-0,01	0,10	0,41	0,35	0,53	0,11	0,08	0,30	0,61	0,59	-0,28	0,29	0,17	-0,19	0,58	0,68	0,07	-0,66	-0,29	0,20	0,68	0,41
pH _{KCl}	-0,03	-0,01	0,40	0,31	0,45	0,03	0,05	0,26	0,56	0,54	-0,30	0,21	0,16	-0,18	0,53	0,63	0,01	-0,60	-0,29	0,15	0,72	0,51

TRD = Trockenraumdichte

SKEL = Skelettgehalt

Ake = effektive Austauschkapazität

XS-Kation = Anteil des Kations an der Ake

Tab. 2.2.10: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen der „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“ (senkrecht) und den Variablen des „wäßrigen Extrakts des Oberbodens“ waagrecht

	pH	DOC	Na	K	Mg	Ca	NH ₄ N	NO ₃ N	Cl	SO ₄ S	PO ₄ P	Al	Mn	Fe	Azid	Ca/Cl	Mg/Al
TRD	-0,20	0,30	-0,27	0,44	-0,12	-0,01	0,31	-0,07	-0,19	-0,33	0,46	0,23	-0,25	0,41	0,12	-0,21	-0,21
SKEL	0,22	-0,19	0,19	-0,13	0,17	0,12	-0,43	0,01	0,03	0,29	-0,09	-0,29	0,29	-0,27	-0,15	0,06	0,17
C/N	-0,29	-0,11	-0,22	-0,18	-0,41	-0,36	0,08	-0,37	-0,17	-0,23	0,06	0,28	-0,27	0,26	0,38	-0,09	-0,16
C/P	-0,29	-0,10	-0,26	-0,15	-0,36	-0,28	0,13	-0,34	-0,15	-0,26	0,05	0,28	-0,37	0,23	0,31	-0,05	-0,14
N	0,35	-0,47	0,25	-0,35	0,24	0,11	-0,51	0,01	0,10	0,24	-0,39	-0,39	0,04	-0,48	-0,39	0,23	0,30
P	0,41	-0,26	0,31	-0,21	0,38	0,22	-0,50	0,18	0,09	0,28	-0,29	-0,44	0,23	-0,47	-0,43	0,17	0,30
AKe	0,28	-0,33	0,55	-0,29	0,36	0,18	-0,58	-0,06	0,23	0,43	-0,41	-0,28	0,17	-0,48	-0,39	0,12	0,22
H	-0,36	-0,09	-0,24	-0,22	-0,43	-0,50	0,10	-0,36	-0,14	-0,15	0,09	0,45	-0,20	0,34	0,58	-0,33	-0,36
Na	-0,01	-0,02	0,17	-0,13	0,03	0,01	-0,04	0,03	0,04	0,30	-0,18	-0,13	0,37	-0,15	0,00	0,03	0,03
K	0,53	-0,05	0,35	0,18	0,53	0,53	-0,36	0,21	0,10	0,29	-0,18	-0,44	0,18	-0,35	-0,62	0,34	0,45
Ca	0,46	0,14	0,40	0,12	0,58	0,66	-0,29	0,06	0,07	0,18	-0,02	-0,21	-0,10	-0,13	-0,60	0,23	0,28
Mg	0,45	0,09	0,37	0,05	0,59	0,53	-0,34	0,03	0,04	0,15	-0,09	-0,27	-0,08	-0,19	-0,62	0,19	0,30
Fe	-0,02	-0,30	0,10	-0,32	-0,16	-0,33	-0,18	-0,26	0,09	0,06	-0,24	0,11	-0,13	-0,08	0,11	-0,20	-0,20
Mn	0,20	0,04	0,07	0,12	0,25	0,31	-0,19	0,34	0,01	0,22	-0,11	-0,41	0,44	-0,27	-0,25	0,14	0,24
C	0,22	-0,58	0,13	-0,47	0,02	-0,08	-0,49	-0,16	-0,02	0,14	-0,40	-0,30	-0,05	-0,43	-0,20	0,23	0,25
XSK	0,33	0,22	-0,07	0,47	0,22	0,41	0,10	0,32	-0,05	-0,04	0,16	-0,27	0,10	0,00	-0,34	0,23	0,23
XNa	-0,20	0,18	-0,10	0,06	-0,14	-0,05	0,27	0,08	-0,09	0,05	0,11	0,01	0,22	0,14	0,16	-0,03	-0,08
XSMg	0,36	0,20	0,08	0,15	0,39	0,46	-0,11	0,09	-0,08	-0,07	0,12	-0,22	-0,14	-0,03	-0,48	0,14	0,18
XSCa	0,41	0,25	0,14	0,21	0,42	0,63	-0,12	0,12	-0,03	0,01	0,17	-0,17	-0,11	0,02	-0,50	0,20	0,20
XSH	-0,46	0,13	-0,42	-0,07	-0,48	-0,47	0,36	-0,36	-0,23	-0,37	0,32	0,52	-0,37	0,61	0,63	-0,30	-0,36
XSAI	0,00	-0,36	0,28	-0,19	0,03	-0,19	-0,23	0,10	0,25	0,29	-0,42	-0,20	0,31	-0,51	-0,07	0,09	0,12
XSF _e	-0,15	-0,18	-0,06	-0,28	-0,28	-0,44	0,05	-0,39	0,03	-0,08	-0,12	0,32	-0,27	0,17	0,30	-0,27	-0,29
XSMn	0,14	0,17	-0,08	0,28	0,13	0,32	0,01	0,44	-0,06	0,08	0,05	-0,34	0,41	-0,15	-0,16	0,10	0,13
pH _{CaCl} ₂	0,44	0,07	0,25	0,21	0,50	0,64	-0,20	0,40	0,13	0,18	-0,09	-0,46	0,20	-0,33	-0,65	0,46	0,47
pH _{KCl}	0,43	0,00	0,25	0,15	0,45	0,58	-0,11	0,38	0,17	0,17	-0,12	-0,41	0,15	-0,35	-0,61	0,51	0,49

Azid. = Aziditätsgrad
 TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

Tab. 2.2.11: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen der „Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe“ (waagrecht) und den Variablen des „wäßrigen Extrakts des Unterbodens“ (senkrecht)

	TRD	SKEL	N	P	AKe	H	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn
pH	0,14	-0,11	0,21	0,19	0,61	0,08	0,07	0,54	0,66	0,65	-0,12	0,37
DOC	0,02	0,29	0,01	0,04	0,19	0,25	0,23	0,17	0,09	0,06	0,12	0,36
Na	-0,18	-0,13	0,30	0,21	0,60	0,35	0,22	0,69	0,51	0,44	-0,12	0,25
K	0,10	0,09	-0,32	-0,25	-0,07	0,09	-0,06	0,04	-0,12	-0,16	0,05	-0,11
Mg	0,10	0,08	0,17	0,28	0,60	0,32	0,10	0,56	0,54	0,59	-0,07	0,33
Ca	0,14	-0,04	0,03	0,05	0,52	0,19	0,04	0,42	0,47	0,44	-0,04	0,40
NH ₄ N	0,01	0,18	-0,17	-0,16	-0,22	-0,08	0,13	-0,33	-0,23	-0,27	0,25	-0,05
NO ₃ N	-0,26	-0,04	0,19	0,25	0,08	0,16	0,15	0,14	0,04	0,03	0,00	0,30
Cl	-0,24	0,02	0,25	0,24	0,29	0,14	0,25	0,34	0,16	0,14	-0,10	0,25
SO ₄ S	-0,10	0,08	0,06	0,15	0,35	0,31	0,17	0,39	0,24	0,19	0,07	0,27
PO ₄ P	0,16	0,08	0,11	0,18	0,11	0,03	-0,06	0,08	0,15	0,07	-0,11	0,01
Al	-0,04	0,16	0,03	0,02	0,00	-0,07	-0,06	-0,03	-0,02	-0,02	0,08	-0,01
Mn	-0,25	0,19	0,09	0,19	-0,06	0,05	0,34	-0,01	-0,16	-0,17	0,10	0,37
Fe	0,02	-0,09	0,31	0,18	0,18	0,16	0,05	0,30	0,20	0,22	-0,01	0,12
Azid.	-0,07	0,09	-0,18	-0,18	-0,39	-0,18	-0,04	-0,42	-0,36	-0,37	0,11	-0,23
CaAl	-0,01	-0,12	0,00	-0,01	0,46	0,23	0,08	0,40	0,42	0,34	-0,09	0,32
Mg/Al	-0,06	0,01	0,09	0,13	0,45	0,31	0,04	0,41	0,35	0,32	-0,14	0,26

(Fortsetzung)

	pH _{CaCl2}	pH _{KCl}	XSK	XSNa	XSMg	XSCa	XSH	XSAI	XSFe	XSMn
pH	0,40	0,18	0,15	-0,20	0,62	0,71	-0,06	-0,70	-0,16	0,24
DOC	-0,20	-0,28	0,00	-0,02	0,04	0,07	0,23	-0,10	0,07	0,28
Na	0,00	-0,16	0,23	-0,12	0,30	0,41	0,10	-0,40	-0,11	0,14
K	-0,33	-0,22	0,15	0,03	-0,28	-0,24	0,13	0,25	0,07	-0,09
Mg	0,18	-0,06	0,13	-0,24	0,58	0,55	0,25	-0,61	-0,02	0,22
Ca	0,03	-0,10	-0,01	-0,17	0,31	0,43	0,09	-0,40	0,03	0,19
NH ₄ N	-0,15	0,00	-0,23	0,30	-0,38	-0,36	-0,01	0,36	0,31	0,01
NO ₃ N	-0,03	-0,07	0,14	0,00	0,03	0,02	0,18	-0,07	-0,01	0,36
Cl	-0,04	-0,12	0,07	-0,05	0,12	0,16	0,08	-0,16	-0,11	0,17
SO ₄ S	-0,15	-0,22	0,08	-0,03	0,09	0,16	0,28	-0,18	0,19	0,18
PO ₄ P	0,05	-0,02	-0,03	-0,16	0,07	0,21	-0,02	-0,13	-0,11	-0,02
Al	-0,02	0,02	-0,01	-0,10	-0,06	-0,07	0,00	0,07	0,10	0,02
Mn	-0,18	-0,13	0,02	0,25	-0,20	-0,22	0,07	0,16	0,06	0,44
Fe	0,17	0,06	0,26	-0,11	0,24	0,24	0,22	-0,28	-0,06	0,11
Azid.	-0,14	0,05	-0,14	0,19	-0,44	-0,46	-0,12	0,48	0,10	-0,10
CaAl	-0,04	-0,16	0,00	-0,13	0,22	0,36	0,02	-0,31	-0,08	0,18
Mg/Al	-0,03	-0,20	0,03	-0,22	0,27	0,31	0,13	-0,30	-0,15	0,17

Azid. = Aziditätsgrad
 TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

Tab. 2.2.12: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen der „Humusaufgabe“ (waagrecht) und den Variablen der „Nadelspiegelwerte“ (senkrecht)

	C/N	C/P	C	N	P	Si	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Al	Pb	Cu	Zn	Cd	pH _{H2O}	pH _{KCl}
N	-0,25	-0,08	-0,15	-0,06	-0,09	0,11	-0,17	-0,29	-0,02	-0,33	0,11	0,15	0,32	-0,03	-0,12	-0,12	-0,10	-0,29
P	-0,11	-0,30	-0,08	-0,05	0,30	0,01	-0,08	0,15	0,22	-0,05	0,20	-0,05	0,10	0,22	0,10	0,10	0,14	0,15
K	-0,44	-0,28	-0,40	-0,27	-0,07	0,34	-0,10	0,03	0,07	-0,05	0,08	0,02	-0,24	-0,28	-0,09	0,01	0,12	0,19
Ca	-0,24	-0,37	-0,27	-0,21	0,27	0,29	0,29	0,15	0,36	0,58	0,41	0,24	-0,24	0,15	0,51	0,40	0,31	0,58
Mg	0,09	0,08	0,02	-0,03	0,12	-0,06	0,06	0,19	0,30	0,30	0,23	0,10	-0,15	0,25	0,40	0,28	0,34	0,39
Mn	0,24	0,08	0,12	0,01	-0,09	-0,09	0,24	-0,12	-0,13	0,37	-0,06	0,06	0,26	0,05	-0,17	-0,08	0,11	-0,16
S	-0,19	-0,03	-0,30	-0,26	-0,24	0,34	-0,26	-0,25	-0,17	-0,55	-0,08	-0,19	0,14	-0,04	-0,22	-0,26	-0,15	-0,40
Cl	0,10	-0,07	-0,04	-0,12	-0,09	0,10	-0,02	-0,03	-0,07	0,24	-0,01	0,09	0,10	0,03	0,00	-0,01	0,04	-0,02
Al	-0,13	-0,27	-0,09	-0,05	0,17	-0,01	0,25	-0,08	0,06	-0,09	0,19	0,23	0,05	0,10	0,02	-0,07	0,16	0,03
Fe	-0,22	-0,21	-0,03	0,08	0,31	-0,09	0,21	0,12	0,30	-0,03	0,41	0,22	0,30	0,31	0,39	0,21	0,36	0,19
Asche	-0,19	-0,42	-0,37	-0,37	0,18	0,38	0,17	0,05	0,28	0,45	0,37	0,22	-0,24	0,10	0,34	0,24	0,35	0,45
Si	0,22	0,07	-0,18	-0,31	-0,24	0,21	-0,33	-0,12	0,02	-0,17	0,04	-0,03	0,03	-0,02	0,09	-0,23	0,13	-0,13
Na	-0,05	-0,06	-0,10	-0,12	-0,07	0,09	0,24	0,04	0,19	0,20	0,37	0,32	0,31	0,15	0,26	0,24	0,16	0,04
Cd	-0,30	-0,37	-0,32	-0,26	0,13	0,26	0,35	0,18	0,51	0,49	0,64	0,52	0,19	0,19	0,48	0,53	0,40	0,29
Cu	-0,15	-0,07	-0,26	-0,25	-0,16	0,16	0,03	-0,19	0,02	-0,21	0,19	0,24	0,20	0,03	-0,04	0,07	0,19	-0,13
Zn	-0,34	-0,18	-0,25	-0,14	0,16	0,16	0,18	0,15	0,39	0,00	0,36	0,11	-0,18	0,13	0,44	0,25	0,32	0,42
Pb	-0,12	-0,02	0,00	0,05	0,03	-0,08	0,29	0,06	0,18	-0,05	0,25	0,21	0,58	0,31	0,30	0,21	0,35	0,06

	pH _{CaCl2}	Basensättigung	Humusmenge	C-V	N-V	P-V	Si-V	K-V	Ca-V	Mg-V	Mn-V	Fe-V	Al-V	Pb-V	Cu-V	Zn-V	Cd-V
N	-0,33	-0,33	0,26	0,19	0,24	0,21	0,20	0,02	-0,06	0,06	-0,22	0,24	0,23	0,32	0,19	0,19	0,15
P	0,06	0,12	-0,03	-0,03	-0,04	0,00	-0,02	-0,11	0,05	0,06	-0,12	-0,02	-0,11	0,04	0,05	-0,02	-0,05
K	0,11	-0,01	-0,16	-0,27	-0,24	-0,21	0,07	-0,20	-0,09	-0,05	-0,12	-0,08	-0,10	-0,26	-0,28	-0,21	-0,11
Ca	0,42	-0,08	-0,31	-0,39	-0,39	-0,23	0,02	0,05	-0,06	0,14	0,52	0,08	-0,05	-0,36	-0,20	-0,01	-0,05
Mg	0,27	0,00	-0,26	-0,25	-0,29	-0,26	-0,14	-0,16	-0,05	0,01	0,22	-0,11	-0,18	-0,28	-0,16	-0,10	-0,11
Mn	-0,08	-0,10	0,05	0,11	0,05	0,03	-0,09	0,30	0,13	0,06	0,52	0,06	0,14	0,14	0,11	0,01	0,04
S	-0,38	-0,16	0,26	0,14	0,16	0,12	0,36	-0,16	-0,08	-0,08	-0,42	0,06	-0,01	0,21	0,19	0,14	0,10
Cl	-0,03	-0,07	0,04	0,01	-0,01	0,04	0,11	0,07	0,10	0,04	0,30	0,11	0,10	0,09	0,10	0,13	0,02
Al	0,03	-0,13	0,04	0,06	0,07	0,15	-0,07	0,23	0,02	0,06	-0,01	0,15	0,17	0,06	0,10	0,04	0,01
Fe	0,11	-0,12	-0,04	0,01	0,04	0,08	-0,16	0,15	0,06	0,11	0,00	0,21	0,08	0,18	0,12	0,17	0,05
Asche	0,30	-0,16	-0,19	-0,30	-0,32	-0,13	0,10	-0,01	-0,03	0,14	0,48	0,13	0,02	-0,31	-0,11	0,02	-0,02
Si	-0,19	-0,14	0,28	0,19	0,14	0,15	0,30	-0,23	0,09	0,19	-0,03	0,26	0,15	0,16	0,23	0,36	0,09
Na	-0,03	-0,19	0,06	0,02	0,03	0,08	0,06	0,32	0,18	0,29	0,37	0,46	0,33	0,22	0,15	0,23	0,22
Cd	0,22	-0,17	-0,22	-0,31	-0,30	-0,22	0,02	0,26	0,12	0,34	0,51	0,33	0,22	-0,09	-0,11	0,08	0,10
Cu	-0,23	-0,32	-0,04	-0,10	-0,09	-0,08	0,00	0,01	-0,22	-0,05	-0,23	0,14	0,15	0,09	0,01	-0,08	0,01
Zn	0,32	-0,06	-0,26	-0,30	-0,27	-0,22	-0,07	-0,09	-0,09	0,05	-0,05	-0,05	-0,19	-0,29	-0,23	-0,05	-0,11
Pb	0,05	-0,10	-0,06	-0,01	0,00	-0,02	-0,18	0,26	0,09	0,15	0,00	0,18	0,09	0,33	0,15	0,17	0,10

-V = -Vorrat

Tab. 2.2.13: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen der „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“ (senkrecht) und den Variablen der „Nadelspiegelwerte“ (waagrecht)

	N	P	K	Ca	Mg	Mn	S	Cl	Al	Fe	Asche	Si	Na	Cd	Cu	Zn	Pb
TRD	-0,19	-0,03	0,07	0,07	0,09	0,12	-0,19	0,18	-0,38	-0,33	0,08	-0,05	-0,01	-0,16	-0,08	-0,04	-0,24
SKEL	-0,04	0,07	0,02	0,15	-0,05	-0,05	-0,25	-0,08	-0,06	0,44	0,01	-0,19	0,27	0,12	0,00	0,13	0,42
C/N	0,15	0,11	0,03	-0,31	-0,19	-0,28	0,43	-0,09	-0,31	0,01	-0,31	0,31	0,05	-0,38	-0,06	-0,16	0,15
C/P	0,21	-0,15	0,06	-0,28	-0,23	-0,45	0,51	-0,09	-0,21	0,01	-0,32	0,28	0,03	-0,38	-0,02	-0,02	0,17
C	0,21	0,13	0,00	-0,20	-0,26	-0,35	-0,04	-0,29	-0,01	0,23	-0,35	-0,19	0,09	-0,19	-0,04	-0,02	0,17
N	0,13	0,12	0,00	0,01	-0,07	-0,23	-0,27	-0,24	0,18	0,27	-0,12	-0,34	0,04	0,02	-0,03	0,11	0,08
P	0,02	0,28	-0,07	0,20	0,18	-0,02	-0,27	-0,10	0,05	0,24	0,12	-0,23	0,03	0,21	-0,08	0,12	0,02
AKe	0,07	0,11	-0,21	0,07	0,01	-0,03	-0,20	-0,22	0,18	0,22	-0,05	-0,09	0,04	0,02	0,04	0,00	0,09
H	0,17	-0,01	-0,32	-0,46	-0,42	-0,09	0,31	0,08	-0,10	0,11	-0,49	0,11	0,05	-0,44	-0,05	-0,36	0,22
Na	0,22	0,15	-0,19	-0,16	-0,22	0,20	0,03	0,00	0,16	0,30	-0,13	0,07	0,21	0,27	0,31	-0,03	0,35
K	-0,42	0,19	0,14	0,42	0,25	-0,09	-0,45	-0,21	0,22	0,30	0,30	-0,14	0,20	0,46	-0,01	0,30	0,07
Ca	-0,50	0,15	0,10	0,68	0,44	-0,17	-0,42	-0,10	-0,10	0,11	0,47	0,01	0,10	0,25	-0,33	0,30	-0,03
Mg	-0,35	0,36	0,05	0,49	0,44	-0,18	-0,39	-0,20	-0,02	0,18	0,32	-0,08	0,03	0,22	-0,17	0,35	0,02
Fe	0,36	-0,14	-0,10	-0,46	-0,46	-0,21	0,28	-0,19	0,00	-0,08	-0,40	0,05	-0,15	-0,40	0,10	-0,15	-0,10
Mn	-0,36	-0,11	0,02	0,44	0,13	0,30	-0,51	0,09	-0,05	0,02	0,31	-0,36	0,32	0,48	-0,07	0,05	0,03
XSK	-0,42	0,07	0,31	0,39	0,20	-0,05	-0,29	-0,09	0,09	0,18	0,37	-0,06	0,20	0,56	0,04	0,40	0,03
XSNa	0,17	0,10	-0,08	-0,17	-0,22	0,17	0,09	0,06	0,10	0,25	-0,09	0,14	0,23	0,36	0,32	0,02	0,36
XSMg	-0,40	0,30	0,17	0,51	0,42	-0,18	-0,38	-0,11	-0,01	0,13	0,36	-0,18	0,04	0,25	-0,19	0,43	0,00
XSCa	-0,45	0,05	0,20	0,65	0,36	-0,13	-0,39	0,00	-0,10	0,06	0,48	-0,10	0,12	0,30	-0,31	0,34	-0,07
XSH	0,05	0,00	-0,19	-0,38	-0,28	-0,15	0,35	0,07	-0,19	-0,05	-0,40	0,15	-0,05	-0,44	-0,09	-0,28	0,07
XSAI	0,40	-0,01	-0,04	-0,25	-0,02	0,19	0,11	-0,05	0,26	0,00	-0,10	0,02	-0,13	0,01	0,30	-0,08	-0,01
XSF	0,28	-0,15	-0,11	-0,50	-0,43	-0,20	0,35	-0,17	-0,11	-0,17	-0,41	0,15	-0,19	-0,50	0,05	-0,19	-0,13
XSMn	-0,35	-0,13	0,12	0,43	0,10	0,28	-0,48	0,15	-0,10	-0,04	0,34	-0,32	0,31	0,53	-0,06	0,08	-0,01
pH _{CaCl2}	-0,26	0,10	0,31	0,57	0,41	0,03	-0,44	-0,05	0,17	0,12	0,52	-0,23	0,09	0,59	0,04	0,44	-0,06
pH _{KCl}	-0,18	0,07	0,30	0,49	0,44	-0,05	-0,27	-0,08	0,15	0,04	0,47	-0,16	-0,01	0,54	0,12	0,46	-0,09

TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

Tab. 2.2.14: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen der „Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe“ (senkrecht) und den Variablen der „Nadelspiegelwerte“ (waagrecht)

	N	P	K	Ca	Mg	Mn	S	Cl	Al	Fe	Asche	Si	Na	Cd	Cu	Zn	Pb
TRD	-0,27	0,13	0,12	0,23	0,28	-0,07	0,03	0,14	-0,25	-0,38	0,22	0,02	-0,32	-0,17	-0,12	0,14	-0,41
SKEL	-0,12	-0,12	-0,09	0,25	-0,03	0,15	-0,36	-0,07	-0,08	0,20	0,02	-0,39	0,17	0,06	-0,03	0,15	0,20
N	0,07	-0,02	-0,21	-0,07	-0,05	0,16	-0,45	0,12	0,26	0,19	-0,08	-0,47	0,15	0,05	0,20	-0,05	0,13
P	0,08	0,11	-0,20	-0,09	-0,14	0,17	-0,37	-0,03	0,01	0,02	-0,15	-0,31	0,13	0,04	-0,04	-0,17	0,03
AKe	-0,26	-0,10	-0,15	0,35	0,45	0,03	-0,38	-0,03	0,00	0,12	0,28	0,21	0,25	0,24	0,00	0,17	0,16
H	-0,37	-0,15	-0,05	0,14	0,15	0,13	-0,41	-0,03	-0,18	-0,05	0,03	-0,09	0,19	0,16	-0,13	-0,01	0,03
Na	0,18	0,05	-0,23	0,07	0,23	0,28	-0,15	0,18	0,01	0,13	0,06	0,12	0,25	0,35	0,23	0,05	0,13
K	0,03	-0,13	0,13	0,18	0,17	0,00	-0,11	0,09	-0,06	0,18	0,24	0,27	0,59	0,62	0,19	0,19	0,24
Ca	-0,33	-0,09	0,04	0,49	0,45	-0,09	-0,23	-0,07	-0,14	-0,04	0,43	0,37	0,07	0,24	-0,08	0,30	-0,03
Mg	-0,33	-0,07	0,05	0,48	0,48	-0,08	-0,23	0,03	-0,19	-0,10	0,45	0,28	0,19	0,20	-0,08	0,20	-0,07
Fe	0,15	0,04	-0,29	-0,26	-0,29	-0,11	-0,02	0,07	-0,06	0,30	-0,36	0,00	0,24	-0,12	-0,03	-0,26	0,43
Mn	-0,03	0,02	-0,16	0,09	0,17	0,54	-0,31	0,14	0,08	0,12	0,12	-0,06	0,11	0,35	0,19	-0,05	0,18
XSK	0,05	-0,11	0,17	0,09	0,02	-0,02	-0,03	0,06	-0,06	0,20	0,17	0,22	0,48	0,65	0,17	0,23	0,21
XSNa	0,28	0,14	-0,20	-0,08	-0,01	0,18	0,08	0,16	0,00	0,19	-0,06	0,20	0,10	0,19	0,22	0,01	0,14
XSMg	-0,34	-0,10	0,07	0,51	0,39	-0,06	-0,23	0,13	-0,21	-0,16	0,52	0,12	0,25	0,31	-0,09	0,15	-0,14
XSCa	-0,38	-0,03	0,19	0,62	0,44	-0,14	-0,23	0,00	-0,10	-0,04	0,59	0,29	0,08	0,44	-0,02	0,42	-0,09
XSH	-0,24	-0,08	-0,04	-0,02	0,02	0,03	-0,18	0,12	-0,20	-0,09	-0,10	-0,10	0,16	0,06	-0,21	-0,22	0,04
XSAI	0,33	0,06	-0,13	-0,56	-0,41	0,05	0,25	-0,10	0,17	0,03	-0,56	-0,26	-0,26	-0,52	0,01	-0,30	0,04
XSFe	0,30	0,13	-0,28	-0,27	-0,33	-0,11	0,18	0,14	-0,03	0,37	-0,31	0,20	0,21	-0,16	0,00	-0,25	0,42
XSMn	-0,02	-0,01	-0,04	-0,01	-0,03	0,55	-0,26	0,10	0,03	0,06	0,05	-0,14	0,00	0,28	0,10	-0,13	0,12
pH _{CaCl2}	0,00	-0,03	0,33	0,27	-0,03	-0,29	0,04	-0,24	-0,07	-0,05	0,25	0,04	0,09	0,32	0,19	0,46	-0,19
pH _{KCl}	0,35	0,10	0,25	-0,20	-0,35	-0,34	0,45	-0,17	-0,05	-0,07	-0,17	0,08	-0,11	-0,10	0,20	0,17	-0,12

TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

Tab. 2.2.15: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen der „Nährstoffvorräte im Mineralboden“ (senkrecht) und den Variablen der „Nadelspiegelwerte“ (waagrecht)

	N	P	K	Ca	Mg	Mn	S	Cl	Al	Fe	Asche	Si	Na	Cd	Cu	Zn	Pb
Ca	-0,36	0,18	0,09	0,40	0,34	-0,22	-0,16	-0,12	-0,16	0,01	0,32	0,28	-0,02	0,08	-0,16	0,23	0,00
Mg	-0,34	0,26	0,06	0,29	0,38	-0,19	-0,21	-0,04	-0,16	-0,02	0,24	0,20	0,10	0,03	-0,12	0,06	0,01
K	-0,40	0,08	0,04	0,23	0,29	-0,05	-0,32	-0,09	0,03	0,10	0,24	0,22	0,11	0,38	-0,04	0,17	0,06
P	0,09	0,29	-0,10	-0,04	0,17	0,09	-0,26	0,09	0,09	0,00	0,09	-0,13	0,05	0,15	0,04	-0,09	-0,19
N	0,06	-0,11	-0,08	0,01	0,18	0,02	-0,24	0,22	0,26	-0,15	0,16	-0,19	-0,03	0,02	0,15	0,00	-0,24

Tab. 2.2.16: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen des „wäßrigen Extrakts des Oberbodens“ (senkrecht) und den Variablen der „Nadelspiegelwerte“ (waagrecht)

	N	P	K	CA	Mg	Mn	S	Cl	Al	Fe	Asche	Si	Na	Cd	Cu	Zn	Pb
pH	-0,47	0,24	0,18	0,38	0,11	-0,26	-0,17	-0,34	0,20	0,09	0,18	-0,22	-0,08	-0,08	0,01	0,27	-0,13
DOC	-0,04	-0,06	-0,21	0,07	0,27	0,33	0,01	0,50	-0,23	-0,15	0,30	0,21	0,12	0,16	-0,11	-0,28	0,03
Na	-0,23	0,02	-0,38	0,30	0,54	0,15	-0,32	0,21	0,04	0,07	0,32	0,30	0,19	0,25	-0,10	-0,01	-0,04
K	-0,26	-0,07	0,14	0,09	0,30	0,08	-0,29	0,19	-0,25	-0,24	0,16	0,06	-0,12	0,11	-0,15	0,00	-0,22
Mg	-0,22	0,08	-0,11	0,30	0,60	0,06	-0,48	0,17	-0,04	-0,07	0,29	-0,03	0,18	0,31	-0,23	0,03	-0,13
Ca	-0,37	-0,05	-0,05	0,55	0,43	0,02	-0,56	0,21	-0,13	-0,10	0,45	0,03	0,08	0,41	-0,37	0,08	-0,22
NH ₄ N	0,16	-0,07	0,02	-0,30	-0,06	0,08	0,30	0,40	-0,16	-0,22	-0,04	0,16	-0,08	-0,07	0,06	-0,29	-0,05
NO ₃ N	0,02	-0,22	-0,23	0,12	-0,06	0,17	-0,31	0,47	0,09	0,13	0,22	0,08	0,25	0,22	-0,11	-0,27	-0,09
Cl	0,06	-0,23	-0,36	0,02	0,29	0,26	-0,27	0,34	0,24	0,20	0,11	0,04	0,12	0,31	0,01	-0,11	0,09
SO ₄ S	-0,01	-0,12	-0,37	0,03	0,21	0,53	-0,33	0,25	0,02	0,14	0,05	0,08	0,34	0,44	-0,03	-0,17	0,17
PO ₄ P	-0,19	0,15	0,17	0,13	0,01	-0,05	-0,10	0,19	-0,28	-0,14	0,14	0,10	-0,15	-0,06	-0,27	-0,19	-0,10
Al	0,22	-0,07	-0,33	-0,21	0,13	0,20	0,31	0,24	-0,24	-0,14	-0,06	0,38	-0,11	-0,10	-0,13	-0,22	0,05
Mn	0,09	-0,18	-0,31	-0,12	-0,24	0,68	-0,24	0,22	0,11	0,27	-0,07	-0,13	0,36	0,39	0,19	-0,31	0,30
Fe	0,01	0,05	0,05	-0,04	0,18	-0,05	0,26	0,24	-0,19	-0,11	0,19	0,22	-0,06	-0,13	0,06	0,03	-0,07
Azid.	0,35	-0,14	-0,19	-0,50	-0,45	0,34	0,40	0,10	-0,11	0,03	-0,34	0,16	-0,01	-0,11	0,14	-0,33	0,26
Ca/Cl	-0,25	0,18	0,31	0,39	0,32	-0,21	-0,34	-0,10	0,32	0,21	0,30	-0,25	0,03	0,14	-0,05	0,29	-0,14
Mg/Al	-0,13	0,19	0,27	0,18	0,35	-0,18	-0,34	-0,14	0,24	0,12	0,10	-0,28	0,03	0,04	0,00	0,18	-0,14

Azid. = Aziditätsgrad

Tab. 2.2.17: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen des „wäßrigen Extrakts des Unterbodens“ (senkrecht) und den Variablen der „Nadelspiegelwerte“ (waagrecht)

	N	P	K	Ca	Mg	Mn	S	Cl	Al	Fe	Asche	Si	Na	Cd	Cu	Zn	Pb
pH	-0,32	0,20	0,07	0,56	0,51	-0,05	-0,17	-0,12	0,04	0,18	0,49	0,31	0,02	0,46	0,01	0,42	0,20
DOC	-0,21	-0,04	-0,02	0,12	0,06	0,37	-0,21	-0,08	-0,18	-0,01	0,13	0,20	0,30	0,06	-0,05	-0,16	0,16
Na	-0,27	0,04	-0,11	0,42	0,61	0,08	-0,31	-0,11	-0,02	0,17	0,35	0,37	0,06	0,31	-0,16	0,34	0,05
K	-0,07	-0,12	-0,12	-0,11	0,10	0,07	0,28	0,04	-0,13	-0,02	-0,14	0,34	-0,12	-0,06	-0,06	0,03	0,09
Mg	-0,44	0,08	0,05	0,62	0,59	0,23	-0,47	-0,02	0,11	0,12	0,51	0,05	0,29	0,48	-0,19	0,37	0,02
Ca	-0,17	0,13	0,16	0,37	0,39	0,14	-0,14	-0,05	0,14	0,09	0,35	0,24	-0,01	0,40	0,21	0,34	0,29
NH ₄ N	0,25	-0,08	0,01	-0,38	-0,39	0,20	0,09	-0,10	0,13	0,28	-0,37	-0,09	0,04	-0,35	0,13	-0,23	0,31
NO ₃ N	0,00	-0,25	-0,36	0,13	-0,07	0,53	-0,30	0,18	0,18	0,18	0,11	0,14	0,37	0,16	-0,22	-0,20	0,01
Cl	0,10	0,14	-0,24	0,07	0,46	0,33	-0,16	0,42	0,26	0,18	0,34	0,21	0,23	0,17	0,04	-0,06	0,07
SO ₄ S	-0,22	0,06	-0,09	0,28	0,40	0,47	-0,29	-0,12	-0,01	0,08	0,17	0,18	0,11	0,27	-0,01	0,19	0,13
PO ₄ P	0,16	-0,05	0,22	-0,15	-0,30	-0,18	-0,10	-0,22	-0,14	-0,04	-0,16	-0,08	0,00	-0,08	0,04	0,14	0,11
Al	0,17	0,07	-0,15	-0,11	0,09	-0,02	0,07	-0,24	-0,23	0,09	-0,18	-0,03	-0,03	0,04	-0,05	-0,01	0,02
Mn	0,14	-0,02	-0,15	-0,22	-0,17	0,61	-0,08	0,08	0,06	0,09	-0,12	-0,03	0,25	-0,05	0,19	-0,28	0,20
Fe	-0,08	0,04	-0,07	0,15	0,25	-0,15	0,11	0,01	-0,26	0,06	0,10	0,19	0,19	0,28	-0,23	0,01	0,10
Azid.	0,31	-0,12	-0,06	-0,46	-0,41	0,08	0,27	-0,19	-0,17	-0,02	-0,45	-0,11	0,01	-0,33	0,13	-0,31	0,12
Ca/Al	-0,11	0,11	0,21	0,33	0,32	0,15	-0,09	-0,01	0,18	0,05	0,34	0,20	-0,02	0,36	0,27	0,30	0,25
Mg/Al	-0,22	0,11	0,23	0,40	0,44	0,13	-0,29	0,02	0,29	0,09	0,40	0,02	0,02	0,23	-0,03	0,28	-0,02

Azid. = Aziditätsgrad

Tab. 2.2.18: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen der „Humusaufgabe“ und dem mittleren Nadelverlust (NV)

	C	N	C/N	C/P	P	Si	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Al
NV	0,39	0,23	0,48	0,47	-0,16	-0,31	-0,04	-0,12	-0,26	-0,11	-0,35	-0,27
	Pb	Cu	Zn	Cd	pH _{H2O}	pH _{KCl}	pH _{CaCl2}	Basen	Humus	C-Vor.	N-Vor.	P-Vor.
NV	0,16	0,12	-0,02	-0,03	-0,17	-0,13	-0,19	0,08	0,16	0,23	0,19	0,10
	Si-Vor.	K-Vor.	Ca-Vor.	Mg-Vor.	Mn-Vor.	Fe-Vor.	Al-Vor.	Pb-Vor.	Cu-Vor.	Zn-Vor.	Cd-Vor.	
NV	-0,02	0,04	-0,07	-0,11	-0,10	-0,13	-0,12	0,21	0,18	0,12	0,11	

Basen = Basensättigung
 Humus = Humusmenge
 -Vor = -Vorrat

Tab. 2.2.19: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen der „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“ und dem mittleren Nadelverlust (NV)

	TRD	SKEL	C/N	C/P	N	P	AKe	H	Na	K	Ca	Mg	Fe
NV	0,08	0,09	0,29	0,14	-0,07	-0,06	0,16	0,40	0,16	-0,15	0,00	0,05	-0,04
	Mn	C	XSK	XSNa	XSMg	XSCa	XSH	XSAI	XSFe	XSMn	pH _{CaCl2}	pH _{KCl}	
NV	0,00	0,11	-0,39	0,10	-0,11	-0,18	0,36	-0,10	0,04	-0,13	-0,41	-0,39	

TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

Tab. 2.2.20: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen der Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe“ und dem mittleren Nadelverlust (NV)

	TRD	SKEL	N	P	AKe	H	Na	K	Ca	Mg	Fe
NV	0,07	-0,06	-0,00	0,20	0,13	0,31	0,09	-0,25	-0,03	0,03	0,33
	Mn	XSK	XSNa	XSMg	XSCa	XSH	XSAI	XSFe	XSMn	pH _{CaCl2}	pH _{KCl}
NV	-0,00	-0,35	0,15	-0,16	-0,36	0,35	0,28	0,36	-0,10	-0,45	-0,22

TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

Tab. 2.2.21: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen der „Nährstoffvorräte im Mineralboden“ und dem mittleren Nadelverlust (NV)

	Ca	Mg	K	P	N
NV	0,19	0,29	0,07	0,03	-0,10

Tab. 2.2.22: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen des „wäßrigen Extrakts des Oberbodens“ und dem mittleren Nadelverlust (NV)

	pH	DOC	Na	K	Mg	Ca	NH ₄ N	Cl	SO ₄ S	PO ₄ P	Al	Mn	Fe	Azid.	Ca/Cl	Mg/Al
NV	-0,13	-0,02	0,04	-0,15	-0,01	-0,13	-0,08	-0,10	-0,03	0,06	0,20	-0,09	0,11	0,17	-0,29	-0,15

Azid. = Aziditätsgrad

Tab. 2.2.23: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen des „wäßrigen Extrakts des Unterbodens“ und dem mittleren Nadelverlust (NV)

	pH	DOC	Na	K	Mg	Ca	NH ₄ N	Cl	SO ₄ S	PO ₄ P	Al	Mn	Fe	Azid.	Ca/Al	Mg/Al
NV	-0,13	0,32	0,00	0,31	-0,09	-0,01	0,18	-0,01	0,15	0,10	0,00	0,18	0,06	0,19	-0,06	-0,19

Azid. = Aziditätsgrad

Tab. 2.2.24: Bivariate Korrelationen zwischen den Variablen der „Nadelspiegelwerte“ und dem mittleren Nadelverlust (NV)

	N	P	K	Ca	Mg	Mn	S	Cl	Al	Fe	Asche	Si	Na	Cd	Cu	Zn	Pb
NV	-0,12	0,01	-0,45	-0,10	0,13	0,05	-0,13	0,05	-0,27	-0,14	-0,29	0,11	0,14	-0,25	-0,19	-0,25	0,14

Tab. 2.3: Ergebnisse der kanonischen Korrelationsanalyse

Tab. 2.3.1: Zusammenhang zwischen Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe und der Humusauflage

Tab. 2.3.1a: Faktorladungen der Variablengruppe „Mineralbodenfestphase 0-5 cm Tiefe“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor	4. Faktor	5. Faktor	6. Faktor	7. Faktor	8. Faktor
TRD	0,18	-0,31	-0,44	0,19	-0,31	0,07	0,02	0,11
SKEL	0,16	0,40	0,07	0,24	0,00	0,12	-0,02	0,07
C/N	-0,38	-0,52	-0,28	-0,02	0,11	-0,02	0,07	-0,20
C/P	-0,31	-0,62	-0,26	0,02	0,27	-0,11	0,12	-0,01
C	-0,26	0,18	0,39	0,01	-0,08	0,07	0,08	0,06
N	-0,06	0,44	0,47	0,07	-0,05	0,08	0,07	0,11
P	0,05	0,69	0,46	0,28	0,13	0,26	-0,24	-0,03
AKe	0,17	0,24	0,68	-0,25	0,06	0,27	0,03	0,25
H	-0,54	-0,59	-0,12	0,27	-0,15	0,06	-0,04	0,02
Na	-0,16	0,14	0,24	-0,16	0,05	0,14	0,06	-0,16
K	0,50	0,59	0,32	0,16	0,11	-0,03	0,24	-0,11
Ca	0,78	-0,01	0,28	0,11	0,26	0,18	0,03	0,25
Mg	0,77	-0,20	0,36	-0,03	0,10	0,05	-0,20	0,27
Fe	-0,56	-0,33	0,58	0,00	-0,12	-0,02	0,18	0,11
Mn	0,30	0,80	-0,18	0,01	-0,03	-0,04	0,03	0,18
pH _{CaCl2}	0,85	0,25	0,29	-0,09	0,15	-0,05	-0,11	-0,24
pH _{KCl}	0,79	0,19	0,32	-0,20	0,19	-0,04	-0,19	0,24
XSK	0,49	0,42	-0,21	0,31	0,00	-0,38	0,30	-0,24
XSNa	-0,13	-0,08	-0,21	-0,04	0,14	0,02	0,01	-0,16
XSMg	0,90	-0,17	0,26	0,11	0,01	0,12	-0,11	0,09
XSCa	0,83	0,07	0,10	0,24	0,24	0,12	0,14	-0,01
XSH	-0,38	-0,65	-0,42	0,32	0,03	0,09	-0,15	0,02
XSAI	-0,57	0,35	0,23	-0,48	-0,17	-0,11	-0,02	-0,05
XSF _e	-0,57	-0,59	0,30	0,11	-0,05	0,01	0,10	0,03
XSMn	0,34	0,73	-0,37	0,04	-0,14	-0,25	0,04	0,16

TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

Tab. 2.3.1b : Faktorladungen der Variablengruppe „Humusaufgabe“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor	4. Faktor	5. Faktor	6. Faktor	7. Faktor	8. Faktor
C	-0,32	0,05	-0,02	0,11	-0,18	0,12	0,04	0,22
N	-0,22	0,30	0,10	0,18	-0,21	0,10	-0,05	0,25
P	0,14	0,71	0,40	0,16	-0,06	0,25	-0,12	0,14
C/N	-0,27	-0,42	-0,21	-0,05	0,00	0,10	0,15	-0,02
C/P	-0,39	-0,60	-0,34	0,09	0,08	-0,10	0,05	0,04
Si	0,22	-0,20	-0,14	-0,09	0,10	-0,14	-0,03	-0,18
K	0,22	0,37	0,25	-0,13	-0,05	-0,14	-0,09	-0,09
Ca	0,62	0,19	0,14	0,33	-0,02	0,14	0,09	0,02
Mg	0,65	0,20	0,38	-0,03	0,10	0,18	-0,20	-0,10
Mn	0,36	0,64	-0,31	0,06	-0,26	-0,26	0,03	0,13
Fe	0,25	0,46	0,43	-0,17	0,27	0,00	-0,12	-0,14
Al	0,20	0,50	0,42	-0,27	0,18	-0,10	-0,13	0,11
Cu	0,02	0,36	0,31	-0,07	0,10	0,38	0,00	0,18
Pb	-0,41	0,10	0,31	-0,30	0,03	0,16	-0,13	0,04
Zn	0,15	0,44	0,27	-0,12	0,26	0,10	0,05	-0,12
Cd	0,01	0,45	0,07	0,03	0,16	0,05	0,06	0,04
pH _{H2O}	0,42	0,51	0,24	0,01	0,17	-0,21	0,06	0,08
pH _{KCl}	0,89	0,23	0,08	0,17	-0,06	0,05	0,10	0,03
PH _{CaCl2}	0,80	0,20	0,16	0,17	-0,13	0,03	0,16	0,01
Basens.	0,27	-0,07	-0,23	0,44	-0,02	0,28	0,13	0,13
Hmenge	-0,52	-0,51	0,03	-0,07	0,23	0,04	0,11	0,03
C-Vor.	-0,57	-0,50	0,08	0,01	0,14	0,08	0,13	0,12
N-Vor.	-0,59	-0,46	0,13	0,00	0,11	0,10	0,12	0,16
P-Vor.	-0,54	-0,25	0,30	-0,12	0,12	0,17	0,13	0,18
Si-Vor.	-0,24	-0,38	-0,12	-0,11	0,26	-0,06	0,02	-0,12
K-Vor.	-0,22	0,09	0,20	-0,22	0,01	-0,03	-0,07	0,03
Ca-Vor.	-0,06	-0,27	0,04	0,14	0,05	0,30	0,20	-0,09
Mg-Vor.	0,03	0,00	0,16	-0,24	0,04	0,31	0,07	-0,07
Mn-Vor.	0,10	0,41	-0,30	-0,28	0,07	-0,04	0,14	0,11
Fe-Vor.	-0,25	0,08	0,32	-0,39	0,23	0,03	0,15	0,03
Al-Vor.	-0,27	0,14	0,36	-0,42	0,21	-0,04	0,05	0,15
Pb-Vor.	-0,49	-0,22	0,26	-0,19	0,05	0,10	0,06	0,08
C-Vor.	-0,47	-0,28	0,15	-0,18	0,16	0,22	0,11	0,12
Zn-Vor.	-0,43	-0,31	0,12	-0,21	0,31	0,11	0,22	0,05
Cd-Vor.	-0,45	-0,35	0,04	-0,07	0,26	0,03	0,19	0,14

Basens. = Basensättigung
Hmenge = Humusmenge
-Vor. = -Vorrat

Tab. 2.3.2: Zusammenhang zwischen den Variablengruppen „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“ und „Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe“

Tab. 2.3.2a: Faktorladungen der Variablengruppe „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor	4. Faktor	5. Faktor	6. Faktor	7. Faktor	8. Faktor
TRD	0,02	0,34	-0,18	0,26	-0,21	-0,48	0,06	-0,16
SKEL	0,30	-0,55	-0,14	-0,02	0,44	0,09	0,18	-0,30
C/N	-0,33	0,41	-0,40	0,08	0,18	0,06	0,25	-0,20
C/P	-0,23	0,48	-0,37	0,05	0,16	0,18	0,46	-0,02
C	0,01	-0,13	-0,07	-0,47	0,34	0,11	0,20	-0,09
N	0,14	-0,41	0,04	-0,48	0,28	0,04	0,05	0,00
P	0,34	-0,63	0,09	-0,43	0,17	-0,01	-0,20	0,12
AKe	0,60	-0,22	0,25	-0,47	0,02	0,21	-0,04	-0,16
H	-0,28	0,45	-0,43	-0,14	0,25	0,13	0,30	-0,06
Na	-0,07	-0,13	0,04	0,09	0,23	0,55	-0,43	-0,18
K	0,43	-0,64	0,36	0,10	-0,10	0,13	0,08	0,12
Ca	0,89	0,02	0,23	0,17	0,01	-0,03	0,03	-0,13
Mg	0,74	0,24	0,46	0,05	0,12	-0,07	-0,01	-0,21
Fe	-0,14	0,21	-0,08	-0,41	0,11	0,16	0,09	0,08
Mn	0,24	-0,75	0,09	0,13	0,24	-0,16	-0,20	-0,17
pH _{CaCl2}	0,68	-0,16	0,62	0,19	-0,03	-0,06	-0,11	-0,08
pH _{KCl}	0,65	-0,04	0,65	0,13	-0,02	-0,05	-0,17	0,05
XSK	-0,04	-0,48	0,33	0,57	-0,14	-0,06	0,12	0,24
XSNa	-0,28	0,06	-0,03	0,44	0,19	0,44	-0,41	-0,04
XSMg	0,67	0,15	0,41	0,18	0,06	-0,15	0,07	-0,23
XSCa	0,67	-0,13	0,19	0,39	-0,11	-0,08	0,15	-0,14
XSH	-0,30	0,60	-0,46	0,06	0,18	0,00	0,32	0,06
XSAI	-0,38	-0,27	0,09	-0,48	-0,12	0,11	-0,32	0,12
XSF _e	-0,25	0,46	-0,26	-0,28	0,16	0,10	0,11	0,13
XSMn	0,03	-0,65	0,19	0,35	0,15	-0,19	-0,22	-0,19

Tab. 2.3.2b: Faktorladungen der Variablengruppe „Mineralbodenfestphase in 30-60 cmTiefe“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor	4. Faktor	5. Faktor	6. Faktor	7. Faktor	8. Faktor
TRD	0,02	0,25	-0,10	0,20	-0,37	-0,55	-0,02	-0,20
SKEL	0,14	-0,53	-0,06	-0,02	0,31	0,00	0,39	-0,34
N	0,46	-0,46	0,21	-0,30	0,04	0,19	-0,05	0,30
P	0,41	-0,52	0,10	-0,34	0,26	-0,08	-0,16	0,22
AKe	0,73	-0,27	0,01	0,02	-0,22	0,15	-0,03	-0,25
H	0,01	-0,37	-0,03	0,20	0,10	0,02	-0,14	-0,35
Na	-0,02	-0,22	0,05	0,03	0,07	0,49	-0,45	-0,22
K	0,11	-0,32	0,25	0,35	-0,12	0,19	0,05	0,12
Ca	0,88	-0,01	-0,05	0,21	-0,29	0,08	-0,05	-0,09
Mg	0,73	0,03	0,08	0,17	-0,33	-0,01	-0,05	-0,26
Fe	-0,14	0,13	-0,22	0,08	0,40	0,37	0,24	-0,16
Mn	0,35	-0,63	-0,17	0,19	0,28	0,01	-0,37	0,02
pH _{CaCl2}	0,70	0,36	0,46	0,02	0,03	0,02	0,04	0,11
pH _{KCl}	0,52	0,64	0,35	-0,07	0,11	0,03	0,05	0,23
XSK	-0,17	-0,23	0,35	0,49	-0,03	0,20	0,05	0,36
XSNa	-0,24	0,15	-0,10	0,15	0,18	0,52	-0,44	-0,08
XSMg	0,49	-0,16	0,25	0,23	-0,23	-0,11	-0,13	-0,25
XSCa	0,72	-0,15	0,16	0,33	-0,28	0,06	-0,06	-0,06
XSH	-0,06	-0,35	-0,01	0,18	0,26	0,07	-0,19	-0,30
XSAI	-0,60	0,22	-0,23	-0,41	0,22	-0,08	0,16	0,13
XSF _e	-0,15	0,24	-0,25	0,11	0,27	0,39	0,21	-0,01
XSMn	0,01	-0,54	0,07	0,31	0,21	-0,03	-0,51	-0,06

TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des Kations an der Ake

Tab. 2.3.3: Zusammenhang zwischen den Variablengruppen „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“ und „wäßrigem Extrakt des Oberbodens“

Tab. 2.3.3a: Faktorladungen der Variablengruppen „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“

	1, Faktor	2, Faktor	3, Faktor	4, Faktor	5, Faktor	6, Faktor	7, Faktor	8, Faktor	9, Faktor
TRD	-0,17	0,46	0,36	0,21	-0,24	0,16	0,15	-0,40	-0,05
SKEL	0,28	-0,01	-0,14	-0,08	0,31	0,05	0,51	0,29	0,40
C/N	-0,52	-0,19	0,34	-0,09	0,03	0,11	0,29	-0,06	-0,21
C/P	-0,49	-0,25	0,33	0,04	-0,03	0,07	0,04	0,00	-0,16
N	0,36	-0,49	-0,24	-0,03	0,14	-0,18	0,06	0,28	0,27
P	0,55	-0,19	-0,30	-0,12	0,09	-0,11	0,12	0,30	0,22
AKe	0,52	-0,40	-0,06	-0,39	0,36	-0,09	0,31	0,07	0,09
H	-0,64	-0,12	0,46	-0,22	0,14	-0,15	0,19	0,13	0,05
Na	0,07	-0,01	-0,24	-0,32	0,23	0,21	-0,01	0,07	0,02
K	0,72	0,12	-0,30	0,34	0,16	-0,10	0,25	0,16	0,00
Ca	0,79	0,03	0,25	0,32	0,06	0,12	0,09	0,22	-0,07
Mg	0,82	0,00	0,12	0,13	-0,14	0,04	0,05	0,24	-0,13
Fe	-0,14	-0,34	0,15	-0,36	0,20	-0,42	-0,09	0,06	0,16
Mn	0,38	0,30	-0,48	0,07	0,09	0,23	0,19	0,22	0,19
C	0,08	-0,62	-0,14	-0,07	0,22	-0,08	0,21	0,25	0,12
pH _{CaCl2}	0,69	0,04	-0,42	0,42	-0,13	0,20	-0,04	-0,09	0,03
pH _{KCl}	0,57	-0,09	-0,44	0,45	-0,08	0,17	-0,18	-0,17	-0,07
XSK	0,34	0,50	-0,30	0,65	-0,06	-0,03	-0,02	-0,01	0,00
XSNa	-0,18	0,21	-0,14	-0,11	0,00	0,26	-0,21	0,00	0,03
XSMg	0,60	0,13	0,09	0,30	-0,36	0,14	-0,16	0,16	0,05
XSCa	0,63	0,17	0,21	0,50	-0,11	0,22	-0,07	0,20	0,15
XSH	-0,74	0,06	0,56	0,00	-0,16	-0,04	0,08	0,14	-0,09
XSAI	0,03	-0,34	-0,51	-0,48	0,25	-0,17	0,04	-0,33	-0,11
XSFe	-0,37	-0,27	0,32	-0,27	0,07	-0,43	-0,13	0,10	0,03
XSMn	0,26	0,48	-0,47	0,25	0,06	0,30	0,01	0,11	0,20

TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

Tab. 2.3.3b: Faktorladungen der Variablengruppen „wäßriger Extrakt des Oberbodens“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor	4. Faktor	5. Faktor	6. Faktor	7. Faktor	8. Faktor	9. Faktor
pH	0,57	-0,14	-0,13	0,37	0,17	-0,13	0,02	0,16	0,03
DOC	0,10	0,60	0,28	0,02	-0,24	0,14	-0,24	-0,08	-0,09
Na	0,61	-0,25	0,12	-0,20	0,41	-0,19	0,05	-0,25	-0,15
K	0,10	0,66	0,04	0,29	0,02	-0,11	-0,03	-0,51	-0,07
Mg	0,72	-0,08	0,02	0,08	0,01	-0,13	0,05	-0,03	-0,11
Ca	0,67	-0,01	0,08	0,46	0,12	0,27	-0,08	-0,17	0,07
NH ₄ N	-0,43	0,43	0,10	0,15	-0,06	0,08	-0,49	-0,20	-0,26
NO ₃ N	0,16	0,15	-0,39	0,18	0,07	0,11	-0,32	-0,19	0,15
Cl	0,25	-0,18	-0,04	-0,08	0,20	-0,39	-0,04	-0,40	0,09
SO ₄ S	0,31	-0,14	-0,22	-0,20	0,51	-0,08	0,07	0,02	0,08
PO ₄ P	-0,16	0,43	0,41	0,20	-0,29	0,27	-0,01	-0,18	0,33
Al	-0,37	0,12	0,51	-0,08	0,02	-0,23	-0,17	-0,17	-0,09
Mn	0,07	0,22	-0,60	-0,27	0,38	0,22	0,04	0,07	0,17
Fe	-0,37	0,36	0,56	0,16	-0,41	-0,09	0,04	-0,02	0,04
Azid.	-0,80	0,24	0,10	-0,28	0,07	0,03	-0,03	0,23	-0,01
Ca/Al	0,21	-0,49	-0,35	0,53	-0,10	0,19	0,17	-0,07	-0,15
Mg/Al	0,32	-0,38	-0,38	0,38	-0,14	0,06	0,34	0,03	-0,15

Azid. = Aziditätsgrad

Tab. 2.3.4: Zusammenhang zwischen den Variablengruppen „Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe“ und „wäßrigem Extrakt des Unterbodens“

Tab. 2.3.4a: Faktorladungen der Variablengruppen „Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor	4. Faktor	5. Faktor	6. Faktor
TRD	-0,18	-0,03	0,08	0,51	-0,05	-0,08
SKEL	-0,05	-0,04	0,14	0,03	0,05	-0,14
N	0,37	0,39	0,09	-0,25	0,08	0,13
P	0,32	0,40	0,21	-0,18	0,12	0,15
AKe	0,71	0,06	0,11	0,38	-0,10	0,07
H	0,38	-0,02	-0,21	0,07	0,37	0,16
Na	0,26	0,07	0,12	-0,30	0,01	0,31
K	0,78	0,13	-0,06	0,30	0,05	0,16
Ca	0,59	0,15	0,12	0,50	-0,20	0,07
Mg	0,52	0,28	0,10	0,53	-0,20	0,13
Fe	-0,15	-0,05	0,05	-0,05	0,17	0,11
Mn	0,45	-0,01	0,45	-0,14	0,01	0,34
pH _{CaCl2}	0,02	0,49	0,24	0,26	-0,30	0,04
pH _{KCl}	-0,21	0,31	0,17	0,13	-0,28	0,09
XSK	0,26	0,20	-0,22	0,09	0,02	0,24
XSNa	-0,21	-0,09	0,01	-0,31	-0,04	0,36
XSMg	0,43	0,55	0,18	0,47	-0,16	-0,02
XSCa	0,55	0,39	0,30	0,50	-0,18	-0,13
XSH	0,09	0,06	-0,01	0,08	0,68	0,18
XSAI	-0,54	-0,49	-0,27	-0,48	0,12	0,00
XSF _e	-0,20	-0,11	0,12	0,03	0,41	0,07
XSMn	0,32	0,10	0,32	-0,28	-0,07	0,48

TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

Tab. 2.3.4b: Faktorladungen der Variablengruppen „wäßriger Extrakt des Unterbodens“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor	4. Faktor	5. Faktor	6. Faktor
pH	0,54	0,19	0,40	0,55	-0,32	0,17
DOC	0,20	-0,14	0,13	-0,01	0,10	0,23
Na	0,92	-0,09	-0,16	0,03	0,12	0,01
K	-0,03	-0,45	-0,32	0,24	0,23	0,15
Mg	0,60	0,24	0,18	0,45	0,19	0,18
Ca	0,51	-0,34	0,46	0,46	0,00	0,13
NH ₄ N	-0,30	-0,28	0,10	-0,33	0,09	0,33
NO ₃ N	0,27	0,18	0,04	-0,30	0,15	0,36
Cl	0,57	-0,03	0,15	-0,32	0,18	-0,17
SO ₄ S	0,56	-0,22	0,13	0,04	0,49	0,17
PO ₄ P	0,15	0,06	0,10	0,04	0,01	-0,21
Al	-0,06	-0,01	0,03	0,02	0,10	0,10
Mn	0,10	-0,14	0,25	-0,52	0,04	0,48
Fe	0,14	0,36	-0,10	0,26	0,20	0,26
Azid.	-0,50	-0,21	-0,18	-0,25	-0,08	0,19
Ca/Al	0,63	-0,32	0,17	0,17	-0,15	0,00
Mg/Al	0,62	-0,05	-0,02	0,12	0,05	-0,08

Azid. = Aziditätsgrad

Tab. 2.3.5: Zusammenhang zwischen den Variablengruppen Humusaufgabe und Nadelspiegelwerten

Tab. 2.3.5a: Faktorladungen der Variablengruppen „Humusaufgabe“

	1 .Faktor	2 .Faktor	3 .Faktor
C/N	0,15	-0,29	-0,08
C/P	0,08	-0,48	-0,04
C	-0,12	-0,13	-0,14
N	-0,21	-0,04	-0,14
P	-0,33	0,53	-0,16
Si	0,09	0,05	0,18
K	-0,18	0,48	0,08
Ca	-0,32	0,31	0,01
Mg	-0,19	0,60	0,02
Mn	-0,16	0,44	0,65
Fe	-0,11	0,62	0,10
Al	0,09	0,35	0,22
Pb	0,41	0,20	-0,08
Cu	-0,04	0,46	-0,19
Zn	-0,20	0,67	0,05
Cd	-0,27	0,56	0,21
pH _{H2O}	0,17	0,47	0,20
pH _{KCl}	-0,31	0,55	0,24
pH _{CaCl2}	-0,31	0,47	0,12
Basen	-0,28	0,00	-0,13
Hmenge	0,22	-0,32	-0,21
C-V	0,19	-0,30	-0,28
N-V	0,14	-0,29	-0,30
P-V	0,11	-0,16	-0,28
Si-V	0,10	-0,19	-0,02
K-V	-0,02	0,25	0,04
Ca-V	-0,01	0,09	-0,02
Mg-V	0,08	0,27	0,04
Mn-V	-0,06	0,37	0,63
Fe-V	0,17	0,13	0,06
Al-V	0,22	-0,04	0,10
Pb-V	0,35	-0,11	-0,20
C-V	0,24	-0,07	-0,24
Zn-V	0,20	0,07	-0,14
Cd-V	0,08	-0,01	-0,03

Basen = Basensättigung
Hmenge = Humusmenge
-V = -Vorrat

Tab. 2.3.5b: Faktorladungen der Variablengruppe „Nadelspiegelwerte“

	1 .Faktor	2 .Faktor	3 .Faktor
N	0,42	-0,13	-0,19
P	0,09	0,32	-0,33
K	0,04	-0,05	0,03
Ca	-0,33	0,53	0,43
Mg	-0,21	0,34	0,25
Mn	0,33	0,13	0,46
S	0,25	-0,23	-0,45
Cl	0,21	0,08	0,28
Al	0,08	0,16	-0,27
Fe	0,12	0,41	-0,19
Asche	-0,05	0,45	0,37
Si	0,44	-0,02	-0,09
Na	0,04	0,18	0,41
Cd	0,11	0,65	0,44
Cu	0,32	-0,06	-0,09
Zn	-0,22	0,41	-0,17
Pb	0,47	0,47	-0,06

Tab. 2.3.6: Zusammenhang zwischen den Variablengruppen „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“ und „Nadelspiegelwerte“

Tab. 2.3.6a: Faktorladungen der Variablengruppe „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor
TRD	0,02	-0,42	0,35
SKEL	0,34	0,04	-0,12
C/N	-0,25	0,28	0,32
C/P	-0,37	0,26	0,09
C	-0,03	0,01	-0,15
N	0,18	-0,15	-0,33
P	0,40	-0,11	-0,09
AKe	0,08	-0,06	-0,12
H	-0,54	0,26	0,16
Na	-0,09	0,40	0,00
K	0,74	0,02	-0,23
Ca	0,79	-0,25	-0,06
Mg	0,69	-0,22	0,01
Fe	-0,58	0,06	0,10
Mn	0,53	-0,28	-0,22
pH _{CaCl2}	0,76	-0,19	-0,32
pH _{KCl}	0,61	-0,15	-0,25
XSK	0,69	0,13	-0,15
XSNa	-0,06	0,50	0,04
XSMg	0,68	-0,27	-0,10
XSCa	0,75	-0,28	-0,19
XSH	-0,46	0,19	0,25
XSAI	-0,31	0,09	-0,05
XSF _e	-0,64	0,08	0,27
XSMn	0,55	-0,24	-0,20

TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des *Kations* an der AKe

Tab. 2.3.6.b: Faktorladungen der Variablengruppe „Nadelspiegelwerte“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor
N	-0,49	0,23	-0,18
P	0,22	0,18	0,21
K	0,28	0,09	-0,09
Ca	0,64	-0,29	-0,07
Mg	0,41	-0,28	0,16
Mn	-0,06	-0,13	0,14
S	-0,44	0,44	0,11
Cl	-0,14	-0,11	0,05
Al	-0,08	0,22	-0,63
Fe	0,25	0,56	-0,41
Asche	0,55	-0,18	0,10
Si	0,00	0,46	0,49
Na	0,17	0,17	-0,22
Cd	0,57	0,27	-0,09
Cu	-0,14	0,28	-0,07
Zn	0,44	0,10	-0,07
Pb	0,03	0,56	-0,30

Tab. 2.3.7: Zusammenhang zwischen den Variablengruppen „Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe“ und „Nadelspiegelwerte“

Tab. 2.3.7a: Faktorladungen der Variablengruppe „Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor	4. Faktor
TRD	0,01	-0,31	0,13	-0,31
SKEL	-0,19	0,01	-0,34	-0,44
N	-0,38	0,18	-0,43	-0,21
P	-0,23	0,31	-0,26	-0,38
AKe	0,24	-0,11	-0,11	-0,05
H	0,03	-0,14	-0,27	-0,13
Na	0,09	0,12	-0,16	0,18
K	0,66	0,14	-0,28	0,36
Ca	0,45	-0,31	0,05	-0,13
Mg	0,44	-0,16	-0,07	-0,17
Fe	-0,25	0,27	0,23	-0,14
Mn	-0,24	-0,13	-0,28	0,14
pH _{CaCl2}	0,69	0,04	-0,18	-0,19
PH _{KCl}	0,28	0,24	0,22	-0,01
XSK	0,66	0,06	-0,25	0,38
XSNa	0,00	0,09	0,09	0,18
XSMg	0,47	-0,10	-0,22	-0,22
XSCa	0,62	-0,37	-0,03	-0,22
XSH	-0,03	-0,02	-0,08	-0,06
XSAI	-0,62	0,24	0,16	0,13
XSFe	-0,21	0,29	0,39	-0,03
XSMn	-0,33	-0,17	-0,30	0,14

TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des *Kations* an der AKe

Tab. 2.3.7b: Faktorladungen der Variablengruppe „Nadelspiegelwerte“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor	4. Faktor
N	-0,17	0,63	0,24	0,23
P	-0,09	0,16	0,42	-0,17
K	0,22	-0,07	-0,01	-0,19
Ca	0,39	-0,37	-0,19	-0,33
Mg	0,21	-0,30	-0,07	0,11
Mn	-0,40	-0,20	-0,45	0,27
S	0,04	0,24	0,70	0,24
Cl	-0,16	0,14	0,13	0,22
Al	-0,16	0,10	-0,07	0,26
Fe	-0,09	0,08	0,01	0,20
Asche	0,35	-0,31	-0,15	-0,11
Si	0,38	-0,07	0,58	0,33
Na	0,27	0,54	-0,33	0,22
Cd	0,47	-0,19	-0,42	0,24
Cu	-0,09	0,18	-0,09	0,19
Zn	0,36	-0,46	-0,15	-0,18
Pb	-0,15	0,23	0,07	0,28

Tab. 2.3.8: Zusammenhang zwischen den Variablengruppen „Nährstoffvorräte bis 60 cm Tiefe“ und „Nadelspiegelwerte“

Tab. 2.3.8a: Faktorladungen der Variablengruppe „Nährstoffvorräte bis 60 cm Tiefe“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor	4. Faktor
Ca	-0,39	-0,48	0,30	0,69
Mg	-0,39	-0,59	0,52	0,46
K	-0,49	0,09	0,63	0,56
P	0,01	-0,02	0,79	-0,48
N	0,67	0,11	0,72	0,15

Tab. 2.3.8b: Faktorladungen der Variablengruppe „Nadelspiegelwerte“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor	4. Faktor
N	0,32	0,02	-0,17	-0,48
P	-0,32	-0,36	0,26	-0,30
K	-0,07	-0,06	-0,09	0,14
Ca	-0,13	-0,18	0,08	0,48
Mg	-0,07	-0,26	0,43	0,26
Mn	0,00	0,29	0,04	-0,25
S	0,09	-0,09	-0,53	-0,10
Cl	0,30	-0,07	0,15	-0,12
Al	0,24	0,34	0,19	0,03
Fe	-0,27	0,20	-0,03	-0,01
Asche	-0,03	-0,08	0,27	0,40
Si	-0,33	-0,04	-0,08	0,34
Na	-0,15	-0,03	0,16	-0,15
Cd	-0,37	0,54	0,32	0,15
Cu	0,19	0,16	0,09	-0,07
Zn	-0,10	0,16	-0,03	0,46
Pb	-0,25	0,07	-0,21	0,05

Tab. 2.3.9: Zusammenhang zwischen den Variablengruppen „wäßriger Extrakt des Oberbodens“ und „Nadelspiegelwerte“

Tab. 2.3.9a: Faktorladungen der Variablengruppe „wäßriger Extrakt des Oberbodens“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor
pH	0,68	-0,37	-0,11
DOC	-0,18	0,33	0,49
Na	0,31	0,44	0,35
K	0,17	0,32	0,10
Mg	0,45	0,45	0,13
Ca	0,55	0,44	-0,07
NH ₄ N	-0,45	0,19	0,19
NO ₃ N	-0,09	0,43	0,07
Cl	-0,14	0,41	0,22
SO ₄ S	-0,18	0,20	0,32
PO ₄ P	0,30	-0,01	0,06
Al	-0,36	0,22	0,40
Mn	-0,43	-0,21	0,36
Fe	-0,18	0,35	0,30
Aziditätsgrad	-0,73	-0,23	0,34
Ca/Al	0,50	0,08	-0,31
Mg/Al	0,45	0,07	-0,24

Tab. 2.3.9b: Faktorladungen der Variablengruppe „Nadelspiegelwerte“

	1. Faktor	2. Faktor	3. Faktor
N	-0,60	-0,02	-0,21
P	0,22	-0,15	0,15
K	0,10	-0,13	-0,43
Ca	0,52	0,24	-0,01
Mg	0,42	0,39	0,23
Mn	-0,30	-0,17	0,50
S	-0,43	-0,13	-0,06
Cl	-0,29	0,56	0,15
Al	-0,10	-0,06	-0,09
Fe	-0,16	-0,11	0,12
Asche	0,31	0,44	0,19
Si	-0,04	0,34	0,29
Na	-0,16	0,24	0,21
Cd	0,00	0,17	0,10
Cu	-0,34	-0,28	0,07
Zn	0,23	-0,04	-0,24
Pb	-0,33	-0,22	0,17

Tab. 2.3.10: Zusammenhänge zwischen den Variablen „wäßriger Extrakt des Unterbodens“ und „Nadelspiegelwerte“

Tab. 2.3.10a: Faktorladungen der Variablengruppe „wäßriger Extrakt des Unterbodens“

	1. Faktor	2. Faktor
pH	-0,32	0,21
DOC	-0,15	0,02
Na	-0,35	-0,07
K	-0,05	-0,02
Mg	-0,22	-0,03
Ca	-0,06	0,42
NH ₄ N	0,14	0,13
NO ₃ N	0,25	-0,11
Cl	0,38	-0,24
SO ₄ S	-0,07	0,02
PO ₄ P	-0,12	0,28
Al	-0,16	-0,47
Mn	0,38	-0,03
Fe	-0,27	-0,41
Aziditätsgrad	0,07	-0,17
Ca/Al	0,02	0,46
Mg/Al	-0,06	0,18

Tab. 2.3.10b: Faktorladungen der Variablengruppe Nadelspiegelwerte“

	1. Faktor	2. Faktor
N	0,52	0,00
P	0,17	-0,04
K	-0,06	0,43
Ca	-0,42	0,00
Mg	-0,15	-0,35
Mn	0,38	-0,04
S	0,21	-0,03
Cl	0,62	-0,20
Al	0,48	0,23
Fe	0,12	0,13
Asche	-0,06	0,01
Si	-0,19	0,07
Na	0,09	-0,18
Cd	0,00	-0,01
Cu	0,39	0,41
Zn	-0,30	0,26
Pb	0,19	0,42

Tab. 2.4: Strukturkoeffizienten der multiplen Korrelationsanalysen

Tab. 2.4a: Strukturkoeffizienten der multiplen Korrelation zwischen der Prädiktorvariablen-
gruppe „Humusaufgabe“ und der Kriteriumsvariablen „mittlerer Nadelverlust“

C	N	P	C/N	C/P	Si	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Al
0,43	0,25	-0,17	0,52	0,51	-0,34	-0,04	-0,13	-0,28	-0,12	-0,38	-0,29
Pb	Cu	Zn	Cd	pH_{H2O}	pH_{KCl}	pH_{CaCl2}	BS	HM	C-V	N-V	P-V
0,18	0,13	-0,02	-0,03	-0,18	-0,14	-0,20	0,09	0,17	0,26	0,22	0,11
Si-V	K-V	Ca-V	Mg-V	Mn-V	Fe-V	Al-V	Pb-V	Cu-V	Zn-V	Cd-V	
-0,02	0,05	-0,07	-0,11	-0,11	-0,13	-0,13	0,23	0,20	0,13	0,12	

BS = Basensättigung
 HM = Humusmenge
 -V = -Vorrat

Tab. 2.4b: Strukturkoeffizienten der multiplen Korrelation zwischen der Prädiktorvariablen-
gruppe „Mineralbodenfestphase in 0-5 cm Tiefe“ und der Kriteriumsvariablen
„mittlerer Nadelverlust“

TRD	SKEL	C/N	C/P	N	P	pH_{CaCl2}	pH_{KCl}	AKe	H	Na	K	Ca
0,10	0,11	0,35	0,17	-0,09	-0,07	-0,50	-0,47	0,20	0,49	0,20	-0,18	0,00
Mg	Fe	Mn	C	XSK	XSNa	XSMg	XSCa	XSH	XSAI	XSF_e	XSMn	
0,06	-0,05	0,00	0,13	-0,47	0,12	-0,14	-0,23	0,44	-0,13	0,05	-0,16	

TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

Tab. 2.4c: Strukturkoeffizienten der multiplen Korrelation zwischen der Prädiktorvariablen-
gruppe „Mineralbodenfestphase in 30-60 cm Tiefe“ und der Kriteriumsvariablen
„mittlerer Nadelverlust“

TRD	SKEL	N	P	pH_{CaCl2}	pH_{KCl}	AKe	H	Na	K	Ca
0,09	-0,08	-0,00	0,25	-0,57	-0,28	0,16	0,40	0,12	-0,32	-0,04
Mg	Fe	Mn	XSK	XSNa	XSMg	XSCa	XSH	XSAI	XSF_e	XSMn
0,04	0,42	-0,00	-0,45	0,19	-0,20	-0,46	0,44	0,36	0,46	-0,12

TRD = Trockenraumdichte
 SKEL = Skelettgehalt
 AKe = effektive Austauschkapazität
 XS-Kation = Anteil des Kations an der AKe

Tab. 2.4d: Strukturkoeffizienten der multiplen Korrelation zwischen der Prädiktorvariablen-
gruppe „Nährstoffvorräte im Mineralboden bis 60 cm Tiefe“ und der Kriteriums-
variablen „mittlerer Nadelverlust“

Ca	Mg	K	P	N
0,47	0,72	0,18	0,08	-0,26

Tab. 2.4e: Strukturkoeffizienten der multiplen Korrelation zwischen der Prädiktorvariablen-
gruppe „Nadelspiegelwerte“ und der Kriteriumsvariablen „mittlerer Nadelverlust“

N	P	K	Ca	Mg	Mn	S	Cl	Al
-0,16	0,01	-0,57	-0,13	0,16	0,07	-0,17	0,06	-0,35
Fe	Asche	Si	Na	Cd	Cu	Zn	Pb	
-0,18	-0,37	0,14	0,19	-0,31	-0,25	-0,32	0,18	

Anhang 3: Schlüsselverzeichnis der Ausgangssubstrate sowie Tabellen und Abbildungen zu Kapitel 4 (Ökochemische Ausstattung wesentlicher Waldbodensubstrate und Bewertung ihrer Empfindlichkeit gegenüber Boden degradation durch Luftschadstoffbelastung)

**Schlüsselverzeichnis der Ausgangssubstrate der Bodenbildung
Rheinland-Pfalz**

0. Substrate aus sauren, in der Regel kristallinen Gesteinen

- 01.00 Quarze
- 02.00 Quarzite
 - 02.10 devonische Quarzite (Taunus-, Drohner-, Emsquarzite u.a.)
 - 02.20 tertiäre Quarzite
- 03.00 Phyllite, Schiefer
- 04.00 helle Gneise
- 05.00 Plutonite
- 06.00 saure Vulkanite (Rhyolithe, Quarzkeratophyre, Dacite)
- 07.00 Ganggesteine

1. Substrate aus intermediären Gesteinen

- 11.00 dunkle Gneise, Paragneise
- 12.00 Hornfelse
- 13.00 Schiefer
 - 13.10 Chloritschiefer, Serizitschiefer
 - 13.20 Grünschiefer, Buntschiefer
 - 13.30 Tonschiefer, Devon (Hunsrück-, Ramersbacher-, Brohltal-Schiefer u.a.)
- 14.00 Plutonite
- 15.00 intermediäre Vulkanite
 - 15.10 Andesite
 - 15.20 Prophyrite
 - 15.30 Latite
 - 15.40 Trachyte
 - 15.50 Trasse (trachytischer Tuff, Brohltaltraß)
 - 15.60 Keratophyre
 - 15.70 Phonolithe (Selbergite)
- 16.00 Ganggesteine

2. Substrate aus basischen Gesteinen

- 21.00 Basalte
 - 21.10 Feldspatbasalte
 - 21.20 Alkalibasalte
 - 21.30 Olivin/Pikrinbasalte
 - 21.40 Nephelinbasalte
 - 21.50 Leucitbasalte
 - 21.60 Tholeytische Basalte

22.00	Melaphyre
23.00	Diabase
24.00	Foidite, Foidbasalte
25.00	Plutonite
26.00	Peridotite, Pyroxenite
27.00	Amphibolite, Eklogite
28.00	Serpentinite, Specksteine

3. Substrate aus karbonatischen Gesteinen

31.00	Kalksteine
31.10	Massenkalke (Devon)
31.20	Kalksteine des Muschelkalks
31.30	tertiäre Kalke (Mainzer Becken)
32.00	Dolomite
33.00	Mergelkalke
34.00	Kalksandsteine
35.00	Organokalke
36.00	Kieselkalke
37.00	Kalksilikate, Kalkphyllite
38.00	Marmore
39.00	Anhydrite, Gipse

4. karbonatfreie Substrate aus sedimentären Gesteinen

41.00	Sandsteine
41.10	Luxemburger Sandstein (Lias, Sande des schwarzen Juras)
41.20	Sande des mittleren und oberen Keupers (Rhätsandstein u.a.)
41.30	Muschelsandstein (unterer Muschelkalk)
41.40	Oberer Buntsandstein
41.41	Voltziensandstein
41.42	Karneolsandstein
41.50	Mittlerer Buntsandstein
41.51	Karlstal-Schichten
41.52	Rehberg-Schichten
41.53	Trifels-Schichten
41.60	Unterer Buntsandstein
41.61	Annweiler-Schichten
41.62	Staufer-Schichten
41.70	permische Sandsteine
41.71	Sande des oberen Rotliegenden
41.72	Sande des unteren Rotliegenden
41.80	devonische Sandsteine
41.81	Hermeskeiler Sandstein (Hermeskeil-Schichten, Unter-Devon)
42.00	Konglomerate, Breccien
43.00	Grauwacken
44.00	Arkosen
45.00	kieselige Sedimentgesteine
46.00	Schluffsteine

5. Substrate aus Tonen und Tonsteinen

- 51.00 Tone
- 52.00 Tonmergel
- 53.00 Mergeltone, kalkhaltige Tone
- 54.00 Schiefertone
- 55.00 Tonsteine

- 56.00 Alte Verwitterungslehme (VWL)
 - 56.10 Verwitterungslehm aus sauren und intermediären Vulkaniten (6.00, 15.00)
 - 56.20 Verwitterungslehm aus basischen Vulkaniten (21.00, 22.00, 23.00)
 - 56.30 Terrae calcis, Verwitterungslehm aus karbonathaltigem Ausgangsmaterial (3.; 53.00)
 - 56.40 Verwitterungslehm aus Tonschiefern und TS mit Grauwackenwechsella gerungen, Rheinisches Schiefergebirge, Karbon und älter (13.30)
 - 56.50 Verwitterungslehm aus Grauwacken und/oder Sandsteinen, Rheinisches Schiefergebirge (43.00, 41.80)
 - 56.60 Verwitterungslehm aus Sandsteinen und Grauwacken mit Quarzitanteilen, Rheinisches Schiefergebirge (43.00, 41.80)
 - 56.70 Verwitterungslehm aus Schluffsteinen, Schiefertönen und Tonsteinen au ßerhalb des Rheinischen Schiefergebirges (46.00, 54.00, 55.00)
 - 56.80 Verwitterungslehm aus quarzreichem Ausgangsmaterial au ßerhalb des Rheinischen Schiefergebirges (41.10-41.70)

6. Substrate aus karbonathaltigen Lockergesteinen

- 61.00 Lehme, Schluffe, Schlufflehme (karbonathaltig, nicht über 3:)
 - 61.10 Löss
 - (61.20 Schwemmlöss) s. 81.00 umgelagertes karbonathaltiges Material
 - (61.30 Auelehme) s. 81.00

- 62.00 Sande (karbonathaltig)
 - 62.10 karbonathaltige Sande des Mainzer Beckens (Tertiär)
 - 62.20 karbonathaltige Sande des Keupers

- 63.00 Schotter
- 64.00 Mergel
- 65.00 Moränen
- 66.00 Marschen

7. Substrate aus hauptsächlich kalkfreien Lockersedimenten

- 71.00 Lehme, Schlufflehme
 - 71.10 in situ (teil-) entbaste Löss (Lößlehm)
 - 71.20 Decklehm größerer Mächtigkeit (minderer Beeinflussung durch das dar unterliegende Ausgangsmaterial)
 - 71.30 Decklehm über Verwitterungslehm intermediärer Vulkanite (56.10)
 - 71.40 Decklehm über Verwitterungslehm basischer Vulkanite (56.20)
 - 71.50 Decklehm über karbonathaltigem Material (3, 56.30, 6)
 - 71.60 Decklehm über Tonschiefer und Grauwacke (auch 56.40 und 56.50) des Rheinischen Schiefergebirges

71.70 Deckle n über Schluffsteine, Schiefertone, Tonsteine und Tone (auch
56.70) außerhalb des Rheinischen Schiefergebirges
71.80 Deckle n über Sandstein und Quarzite (2.00, 41.00, 56.60, 56.80)

72.00

Schluffe

73.00

Sande

73.10 Flugsande

73.20 Dünenande

73.30 Sand über Sand- und Schluffstein (41.00, 46.00)

73.40 Sand über umgelagertem karbonatfreiem Material

74.00

Schotter

75.00

Moränen

76.00

Marschen

77.00

Bimsüberschüttungen

8.

Mischsubstrate

81.00

umgelagertes karbonathaltiges Material unterschiedlicher geologischer Herkunft

81.10 karbonathaltige Fluß- und Bachablagerungen

81.20 Auelehne

81.30 Schwemmlösse

82.00

umgelagertes karbonatfreies Material

unterschiedlicher geologischer Herkunft

82.10 Substrate pleistozäner Fluß- und Bachablagerungen

und holozäner Hochflutablagerungen

82.20 Quartäre Schwemm- und Abschwemmungen sowie Fluß- und Bachablagerungen in Kerb- und Durchbruchtäälern außerhalb des nördlichen Oberrheinschen Tieflandes

82.30 Substrate der Schwemmsandfluten

83.00

Kolluvien

89.00

künstliche Aufschüttungen

9.

organische Substrate

91.00

Quellmoore

92.00

Brücher

93.00

Anmoore

94.00

Niedermoore

95.00

Übergangsmoore

96.00

Hochmoore

97.00

Trockentorfe

98.00

Tangelhumus

99.00

Kaustobiolite

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	72	90	111	139	176	212	432
2	34	59	70	76	97	136	173	185
3	45	61	73	88	101	121	155	182
4	40	43	65	118	180	425	518	744
5	75	40	57	75	99	121	161	268
6	250	42	72	86	105	131	159	367
7	134	22	35	46	58	78	97	241
8	92	57	73	87	112	139	162	215
9	145	13	23	29	38	49	65	176
10	28	33	46	63	94	138	201	577
11	42	40	57	67	83	112	160	223
12	35	60	64	100	257	555	652	759
13	54	27	37	45	88	243	390	577
14	36	12	54	63	83	143	403	520
15	85	12	27	33	44	54	80	129
16	15	21	24	27	43	62	65	73

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	38	46	72	122	211	396	565
2	29	37	45	49	65	120	251	318
3	41	15	31	43	56	70	80	111
4	37	29	56	68	174	334	543	775
5	73	27	42	51	58	72	95	246
6	246	15	42	47	56	68	76	183
7	120	10	18	25	33	43	57	182
8	89	24	38	46	55	65	76	173
9	130	7	12	16	21	26	31	50
10	27	31	34	46	54	111	510	557
11	41	17	33	40	51	73	93	163
12	29	40	49	77	180	456	621	671
13	47	13	20	32	48	163	298	533
14	30	8	27	36	41	54	108	169
15	82	4	9	14	21	27	37	241
16	14	10	11	12	17	25	44	90

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	32	70	104	214	309	646	1001
2	32	29	34	47	105	169	393	526
3	44	13	35	48	80	113	189	518
4	34	15	100	192	398	562	700	1182
5	70	25	55	74	103	127	165	407
6	201	14	30	39	54	71	91	253
7	118	7	13	22	32	49	71	186
8	81	8	16	25	42	64	86	189
9	133	3	6	7	9	13	16	34
10	28	17	44	102	163	502	582	664
11	36	25	46	66	86	127	174	490
12	32	17	28	60	339	583	694	766
13	51	9	13	21	56	158	308	650
14	26	4	6	27	52	88	115	143
15	81	2	5	7	20	84	155	650
16	15	3	5	6	6	7	11	16

Tab. 3.1: AKe in $\mu\text{mol I\ddot{A}/g}$: Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	52	8.67	12.23	19.03	46.10	84.26	95.05	97.93
2	34	7.18	11.54	24.89	39.61	69.50	81.24	95.81
3	45	5.28	9.75	11.99	21.17	34.76	73.11	90.95
4	40	10.36	27.18	68.72	98.66	99.50	99.98	100.00
5	75	5.81	8.23	12.95	22.58	44.57	73.81	97.08
6	250	3.23	7.37	8.98	14.40	23.28	39.83	96.87
7	134	6.45	10.21	14.36	23.07	40.05	70.00	98.83
8	92	2.35	4.67	6.99	11.43	21.10	30.02	95.16
9	145	5.18	8.96	10.89	15.32	21.66	42.37	99.20
10	28	15.60	16.33	25.34	48.74	96.42	99.95	100.00
11	42	4.29	7.38	11.19	26.27	46.86	62.74	98.84
12	35	24.27	34.25	71.63	99.68	99.97	100.00	100.00
13	54	5.41	9.06	17.61	89.62	99.85	99.98	100.00
14	36	6.68	10.63	17.01	34.05	90.68	98.51	99.90
15	85	4.54	7.35	10.69	18.88	29.43	45.17	99.90
16	15	3.59	3.78	6.51	15.45	23.58	26.92	99.77

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	50	5.79	7.75	41.71	70.88	94.15	98.36	100.00
2	29	3.33	7.90	10.96	48.98	69.25	82.11	94.27
3	41	4.72	9.35	11.91	18.40	35.26	52.42	96.29
4	37	5.48	16.83	41.23	99.52	99.94	100.00	100.00
5	73	3.43	5.86	8.81	12.69	25.57	52.41	98.44
6	246	2.28	4.51	5.87	7.79	10.37	23.76	98.28
7	120	2.47	5.31	6.55	9.59	16.18	24.01	100.00
8	89	2.64	3.98	4.92	7.32	10.83	18.08	96.55
9	130	2.93	5.35	7.22	10.79	16.18	20.94	37.14
10	27	7.54	10.23	16.67	26.92	79.96	98.48	99.98
11	41	4.52	6.30	7.79	14.10	21.35	71.65	99.79
12	29	43.38	70.77	89.09	98.52	99.92	99.98	100.00
13	47	4.36	6.99	10.61	73.21	99.85	100.00	100.00
14	30	4.28	6.54	9.96	18.60	59.76	83.24	99.94
15	82	1.21	5.15	7.14	12.47	22.77	41.59	100.00
16	14	1.34	2.92	4.84	10.22	16.94	17.65	97.39

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	38	6.74	23.96	89.74	96.18	99.00	99.87	100.00
2	32	3.61	7.56	13.95	83.39	96.40	98.93	100.00
3	44	9.49	37.03	74.10	87.78	96.75	98.59	99.92
4	34	59.10	97.66	98.84	99.85	99.98	100.00	100.00
5	70	7.31	18.83	40.48	70.02	85.70	95.90	99.94
6	201	2.90	6.27	10.04	25.50	56.42	85.25	100.00
7	118	3.38	6.11	8.43	13.18	29.92	71.87	100.00
8	81	2.93	5.76	8.81	12.17	26.52	57.66	97.62
9	133	4.04	7.52	10.98	16.20	25.00	34.62	60.95
10	28	8.71	66.63	86.45	96.52	99.23	99.96	100.00
11	36	7.89	12.15	29.95	65.04	91.50	98.52	99.98
12	32	60.30	87.46	96.92	99.71	99.97	99.99	100.00
13	51	10.22	20.60	82.72	99.04	99.88	100.00	100.00
14	26	11.18	13.61	20.56	53.79	86.35	94.10	99.90
15	81	4.93	9.23	15.52	36.36	95.89	99.75	100.00
16	15	< 0.1	5.17	7.81	16.67	21.67	41.54	42.59

Tab. 3.2: Basensättigung in %: Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	3.08	3.40	3.59	3.96	4.42	4.80	5.47
2	34	2.80	2.98	3.30	3.70	4.00	4.40	5.00
3	45	3.40	3.62	3.73	3.97	4.17	4.35	5.06
4	40	3.10	3.75	4.25	5.60	6.90	7.20	7.50
5	75	2.80	3.20	3.39	3.56	4.05	4.32	5.80
6	250	2.56	3.02	3.22	3.50	3.79	3.99	5.14
7	134	2.60	3.00	3.10	3.30	3.70	4.20	6.40
8	92	2.70	2.97	3.13	3.33	3.55	3.90	5.14
9	145	2.70	2.90	3.00	3.12	3.40	3.70	5.20
10	28	3.02	3.20	3.57	3.92	5.15	5.70	7.40
11	42	3.03	3.16	3.30	3.50	3.76	4.10	5.10
12	35	3.48	3.85	4.30	5.73	7.50	7.60	7.90
13	54	2.83	3.20	3.50	5.05	6.00	7.40	7.50
14	36	2.72	3.32	3.46	3.76	4.65	6.94	7.27
15	85	2.30	2.90	3.10	3.30	3.50	3.90	6.30
16	15	2.80	2.90	3.00	3.20	3.30	3.55	4.70

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	3.60	3.84	4.15	4.43	4.85	5.47	5.90
2	29	3.10	3.70	3.85	4.10	4.40	4.50	4.50
3	41	3.76	4.04	4.12	4.29	4.55	4.85	5.67
4	37	3.40	3.50	3.91	6.67	7.30	7.60	7.70
5	73	3.30	3.60	3.70	3.83	4.02	4.20	5.70
6	246	3.28	3.70	3.80	3.92	4.03	4.20	5.14
7	120	3.00	3.40	3.60	3.87	4.00	4.26	7.10
8	89	2.80	3.65	3.82	3.92	4.15	4.29	5.48
9	130	2.80	3.20	3.60	4.00	4.20	4.36	4.62
10	27	3.40	3.60	3.75	3.91	4.80	7.08	7.70
11	41	3.30	3.60	3.70	3.80	3.99	4.30	6.00
12	29	3.98	4.30	4.88	6.40	7.50	7.70	8.10
13	47	3.30	3.50	3.75	5.20	6.70	7.60	7.70
14	30	3.55	3.65	3.79	3.92	4.38	4.77	5.50
15	82	3.00	3.50	3.60	3.80	4.10	4.40	6.60
16	14	3.60	3.60	3.78	3.98	4.20	4.50	5.00

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	3.60	3.90	4.63	4.99	5.50	5.87	6.30
2	32	3.72	3.80	3.89	4.40	4.83	5.50	7.21
3	44	3.81	3.98	4.32	4.95	5.43	5.62	7.45
4	34	3.90	4.90	7.00	7.30	7.52	7.70	7.90
5	70	3.50	3.60	3.78	4.05	4.36	4.95	7.50
6	201	3.49	3.78	3.87	4.00	4.18	4.60	6.35
7	118	3.10	3.50	3.70	3.86	4.03	4.38	7.20
8	81	3.48	3.76	3.93	4.07	4.20	4.40	6.27
9	133	3.50	3.80	4.00	4.10	4.25	4.45	4.80
10	28	3.70	3.90	4.45	5.32	7.51	7.62	7.70
11	36	3.40	3.70	3.81	4.00	4.55	5.20	7.60
12	32	3.93	4.90	5.58	7.60	7.80	8.20	8.40
13	51	3.30	4.00	4.30	6.00	7.30	7.70	7.90
14	26	3.51	3.67	3.74	4.19	4.61	5.10	6.49
15	81	3.20	3.50	4.00	4.20	4.70	6.20	7.80
16	15	3.80	3.80	3.90	4.10	4.30	4.40	4.40

Tab. 3.3: pH (CaCl₂): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangs-substraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	4.9	9.9	13.7	30.4	85.6	142.5	250.2
2	34	4.6	6.1	11.1	34.1	51.5	68.8	85.6
3	45	1.9	5.8	7.5	11.1	19.1	49.2	91.2
4	40	4.0	14.9	60.3	151.6	275.8	454.1	728.5
5	75	1.4	3.8	6.5	11.7	28.4	54.2	221.8
6	250	0.6	3.3	5.5	8.3	16.3	31.0	304.2
7	35	0.7	2.6	4.3	8.4	17.6	30.3	146.8
8	92	1.1	2.4	3.7	6.8	12.2	24.9	173.0
9	145	0.4	1.1	1.8	2.9	5.8	10.3	135.7
10	28	4.2	6.4	10.9	35.8	85.2	182.3	548.9
11	42	1.2	2.4	4.5	12.4	32.2	55.2	121.7
12	35	15.3	25.6	48.9	199.0	520.7	614.8	743.6
13	54	0.9	2.8	5.2	44.8	212.4	355.7	494.0
14	36	1.3	3.2	6.8	25.8	65.4	354.5	498.7
15	85	0.4	1.5	2.4	5.1	10.6	14.9	95.2
16	15	0.9	1.7	2.0	3.4	7.3	12.0	39.5

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	1.0	2.8	19.3	57.7	104.0	239.2	324.7
2	29	0.6	1.1	3.1	20.9	38.9	132.1	240.7
3	41	0.5	1.7	3.0	4.2	8.2	23.5	66.6
4	37	0.8	5.9	16.8	131.1	200.6	512.0	743.6
5	73	0.1	1.1	1.8	3.8	8.9	25.0	103.1
6	246	0.1	0.7	1.0	1.5	3.1	6.0	141.9
7	120	0.1	0.5	0.6	1.2	2.1	5.2	110.2
8	89	0.4	0.7	1.0	1.6	2.7	5.5	142.3
9	130	< 0.01	0.3	0.4	0.7	1.0	1.6	5.3
10	27	1.0	1.8	3.9	12.4	47.1	475.3	540.9
11	41	0.7	1.0	1.3	2.9	6.4	45.9	78.2
12	29	11.5	23.9	47.4	140.7	434.1	611.8	646.3
13	47	0.4	0.7	1.5	28.9	145.9	274.1	494.0
14	30	0.3	0.7	1.1	3.9	24.0	55.3	143.1
15	82	< 0.01	0.2	0.6	1.3	3.5	7.2	197.8
16	14	0.3	0.4	0.6	0.8	1.3	3.1	9.3

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	1.2	9.0	54.5	119.5	207.5	409.4	631.6
2	32	0.4	1.3	2.5	31.7	105.0	258.6	346.3
3	44	0.6	5.0	17.7	34.0	62.1	86.8	475.1
4	34	10.4	33.9	99.8	254.2	530.9	682.6	1127.7
5	70	0.3	3.0	20.0	33.2	48.9	77.3	256.4
6	201	0.1	0.7	1.5	4.2	16.1	29.1	213.8
7	118	< 0.01	0.3	0.6	1.4	5.1	16.6	150.7
8	81	0.2	0.5	0.6	1.8	4.6	19.1	161.4
9	133	< 0.01	< 0.01	0.2	0.3	0.6	0.9	2.2
10	28	0.7	25.8	59.1	111.5	472.6	551.8	651.9
11	36	0.9	3.0	10.1	23.5	73.8	120.7	479.4
12	32	11.3	22.3	40.5	331.8	551.3	676.4	738.5
13	51	0.1	5.0	11.7	39.7	122.3	294.4	633.7
14	26	< 0.01	0.4	2.7	11.1	44.0	53.5	118.4
15	81	< 0.01	0.1	0.5	3.6	30.7	116.5	631.6
16	15	< 0.01	< 0.01	0.1	0.4	0.7	1.3	2.3

Tab. 3.4: Austauschbarer Kalziumgehalt ($\mu\text{mol I\AA/g}$): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	5.07	8.31	12.24	29.16	52.90	61.06	73.80
2	34	5.00	6.93	13.90	28.96	49.08	61.20	72.96
3	45	2.12	4.09	7.34	12.16	21.81	50.52	61.63
4	40	6.12	18.53	54.12	67.00	88.09	93.45	97.96
5	75	1.26	4.17	6.83	14.20	31.86	50.22	82.76
6	250	0.73	3.33	4.74	8.45	15.30	26.95	82.89
7	134	1.84	4.99	8.12	14.97	29.09	51.32	72.77
8	92	0.72	1.99	3.45	6.16	12.52	19.34	80.44
9	145	1.21	3.34	5.04	8.44	12.94	26.53	77.19
10	28	9.23	10.50	18.55	37.79	70.31	90.52	96.85
11	42	1.59	3.28	5.67	17.06	34.10	42.56	84.36
12	35	17.32	25.97	59.97	88.01	97.95	98.95	99.18
13	54	2.32	6.66	12.69	75.17	88.40	93.53	97.00
14	36	3.09	5.77	9.77	24.13	67.50	88.24	95.90
15	85	1.13	4.36	6.30	12.20	21.40	30.96	89.12
16	15	2.15	3.06	3.99	10.98	17.29	19.78	91.22

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	2.12	4.81	26.30	44.87	57.47	68.03	73.54
2	29	1.32	2.51	6.13	31.64	40.49	54.52	75.67
3	41	1.11	3.54	5.25	7.80	15.52	36.49	74.85
4	37	1.62	8.70	24.56	59.70	85.97	92.37	96.14
5	73	0.08	2.04	3.19	5.93	17.04	31.57	59.91
6	246	0.09	1.37	1.86	2.87	5.03	12.23	77.60
7	120	0.33	1.55	2.02	3.70	7.26	14.07	71.16
8	89	0.80	1.20	1.74	2.77	5.69	10.19	82.23
9	130	< 0.1	1.21	2.03	3.42	4.98	8.02	25.17
10	27	2.38	4.42	10.17	19.34	54.68	93.21	97.09
11	41	1.46	2.39	2.68	5.92	11.98	48.09	81.57
12	29	22.60	57.48	70.64	85.57	95.14	98.49	99.20
13	47	1.66	2.25	5.43	60.71	86.58	93.82	97.86
14	30	1.52	1.84	3.33	10.43	49.78	61.71	84.88
15	82	< 0.1	1.26	2.97	6.32	15.84	28.76	81.94
16	14	0.89	1.57	2.07	4.56	7.90	12.50	80.87

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	2.70	12.10	52.44	59.57	64.23	69.19	74.96
2	32	1.31	3.06	5.36	44.49	67.47	74.43	80.55
3	44	2.22	14.86	35.73	43.22	54.75	61.74	91.71
4	34	19.14	51.95	58.29	78.21	96.29	97.35	98.96
5	70	0.33	5.08	18.30	35.51	48.55	58.62	76.39
6	201	0.14	1.62	3.28	7.34	22.86	44.65	84.54
7	118	< 0.1	1.38	2.17	3.78	10.92	38.05	80.85
8	81	0.57	1.45	2.30	4.88	11.44	27.33	85.41
9	133	< 0.1	< 0.1	1.62	3.77	6.71	8.55	16.39
10	28	1.48	46.17	60.80	71.20	94.78	96.79	98.18
11	36	3.42	4.10	14.78	36.29	59.92	76.30	97.80
12	32	30.61	65.27	77.25	92.79	97.44	98.36	99.54
13	51	1.41	9.66	40.91	75.33	88.78	95.74	98.09
14	26	0.73	3.57	6.71	24.58	55.33	70.90	89.17
15	81	< 0.1	1.46	6.78	19.19	60.00	84.02	98.14
16	15	< 0.1	< 0.1	1.79	6.85	10.00	20.00	20.54

Tab. 3.5: Kalziumsättigung des Kationenaustauschers (%): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	52	1.2	2.7	5.5	14.1	40.6	80.9	175.6
2	34	1.4	1.8	3.0	6.9	9.5	16.4	54.2
3	45	0.7	1.3	1.8	3.0	6.3	10.5	43.7
4	40	1.0	4.4	7.3	16.0	52.8	133.3	163.6
5	75	< 0.01	1.3	2.0	4.1	9.6	18.1	109.2
6	250	0.2	1.2	2.0	2.9	5.2	10.1	47.3
7	134	0.3	0.9	1.4	2.3	3.9	7.5	77.3
8	92	0.6	1.0	1.5	2.2	4.5	8.5	49.4
9	145	0.1	0.3	0.5	0.7	1.7	4.5	46.1
10	28	1.1	1.1	2.0	4.8	16.2	26.8	43.8
11	42	0.6	1.0	1.4	3.5	9.5	16.7	25.0
12	35	< 0.01	2.6	4.6	9.0	15.7	33.9	47.1
13	54	0.4	0.6	1.1	6.8	21.7	38.0	77.3
14	36	0.3	1.2	1.9	3.8	9.8	21.3	35.7
15	85	< 0.01	0.4	0.6	1.2	2.4	4.8	11.9
16	15	0.3	0.4	0.5	0.9	1.2	1.5	2.5

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	50	0.2	0.9	12.1	30.5	65.1	124.6	224.6
2	29	< 0.01	0.3	0.7	4.5	23.8	53.6	90.1
3	41	0.2	0.3	0.4	0.9	1.8	8.1	15.8
4	37	0.6	1.3	7.1	17.8	75.8	128.3	167.8
5	73	< 0.01	0.3	0.6	1.4	3.7	14.0	110.5
6	246	< 0.01	0.2	0.4	0.7	1.2	2.5	40.8
7	120	< 0.01	0.2	0.2	0.4	0.9	2.0	69.7
8	89	< 0.01	0.2	0.3	0.5	1.0	2.6	19.7
9	130	< 0.01	0.1	0.1	0.2	0.3	0.6	2.0
10	27	0.3	0.5	0.8	2.6	16.1	23.7	44.0
11	41	< 0.01	0.3	0.5	1.4	3.3	6.1	30.9
12	29	< 0.01	3.4	7.7	11.7	20.7	42.7	70.7
13	47	< 0.01	0.3	0.5	5.2	16.7	27.9	71.5
14	30	0.2	0.3	0.5	0.9	6.7	16.3	28.0
15	82	< 0.01	0.1	0.2	0.4	0.8	1.5	41.7
16	14	< 0.01	0.1	0.1	0.3	0.4	0.5	1.0

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	38	0.7	5.9	35.1	61.2	95.9	196.8	351.9
2	32	< 0.01	0.6	1.3	16.8	53.9	120.1	154.9
3	44	0.2	2.5	7.7	19.7	31.1	39.0	157.4
4	34	1.1	4.9	11.2	44.4	96.7	144.7	176.9
5	70	0.4	5.7	15.3	22.7	31.9	52.3	145.5
6	201	< 0.01	0.3	0.8	4.9	15.8	27.3	102.3
7	118	< 0.01	0.1	0.3	0.7	4.6	15.1	28.6
8	81	< 0.01	0.1	0.2	0.7	5.8	21.9	41.8
9	133	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.1	0.3	1.1
10	28	0.4	3.0	11.8	17.1	28.6	42.0	93.6
11	36	0.4	2.2	6.3	15.7	30.1	45.3	56.3
12	32	< 0.01	2.6	4.8	9.5	21.4	32.5	39.2
13	51	0.1	1.0	2.6	6.9	17.1	34.9	46.2
14	26	< 0.01	0.2	1.6	8.7	19.1	25.8	42.0
15	81	< 0.01	< 0.01	0.1	1.0	10.8	22.3	113.8
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.3	0.4	0.4

Tab. 3.6: Austauschbarer Magnesiumgehalt ($\mu\text{mol I\ddot{A}/g}$): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	1.31	2.32	4.38	11.79	26.31	32.34	42.53
2	34	1.46	2.11	2.73	5.41	10.28	14.53	31.29
3	45	0.81	1.47	1.73	3.08	5.84	10.04	25.85
4	40	1.28	3.19	5.08	9.36	21.87	31.42	34.46
5	75	< 0.1	1.47	2.12	4.24	8.95	17.14	61.11
6	250	0.27	1.27	1.86	2.75	4.66	8.83	21.07
7	134	1.04	1.60	2.41	3.78	6.80	12.61	35.09
8	92	0.46	0.93	1.19	2.01	4.43	8.17	29.08
9	145	0.46	0.92	1.25	1.95	4.27	9.70	43.13
10	28	2.15	2.42	2.90	4.79	11.89	25.33	32.48
11	42	0.81	1.37	2.19	5.06	7.70	13.90	29.10
12	35	< 0.1	0.81	1.68	4.20	9.03	14.66	31.01
13	54	1.03	1.58	2.30	5.66	10.83	15.22	19.76
14	36	0.78	1.73	2.27	4.75	8.27	15.69	26.93
15	85	< 0.1	1.11	1.48	2.83	5.17	7.73	18.34
16	15	0.54	0.85	1.21	2.49	3.02	3.38	5.77

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	0.42	1.76	10.07	24.13	29.78	37.93	56.27
2	29	< 0.1	0.78	1.51	6.71	15.19	35.84	49.77
3	41	0.61	0.79	0.87	1.88	4.02	10.98	16.45
4	37	0.86	2.15	6.13	11.70	31.91	40.06	41.54
5	73	< 0.1	0.55	1.31	2.63	6.62	17.16	44.94
6	246	< 0.1	0.49	0.91	1.32	2.06	4.97	72.86
7	120	< 0.1	0.57	0.82	1.44	2.61	4.95	38.27
8	89	< 0.1	0.45	0.60	0.89	2.06	3.91	18.19
9	130	< 0.1	0.36	0.56	0.91	1.59	2.89	9.43
10	27	0.69	1.36	2.28	3.76	8.64	19.36	34.12
11	41	< 0.1	0.82	1.50	3.21	5.21	11.85	23.19
12	29	< 0.1	0.88	3.39	9.73	15.48	24.29	37.93
13	47	< 0.1	0.74	1.37	6.25	13.03	15.22	22.74
14	30	0.75	1.10	1.41	2.26	12.07	17.33	25.43
15	82	< 0.1	0.42	0.86	1.61	3.08	6.67	28.67
16	14	< 0.1	0.22	0.71	1.18	2.42	2.63	8.70

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	1.57	11.98	24.05	31.37	36.04	38.69	48.14
2	32	< 0.1	1.26	3.06	16.27	27.32	32.98	89.75
3	44	1.14	4.93	13.55	20.20	30.96	37.38	66.56
4	34	0.52	1.43	2.90	17.92	37.29	39.38	45.00
5	70	1.08	7.75	15.26	23.65	31.36	39.27	63.71
6	201	< 0.1	0.91	1.81	10.04	24.03	34.55	78.72
7	118	< 0.1	0.60	1.11	2.25	11.00	28.46	46.80
8	81	< 0.1	0.39	0.83	1.94	8.35	28.49	48.37
9	133	< 0.1	< 0.1	0.11	0.86	1.59	3.37	9.02
10	28	0.96	1.67	2.81	12.38	20.44	30.46	38.69
11	36	1.44	2.46	6.89	18.57	25.72	36.66	43.96
12	32	< 0.1	1.11	1.91	4.33	13.41	23.57	36.15
13	51	0.74	1.66	5.26	10.55	18.85	26.53	60.19
14	26	0.49	1.51	3.34	14.88	26.87	32.70	40.75
15	81	< 0.1	< 0.1	1.70	5.59	15.15	25.86	46.70
16	15	< 0.1	< 0.1	< 0.1	1.37	3.57	5.00	7.41

Tab. 3.7: Magnesiumsättigung des Kationenaustauschers (%): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangsubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	52	0.6	1.5	2.1	2.8	3.9	5.7	8.0
2	34	0.5	1.5	2.2	3.7	4.8	7.0	16.6
3	45	1.3	1.8	2.8	4.1	6.5	10.1	20.7
4	40	1.0	1.8	2.3	4.1	6.0	8.5	15.2
5	75	0.9	1.4	1.8	2.5	4.2	6.4	12.0
6	250	0.6	1.1	1.5	2.1	2.7	3.8	12.3
7	134	0.1	0.7	1.1	1.8	2.5	3.5	10.7
8	92	0.4	0.8	1.3	1.7	2.7	3.7	8.5
9	145	0.2	0.4	0.6	0.9	1.2	1.5	11.7
10	28	0.7	0.9	1.3	2.5	3.0	4.7	8.0
11	42	0.6	0.9	1.3	2.2	3.4	5.2	8.8
12	35	0.3	0.9	1.0	1.6	2.3	4.2	11.5
13	54	0.2	0.5	0.6	1.0	2.0	3.6	4.8
14	36	0.8	1.0	1.2	2.0	2.9	4.5	22.9
15	85	< 0.01	0.2	0.5	0.9	1.2	1.6	3.0
16	15	0.1	0.1	0.3	0.5	0.8	1.0	1.0

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	50	0.1	0.7	1.1	1.8	2.9	3.6	4.4
2	29	0.3	0.6	1.3	1.8	2.5	5.5	8.5
3	41	0.4	1.0	1.5	2.6	4.9	10.2	19.7
4	37	1.2	1.6	2.1	2.6	4.0	6.4	10.5
5	73	0.4	0.9	1.2	1.7	2.4	3.3	7.5
6	246	0.3	0.7	0.9	1.3	1.7	2.3	5.0
7	120	0.1	0.3	0.6	0.9	1.3	1.9	2.9
8	89	0.1	0.5	0.8	1.0	1.4	2.0	5.1
9	130	0.1	0.3	0.3	0.5	0.6	0.9	3.5
10	27	0.5	0.7	1.2	1.6	2.9	3.5	5.1
11	41	0.6	0.8	0.8	1.2	1.9	3.1	8.0
12	29	0.1	0.5	0.7	1.1	2.1	3.3	6.5
13	47	0.2	0.3	0.5	0.9	1.4	2.9	4.6
14	30	0.1	0.6	0.9	1.1	1.5	2.3	2.6
15	82	< 0.01	0.1	0.2	0.5	0.8	1.1	1.9
16	14	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	38	1.1	1.4	1.8	2.8	4.4	6.5	11.9
2	32	0.5	0.8	1.4	2.2	3.8	6.5	59.3
3	44	0.7	1.5	1.9	4.1	13.4	30.6	71.7
4	34	0.1	1.9	2.9	3.5	4.2	4.9	13.3
5	70	0.8	1.3	1.8	2.5	3.6	4.3	8.7
6	201	0.2	0.6	0.9	1.4	2.1	2.6	12.0
7	118	0.1	0.4	0.7	1.2	1.7	2.3	4.4
8	81	0.1	0.4	0.7	1.1	1.9	2.6	5.2
9	133	< 0.01	0.1	0.2	0.3	0.6	0.8	4.0
10	28	0.6	1.2	1.4	2.6	3.7	4.9	6.7
11	36	0.3	1.1	1.5	2.3	3.3	4.0	7.2
12	32	0.1	0.2	0.4	0.9	1.5	2.5	5.0
13	51	< 0.01	0.2	0.4	1.0	1.7	2.6	4.7
14	26	0.2	0.5	0.7	1.4	1.9	3.4	4.0
15	81	< 0.01	0.1	0.2	0.6	1.5	2.7	6.5
16	15	< 0.01	< 0.01	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5

Tab. 3.8: Austauschbarer Kaliumgehalt ($\mu\text{mol IA/g}$): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	0.66	1.00	1.34	1.88	2.85	3.56	5.24
2	34	0.49	1.05	2.05	3.37	5.04	7.39	13.47
3	45	1.35	1.81	2.40	4.13	6.80	12.28	20.63
4	40	0.38	0.79	1.35	2.02	3.16	5.24	7.88
5	75	0.72	1.26	1.93	2.74	4.47	7.20	9.48
6	250	0.33	0.96	1.26	1.89	2.88	4.20	9.90
7	134	0.16	1.24	1.97	2.82	4.31	6.27	12.54
8	92	0.35	0.78	1.06	1.64	2.51	3.45	7.09
9	145	0.63	1.20	1.65	2.31	3.11	4.03	27.99
10	28	0.12	1.17	1.76	2.53	3.34	4.33	4.45
11	42	0.58	1.18	1.88	2.55	3.52	4.66	6.74
12	35	0.06	0.17	0.30	0.95	1.81	3.00	4.54
13	54	0.16	0.32	0.57	1.15	1.81	2.93	4.54
14	36	0.47	1.07	1.56	2.05	3.22	4.52	7.16
15	85	< 0.1	0.66	1.08	1.94	2.80	3.61	5.92
16	15	0.18	0.33	0.77	1.26	1.63	1.92	3.01

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	0.20	0.67	0.82	1.35	1.98	2.75	5.65
2	29	0.24	0.47	1.55	2.42	4.01	4.63	14.09
3	41	0.93	2.25	2.97	5.49	10.46	15.94	25.29
4	37	0.30	0.62	1.19	2.02	2.63	4.28	5.84
5	73	0.67	1.66	1.96	2.80	3.65	4.47	6.94
6	246	0.66	1.28	1.64	2.24	3.07	4.17	10.82
7	120	0.26	1.16	1.81	2.70	3.63	4.93	7.62
8	89	0.15	1.01	1.39	1.85	2.62	3.28	9.70
9	130	0.49	1.34	1.67	2.31	3.23	4.39	12.96
10	27	0.30	0.67	1.63	2.53	3.56	4.11	6.07
11	41	0.86	1.47	1.98	2.71	3.61	4.41	5.57
12	29	0.06	0.10	0.35	0.63	1.46	3.13	3.51
13	47	0.13	0.37	0.68	1.12	1.79	3.98	7.58
14	30	0.25	0.94	1.87	2.85	3.62	4.63	9.51
15	82	< 0.1	0.74	1.24	2.28	3.73	5.45	9.32
16	14	0.22	0.59	0.68	1.50	2.07	2.63	4.20

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	0.43	0.57	0.95	1.45	1.89	3.99	16.28
2	32	0.49	0.72	1.49	2.34	3.96	5.03	26.57
3	44	0.95	1.50	2.88	5.12	17.83	28.81	40.26
4	34	0.18	0.36	0.57	0.83	1.90	3.65	8.78
5	70	0.89	1.39	2.14	2.66	3.35	4.13	6.00
6	201	0.60	1.59	1.96	2.56	3.59	4.69	20.13
7	118	0.46	1.64	2.57	3.48	4.50	6.10	8.17
8	81	0.23	1.59	2.14	2.66	3.42	4.37	8.39
9	133	< 0.1	1.79	2.80	3.80	5.36	6.77	19.70
10	28	0.12	0.26	0.45	2.10	3.36	3.78	9.27
11	36	0.10	1.43	2.01	2.71	3.45	4.80	6.68
12	32	0.02	0.11	0.20	0.44	0.94	1.93	3.16
13	51	< 0.1	0.25	0.72	1.50	2.40	3.64	13.27
14	26	1.02	1.31	1.64	2.95	4.64	7.91	12.41
15	81	< 0.1	0.32	1.51	2.38	4.53	6.85	22.22
16	15	< 0.1	< 0.1	1.72	3.13	4.55	4.82	6.67

Tab. 3.9: Kaliumsättigung des Kationenaustauschers (%): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	52	< 0.01	< 0.01	0.5	0.7	0.9	1.5	2.4
2	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.8	1.3	1.5
3	45	< 0.01	0.4	0.5	0.6	0.9	1.1	1.6
4	40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.4	0.6	1.2	2.0
5	75	< 0.01	< 0.01	0.2	0.4	0.8	1.0	2.0
6	250	< 0.01	0.3	0.4	0.6	0.9	1.5	4.2
7	134	< 0.01	< 0.01	0.2	0.4	0.7	1.4	4.0
8	92	< 0.01	0.2	0.4	0.6	1.0	1.6	3.7
9	145	< 0.01	0.2	0.4	0.7	1.3	1.9	2.6
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.6	0.8	1.3	1.6
11	42	< 0.01	< 0.01	0.3	0.4	0.8	1.5	2.0
12	35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.3	0.7	1.8	3.9
13	54	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.5	1.4	3.6
14	36	< 0.01	0.1	0.3	0.7	1.0	1.3	7.9
15	85	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.9	2.1
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2	0.6	1.0	1.7

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	50	< 0.01	0.1	0.4	0.7	1.6	2.2	4.3
2	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.9	1.3	1.7
3	41	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.6	3.0
4	37	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.3	0.6	1.6	5.3
5	73	< 0.01	< 0.01	0.2	0.4	0.7	1.0	3.3
6	246	< 0.01	0.2	0.3	0.4	0.7	1.0	4.3
7	120	< 0.01	< 0.01	0.1	0.3	0.5	1.2	2.1
8	89	< 0.01	< 0.01	0.3	0.4	0.9	1.6	4.5
9	130	0.1	0.1	0.3	0.7	1.3	1.8	3.1
10	27	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.6	0.9	1.3	2.1
11	41	< 0.01	< 0.01	0.1	0.4	0.6	1.3	2.2
12	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.5	1.1	2.0	3.4
13	47	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.8	1.2	4.2
14	30	< 0.01	0.1	0.3	0.5	1.0	1.9	6.9
15	82	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.6	1.9
16	14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2	0.5	0.7	1.2

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	38	< 0.01	< 0.01	0.8	1.5	2.8	4.6	6.2
2	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.3	2.4	5.2
3	44	0.3	0.4	1.0	2.0	4.7	8.2	16.7
4	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.5	0.7	1.0	3.3
5	70	< 0.01	< 0.01	0.3	0.7	1.0	2.0	12.9
6	201	< 0.01	0.2	0.3	0.5	0.8	1.6	3.8
7	118	< 0.01	< 0.01	0.1	0.3	0.7	1.4	3.4
8	81	< 0.01	0.1	0.2	0.4	1.0	1.8	5.5
9	133	< 0.01	0.1	0.2	0.6	1.2	1.8	5.2
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.9	1.3	1.9	4.3
11	36	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.5	1.0	1.9	10.0
12	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2	1.2	2.1	13.1
13	51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.7	1.7	8.8
14	26	< 0.01	0.2	0.4	0.6	1.0	2.3	3.0
15	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.5	2.9
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2	0.5	0.9	0.9

Tab. 3.10: Austauschbarer Natriumgehalt ($\mu\text{mol I\ddot{A}/g}$): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	< 0.01	< 0.01	0.36	0.44	0.65	0.92	1.57
2	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.61	0.88	1.14
3	45	0.04	0.36	0.49	0.62	0.76	1.37	1.85
4	40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.15	0.36	0.73	1.50
5	75	< 0.01	< 0.01	0.23	0.45	0.78	1.06	2.30
6	250	< 0.01	0.29	0.39	0.52	0.77	1.26	4.19
7	134	< 0.01	< 0.01	0.31	0.63	1.14	2.28	5.53
8	92	0.03	0.18	0.35	0.52	0.85	1.32	4.18
9	145	< 0.01	0.38	0.84	1.82	3.66	5.39	11.17
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.52	1.11	1.43	3.68
11	42	< 0.01	< 0.01	0.30	0.46	0.83	1.82	3.72
12	35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.04	0.57	1.19	3.84
13	54	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.80	1.43	4.49
14	36	< 0.01	0.16	0.35	0.58	1.16	1.53	5.43
15	85	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.30	5.54
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.66	1.44	2.60	2.75

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	< 0.01	0.10	0.42	0.58	1.03	1.53	2.90
2	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.91	1.57	2.40
3	41	0.30	0.73	0.99	1.26	2.13	2.86	4.54
4	37	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.18	0.40	1.59	4.81
5	73	< 0.01	< 0.01	0.33	0.62	0.97	1.49	6.42
6	246	< 0.01	0.30	0.52	0.76	1.19	1.94	5.98
7	120	< 0.01	< 0.01	0.36	0.84	1.56	3.48	9.84
8	89	< 0.01	0.16	0.53	0.86	1.78	2.66	6.78
9	130	0.34	0.61	1.33	2.92	6.61	9.79	27.62
10	27	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.78	1.59	2.94	3.13
11	41	< 0.01	< 0.01	0.22	0.65	1.30	2.93	6.85
12	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.28	1.10	1.95	3.84
13	47	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.06	2.28	7.86
14	30	< 0.01	0.24	0.66	1.13	2.68	4.31	8.81
15	82	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.21	9.20
16	14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.95	2.55	6.73	9.76

Tiefenstufe 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	< 0.01	< 0.01	0.41	0.61	1.46	2.40	8.77
2	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.76	1.28	2.48
3	44	0.54	0.89	1.11	2.84	6.15	8.48	9.38
4	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.12	0.29	0.83	13.51
5	70	< 0.01	< 0.01	0.25	0.80	1.21	1.85	7.16
6	201	< 0.01	0.30	0.54	0.92	1.74	2.75	7.22
7	118	< 0.01	< 0.01	0.44	0.93	2.30	3.84	11.60
8	81	< 0.01	0.28	0.63	1.27	2.20	4.18	9.35
9	133	< 0.01	0.99	2.69	6.12	12.12	20.44	49.52
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.28	0.92	2.53	10.73
11	36	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.65	1.23	2.61	9.68
12	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.23	1.26	2.56	4.55
13	51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.95	5.26	13.64
14	26	< 0.01	0.53	0.70	1.47	3.24	8.56	13.77
15	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.80	27.27
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.34	7.70	13.85	16.67

Tab. 3.11: Natriumsättigung des Kationenaustauschers (%): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	2.0	6.6	21.2	58.4	85.2	117.4	136.0
2	34	2.0	17.2	27.8	48.7	62.3	88.0	122.8
3	45	4.3	24.8	43.4	71.2	90.8	111.5	141.8
4	40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.7	16.5	41.3	83.9
5	75	0.2	16.6	32.7	54.0	70.8	84.3	117.9
6	250	4.0	35.0	51.6	71.3	85.1	99.0	140.3
7	134	< 0.01	7.7	13.3	25.0	37.0	47.0	69.3
8	92	5.2	37.5	48.7	73.0	94.6	125.2	169.7
9	145	< 0.01	6.1	8.4	15.4	24.2	33.5	53.5
10	28	< 0.01	< 0.01	2.8	27.3	35.5	56.7	83.6
11	42	1.4	16.4	24.9	43.5	61.9	88.8	107.7
12	35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.7	16.4	44.0	85.8
13	54	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.8	25.8	40.2	93.8
14	36	< 0.01	3.7	7.6	32.1	41.1	62.4	86.1
15	85	< 0.01	10.7	14.5	22.9	30.3	38.5	87.1
16	15	< 0.01	6.6	12.6	21.6	26.6	39.1	50.2

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	< 0.01	2.2	8.7	28.0	41.8	67.8	105.6
2	29	11.6	17.0	32.4	39.5	53.3	77.8	103.0
3	41	1.3	21.3	27.0	40.1	49.5	55.0	67.2
4	37	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.4	38.9	49.9	93.8
5	73	0.2	25.4	36.5	42.0	52.4	65.4	109.5
6	246	0.8	30.1	38.8	46.1	55.2	64.5	81.9
7	120	< 0.01	11.8	18.7	25.2	33.1	44.0	102.8
8	89	3.3	25.5	36.1	44.8	55.7	65.9	133.8
9	130	3.4	7.3	10.5	16.6	21.5	26.4	43.8
10	27	< 0.01	1.8	10.6	33.4	41.6	52.2	58.7
11	41	< 0.01	17.6	26.5	35.4	44.4	65.3	80.3
12	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.9	5.7	17.9	30.2
13	47	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.4	22.1	32.0	88.9
14	30	< 0.01	4.1	13.8	26.5	33.4	36.5	42.8
15	82	< 0.01	4.9	9.8	14.6	20.2	28.4	54.7
16	14	< 0.01	7.1	8.8	12.9	21.9	38.7	88.0

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	< 0.01	< 0.01	1.9	7.4	19.6	55.5	113.4
2	32	< 0.01	1.7	4.4	21.7	37.2	42.3	119.5
3	44	< 0.01	1.2	3.2	7.7	10.9	24.5	37.6
4	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2	2.2	9.6	39.5
5	70	< 0.01	4.0	11.5	23.3	46.7	69.2	170.4
6	201	< 0.01	7.9	18.9	29.9	40.5	56.5	83.7
7	118	< 0.01	7.5	12.1	20.4	32.4	45.3	109.5
8	81	3.3	11.1	18.9	25.8	38.2	55.6	97.3
9	133	2.4	4.3	4.8	6.4	9.7	13.9	28.4
10	28	< 0.01	< 0.01	1.5	5.7	14.9	27.2	40.4
11	36	< 0.01	1.4	10.5	19.2	44.9	57.3	66.7
12	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.5	3.4	10.3
13	51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.4	7.7	27.3	59.2
14	26	< 0.01	1.3	3.9	13.8	28.7	42.3	57.0
15	81	< 0.01	< 0.01	1.6	4.7	11.3	24.4	69.6
16	15	2.4	2.9	4.3	5.2	5.6	7.5	14.1

Tab. 3.12: Austauschbarer Aluminiumgehalt (AKE in $\mu\text{mol IA/g}$): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	1.06	2.13	12.93	45.74	67.31	77.73	85.70
2	34	1.63	16.05	26.47	50.01	63.54	75.11	92.51
3	45	5.10	23.02	56.94	70.40	80.58	83.27	92.95
4	40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.32	16.59	52.96	74.63
5	75	0.12	14.89	37.91	59.27	68.36	73.24	85.16
6	250	2.39	42.31	55.64	66.06	74.03	82.49	94.16
7	134	< 0.01	15.39	29.82	46.60	55.86	65.93	76.09
8	92	2.43	41.89	56.85	66.37	75.85	82.21	93.02
9	145	< 0.01	17.62	28.09	44.09	58.06	68.39	90.73
10	28	< 0.01	< 0.01	2.38	40.18	57.63	62.58	76.89
11	42	1.01	16.30	33.44	54.04	71.88	80.03	83.91
12	35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.14	23.15	55.21	66.47
13	54	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.02	61.71	73.49	79.23
14	36	< 0.01	1.48	6.78	43.45	61.18	71.00	79.15
15	85	< 0.01	27.19	42.19	55.22	68.77	76.10	87.04
16	15	< 0.01	31.58	39.84	46.69	59.20	70.32	76.99

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	< 0.01	1.34	4.91	24.84	56.70	83.86	93.21
2	29	4.61	17.83	28.10	50.68	84.20	91.67	96.17
3	41	1.78	39.27	60.68	78.36	83.21	85.54	92.69
4	37	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.11	43.13	79.62	89.86
5	73	0.14	39.63	66.35	79.77	85.28	89.72	94.55
6	246	0.66	68.55	78.70	84.79	89.22	92.29	95.81
7	120	< 0.01	60.84	74.10	81.70	88.25	91.61	96.03
8	89	1.93	68.06	76.75	86.04	90.49	93.48	95.45
9	130	24.29	46.15	67.80	82.36	88.97	91.75	95.73
10	27	< 0.01	1.33	18.47	66.19	79.54	85.13	90.62
11	41	< 0.01	26.40	68.51	77.83	83.67	89.88	92.07
12	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.33	6.38	27.24	46.00
13	47	< 0.01	< 0.01	< 0.01	19.95	76.12	86.52	89.78
14	30	< 0.01	10.69	39.18	71.20	83.39	85.07	88.32
15	82	< 0.01	50.60	64.16	76.24	88.31	93.09	96.22
16	14	< 0.01	28.63	76.55	84.16	90.83	95.91	98.32

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	< 0.01	< 0.01	1.02	3.33	7.90	68.13	92.36
2	32	< 0.01	0.71	3.09	15.54	84.29	92.19	96.07
3	44	< 0.01	1.06	2.88	9.25	21.28	56.89	85.55
4	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.04	1.08	1.95	38.39
5	70	< 0.01	3.12	12.33	25.95	56.20	73.12	92.75
6	201	< 0.01	13.41	38.73	67.76	83.97	91.14	95.97
7	118	< 0.01	23.15	61.09	81.24	87.27	91.34	94.20
8	81	1.77	37.15	65.54	83.31	89.66	92.89	96.51
9	133	32.38	57.97	70.09	79.56	86.15	90.50	93.94
10	28	< 0.01	< 0.01	0.84	2.84	12.45	31.62	90.86
11	36	< 0.01	1.16	7.50	30.92	65.32	83.81	86.52
12	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.04	12.09	27.95
13	51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.20	15.81	74.12	89.78
14	26	< 0.01	2.78	11.36	38.58	76.61	82.46	82.89
15	81	< 0.01	< 0.01	2.37	56.52	79.66	87.04	94.62
16	15	53.70	55.39	71.67	78.79	87.90	91.38	92.31

Tab. 3.13: Aluminiumsättigung des Kationenaustauschers (%): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	52	< 0.01	<0.01	1.2	2.6	4.9	6.3	28.8
2	34	< 0.01	<0.01	< 0.01	< 0.01	3.9	7.5	10.7
3	45	1.0	1.9	3.4	5.4	7.6	9.4	15.7
4	40	< 0.01	<0.01	< 0.01	1.3	4.9	12.5	41.3
5	75	< 0.01	<0.01	0.4	2.7	8.1	15.7	39.4
6	250	< 0.01	0.8	1.8	3.7	7.1	11.5	37.5
7	134	< 0.01	<0.01	0.2	1.7	3.9	8.6	23.5
8	92	< 0.01	0.1	0.5	2.0	6.7	10.2	19.4
9	145	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2	0.7	1.9	9.9
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.5	6.0	9.0	15.0
11	42	< 0.01	< 0.01	0.1	1.4	6.4	9.5	35.6
12	35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	1.4	3.9	9.5
13	54	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.4	3.8
14	36	< 0.01	< 0.01	0.4	2.4	5.2	10.8	27.2
15	85	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.5
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.3

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	50	< 0.01	< 0.01	0.4	0.9	1.6	2.6	4.4
2	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.3	2.0	4.8
3	41	0.3	0.6	0.8	1.2	1.6	4.1	4.4
4	37	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2	0.9	5.1	7.3
5	73	< 0.01	< 0.01	0.3	1.1	2.4	5.5	9.8
6	246	< 0.01	0.5	1.0	1.7	2.7	4.1	11.5
7	120	< 0.01	< 0.01	0.1	0.8	1.5	2.5	6.1
8	89	< 0.01	0.1	0.5	1.4	2.5	4.4	9.5
9	130	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.4	0.7	2.7
10	27	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.6	1.9	3.9	4.9
11	41	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.0	2.3	4.7	5.1
12	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.3	0.6	1.3	2.4
13	47	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.3	1.0
14	30	< 0.01	< 0.01	0.5	1.1	2.2	4.0	4.8
15	82	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.8
16	14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2	0.9

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	38	< 0.01	< 0.01	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2
2	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.4	0.9	1.2
3	44	< 0.01	0.2	0.3	0.4	0.5	0.9	5.0
4	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.0	0.2	0.4	1.0
5	70	< 0.01	< 0.01	0.1	0.5	0.8	1.8	6.4
6	201	< 0.01	0.2	0.4	0.8	1.6	2.4	6.7
7	118	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.4	0.7	1.4	3.4
8	81	< 0.01	< 0.01	0.1	0.5	1.1	1.6	5.1
9	133	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.2	0.8
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2	0.5	0.8	2.3
11	36	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.6	0.9	1.3	1.8
12	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.3	0.6	1.3
13	51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.4
14	26	< 0.01	< 0.01	0.1	0.8	1.4	2.6	4.4
15	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.4
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.4

Tab. 3.14: Austauschbarer Mangengehalt ($\mu\text{mol IA/g}$): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	< 0.01	< 0.01	0.79	1.93	3.24	4.66	22.49
2	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.44	6.53	8.45
3	45	0.81	2.21	3.25	5.34	6.87	8.31	21.44
4	40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.47	2.50	13.32	23.85
5	75	< 0.01	< 0.01	0.28	2.77	9.87	16.81	25.99
6	250	< 0.01	0.65	1.41	3.45	7.46	12.27	27.08
7	134	< 0.01	< 0.01	0.41	2.47	7.08	14.08	35.14
8	92	< 0.01	0.16	0.45	1.72	6.08	10.82	17.65
9	145	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.55	1.87	4.60	26.98
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.69	5.79	14.50	20.55
11	42	< 0.01	< 0.01	0.20	1.89	7.41	12.29	44.95
12	35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.07	0.97	4.54	7.68
13	54	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.31	11.99
14	36	< 0.01	0.06	0.24	3.01	6.94	14.67	20.32
15	85	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	10.42
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	0.58

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	< 0.01	0.03	0.32	0.68	1.78	3.34	3.72
2	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.82	3.05	5.90
3	41	0.46	1.38	1.63	2.46	3.71	5.75	6.78
4	37	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.08	0.96	4.64	10.67
5	73	< 0.01	< 0.01	0.61	1.97	4.21	7.04	15.49
6	246	< 0.01	1.07	1.82	2.87	4.47	6.90	18.00
7	120	< 0.01	< 0.01	0.26	2.14	4.85	9.14	15.71
8	89	< 0.01	0.16	0.94	2.53	4.76	7.94	20.98
9	130	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.53	2.12	3.62	21.09
10	27	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.06	3.70	8.56	11.77
11	41	< 0.01	< 0.01	0.21	1.95	4.66	9.92	15.64
12	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.08	0.65	2.50	4.45
13	47	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.21	3.10
14	30	< 0.01	0.06	0.76	1.96	5.56	11.46	12.13
15	82	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.08
16	14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.38	3.63

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	< 0.01	< 0.01	0.04	0.19	0.66	1.41	3.41
2	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.15	0.77	1.82
3	44	< 0.01	0.09	0.21	0.47	1.17	2.71	8.25
4	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.06	0.10	1.23
5	70	< 0.01	< 0.01	0.08	0.51	0.98	2.14	8.25
6	201	< 0.01	0.50	0.88	1.50	2.85	4.45	9.74
7	118	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.21	2.30	4.18	14.47
8	81	< 0.01	< 0.01	0.34	1.19	2.62	4.64	10.12
9	133	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.91	2.78	6.56
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.06	0.42	0.71	1.60
11	36	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.66	1.32	2.12	3.31
12	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.26	1.85	2.95
13	51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.10	2.96
14	26	< 0.01	0.03	0.41	1.38	2.89	4.53	8.74
15	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.56
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.67

Tab. 3.15: Mangansättigung des Kationenaustauschers (%): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2	0.8	3.5	9.8
2	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.0	14.7
3	45	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.6	1.2	6.2
4	40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.7	12.4
5	75	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.7	3.7	9.5	19.3
6	250	< 0.01	< 0.01	0.3	1.4	5.9	11.1	28.5
7	134	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.4	2.3	6.0	16.7
8	92	< 0.01	0.3	1.0	4.5	8.3	11.3	29.5
9	145	< 0.01	< 0.01	0.5	1.0	1.8	3.4	8.9
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	2.6	5.6
11	42	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.8	2.9	6.3	21.2
12	35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.8	4.3	16.7
13	54	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.3	7.0
14	36	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2	1.1	5.6	19.7
15	85	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.0	1.9	7.9
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.7	2.5	4.0

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.4	2.0
2	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2	0.9
3	41	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.7
4	37	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.1	0.5
5	73	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.2	3.1
6	246	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.5	9.7
7	120	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.7	3.7
8	89	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.5	1.0	5.3
9	130	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.6	1.5	5.3
10	27	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.6
11	41	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.5	1.6
12	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.2	1.2
13	47	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.2	6.2
14	30	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.6	5.4
15	82	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.0	2.7
16	14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.9	1.1	12.4

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.3	0.7
2	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1
3	44	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.7
4	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.1	0.1
5	70	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.1	0.9
6	201	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	5.5
7	118	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	1.3
8	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	1.2
9	133	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.5	1.5
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1
11	36	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.5
12	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.4
13	51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.9
14	26	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.6	4.5
15	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.7
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.4

Tab. 3.16: Austauschbarer Eisengehalt ($\mu\text{mol I\AA/g}$): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.20	0.71	2.95	7.66
2	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.35	9.20
3	45	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.16	0.49	1.22	4.10
4	40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	0.63	12.46
5	75	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.74	3.58	7.88	14.65
6	250	< 0.01	< 0.01	0.26	1.33	4.60	8.45	20.43
7	134	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.68	3.90	7.39	18.85
8	92	< 0.01	0.28	0.98	3.40	6.87	8.59	19.18
9	145	< 0.01	< 0.01	1.30	2.82	4.37	5.99	20.79
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.20	2.26	4.49
11	42	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.97	3.84	5.84	13.26
12	35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.76	3.47	14.23
13	54	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.61	13.14
14	36	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.40	1.93	6.22	14.78
15	85	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.22	10.66
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.11	5.48	8.13

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.04	0.35	3.90
2	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.19	1.86
3	41	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.21	1.13
4	37	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.04	0.17	0.87
5	73	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.11	0.42	4.94
6	246	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.24	0.88	20.85
7	120	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.17	2.14	11.11
8	89	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.04	0.74	2.69	8.31
9	130	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.92	5.09	18.34
10	27	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.21	1.31
11	41	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.13	0.97	4.00
12	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.06	0.22	2.42
13	47	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.28	12.14
14	30	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02	0.26	2.32	9.95
15	82	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	14.44
16	14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.81	6.21	50.00

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.13	0.41
2	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.21
3	44	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.15	1.87
4	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02	0.07	0.12
5	70	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.05	0.10	1.67
6	201	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.09	22.13
7	118	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.33	4.36
8	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.24	3.28
9	133	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.28	3.15	19.23
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01
11	36	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.13	0.78
12	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.25	0.87
13	51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	5.28
14	26	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.37	1.02	3.88
15	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	7.69
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	7.14

Tab. 3.17: Eisensättigung des Kationenaustauschers (%): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.9	6.0	11.0	28.6
2	34	< 0.01	< 0.01	0.8	3.5	14.7	21.6	40.0
3	45	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.7	4.0	6.0	12.0
4	40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.7	4.5	8.0
5	75	< 0.01	< 0.01	1.0	6.0	10.8	17.8	36.9
6	250	< 0.01	1.0	3.1	7.0	16.0	28.0	55.0
7	134	< 0.01	< 0.01	3.4	9.2	16.0	23.7	44.4
8	92	< 0.01	1.6	5.8	12.6	19.0	25.0	35.0
9	145	< 0.01	3.7	5.8	10.5	15.6	21.4	43.4
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.7	6.6	9.0	22.8
11	42	< 0.01	1.9	3.7	7.4	12.5	16.5	34.2
12	35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.0	7.0	18.9
13	54	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.0	14.1	18.9
14	36	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.0	7.5	10.0	57.0
15	85	< 0.01	2.4	4.3	8.1	12.4	26.6	62.3
16	15	< 0.01	7.4	7.8	10.7	19.0	24.1	30.6

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.0	3.3	10.0
2	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.0	3.8	5.2
3	41	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.0	8.0
4	37	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.7	4.0	6.0
5	73	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.9	2.0	4.3	8.0
6	246	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.0	3.0	5.0	12.0
7	120	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2	1.6	4.4	20.8
8	89	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.6	2.0	4.0	18.8
9	130	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.1	6.3	13.1
10	27	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.4	2.5	4.0	9.5
11	41	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.1	2.0	5.0	18.4
12	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.5	3.0
13	47	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.4	3.3	8.4
14	30	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	2.0	3.0	8.0
15	82	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.3	2.1	3.2	7.2
16	14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.3	1.0	2.1

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.0	3.0	7.0
2	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.7	1.0	3.8
3	44	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.0	4.0	7.0
4	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.4	4.6
5	70	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.0	3.4	5.1	9.0
6	201	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.0	2.6	4.0	10.0
7	118	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.4	2.8	7.0
8	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.0	3.0	8.0
9	133	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.9
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.4	2.5	3.8
11	36	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.8	3.0	5.2	7.1
12	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.0
13	51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.1	0.9	8.6
14	26	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.6	2.0	5.0	8.0
15	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.7	3.0	14.2
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.2	0.5	0.6

Tab. 3.18: Austauschbarer H⁺-Gehalt (μmol IÄ/g): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.42	4.66	8.26	18.10
2	34	< 0.01	< 0.01	0.85	3.19	16.04	20.91	27.75
3	45	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.61	3.82	5.62	9.23
4	40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.34	5.29	12.12
5	75	< 0.01	< 0.01	1.02	6.33	10.75	16.92	30.78
6	250	< 0.01	1.12	3.57	7.00	13.23	18.86	39.73
7	134	< 0.01	< 0.01	6.75	16.60	23.87	35.45	57.41
8	92	< 0.01	1.77	5.21	10.28	16.13	21.47	47.40
9	145	< 0.01	7.06	17.84	29.09	41.69	51.56	66.48
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.30	7.56	14.25	26.71
11	42	< 0.01	2.42	5.09	7.88	13.23	16.38	29.23
12	35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.98	5.96	30.68
13	54	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	12.52	26.03	44.92
14	36	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.08	11.19	15.87	32.20
15	85	< 0.01	7.58	10.22	20.04	28.96	42.56	57.69
16	15	< 0.01	16.41	25.36	31.99	35.96	42.86	49.55

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.72	5.40	7.96
2	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.32	3.62	8.04
3	41	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	5.71	12.90
4	37	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.85	5.16	10.71
5	73	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.12	2.90	7.32	14.29
6	246	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.89	4.55	8.00	23.53
7	120	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.50	3.62	11.07	64.29
8	89	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.76	4.30	7.84	29.32
9	130	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	8.75	33.03	56.43
10	27	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.31	3.32	5.79	8.70
11	41	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.12	4.08	8.89	21.98
12	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	0.46	5.88
13	47	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.45	8.58	18.74
14	30	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.12	4.88	7.23	15.68
15	82	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.70	9.63	19.65	34.21
16	14	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.42	2.63	4.81	6.90

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.23	2.02	7.45
2	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.19	0.70	3.16
3	44	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.37	4.92	7.22
4	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.07	3.88
5	70	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.04	3.36	5.38	10.59
6	201	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.02	4.88	6.67	23.53
7	118	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.89	6.82	21.74
8	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.38	4.72	13.95
9	133	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	28.07
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.29	2.00	3.44
11	36	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.53	3.80	5.65	8.77
12	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	8.11
13	51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.08	2.34	5.40
14	26	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.73	4.00	6.25	9.62
15	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.92	6.44	12.63
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.56	5.36	6.02

Tab. 3.19: H⁺-Sättigung des Kationenaustauschers (%): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	< 0.01	< 0.01	0.05	1.90	5.31	14.25	22.66
2	34	< 0.01	< 0.01	0.85	3.19	18.11	21.23	34.20
3	45	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.07	4.50	6.68	9.98
4	40	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02	0.84	5.46	19.90
5	75	< 0.01	< 0.01	1.39	8.62	14.03	20.75	34.62
6	250	< 0.01	1.52	4.20	8.15	17.91	27.56	44.52
7	134	< 0.01	0.48	7.01	19.57	28.78	38.75	57.41
8	92	< 0.01	2.71	7.84	14.88	22.47	28.23	54.60
9	145	< 0.01	10.65	20.81	33.59	45.69	53.85	67.88
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.30	8.62	14.25	31.19
11	42	< 0.01	3.03	7.08	10.60	17.44	22.09	35.69
12	35	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	2.64	8.30	37.66
13	54	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.53	13.08	39.18	49.20
14	36	< 0.01	< 0.01	0.09	4.99	14.17	27.57	38.42
15	85	< 0.01	8.32	10.97	20.04	31.44	46.26	60.50
16	15	< 0.01	16.41	27.47	31.99	39.26	47.90	53.65

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.06	0.74	5.44	11.74
2	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.32	4.24	8.04
3	41	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.35	6.00	12.90
4	37	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	0.85	5.16	10.71
5	73	< 0.01	< 0.01	0.11	1.12	3.13	7.45	17.84
6	246	< 0.01	< 0.01	0.11	2.19	5.21	8.77	28.78
7	120	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.30	4.40	13.18	64.29
8	89	< 0.01	< 0.01	0.04	1.34	5.46	8.58	37.63
9	130	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.50	13.42	34.15	56.57
10	27	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.31	3.63	5.79	8.70
11	41	< 0.01	< 0.01	0.57	2.15	5.34	9.42	21.98
12	29	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.06	0.46	8.30
13	47	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	4.30	15.00	30.06
14	30	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.79	5.99	10.55	17.87
15	82	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1.70	9.90	24.07	34.21
16	14	< 0.01	< 0.01	0.57	2.95	4.81	13.10	50.00

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.28	2.15	7.45
2	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.19	0.70	3.22
3	44	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.44	4.92	7.22
4	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	0.09	3.88
5	70	< 0.01	< 0.01	0.14	2.06	3.64	5.38	10.59
6	201	< 0.01	< 0.01	< 0.01	2.11	4.94	7.14	26.13
7	118	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.25	3.04	7.22	21.74
8	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.14	2.78	4.77	13.95
9	133	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.33	5.62	28.38
10	28	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.29	2.00	3.44
11	36	< 0.01	< 0.01	0.05	1.53	3.82	5.69	8.77
12	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.25	8.98
13	51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.09	2.84	5.75
14	26	< 0.01	< 0.01	0.04	1.19	4.47	8.51	9.62
15	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.57	7.84	13.57
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	3.33	6.02	7.14

Tab. 3.20: Sättigung des Kationenaustauschers mit starken Säuren (Prozentualer Anteil der Ionen Fe + H an der Ake): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	0.18	2.29	3.15	3.90	6.10	7.98	10.47
2	34	0.64	1.84	2.60	4.96	6.31	9.40	15.50
3	45	0.13	3.88	4.42	7.75	9.22	12.80	16.27
4	40	< 0.01	1.30	2.50	3.85	6.15	9.80	12.80
5	75	1.30	2.34	3.40	5.05	6.90	9.63	19.35
6	250	0.20	3.16	4.32	5.71	7.73	10.55	27.30
7	134	0.30	2.10	2.90	3.99	5.76	8.00	16.60
8	92	0.30	3.84	4.97	6.13	8.44	11.34	26.31
9	145	< 0.01	1.10	1.60	2.40	3.64	5.04	10.10
10	28	0.80	1.40	1.91	3.24	4.62	7.42	10.07
11	42	1.22	1.90	2.90	4.08	6.40	9.10	25.83
12	35	0.80	1.50	2.10	2.75	5.00	7.26	8.32
13	54	0.90	1.40	1.70	2.42	3.68	6.00	8.70
14	36	0.09	1.35	2.32	3.63	6.24	9.18	23.09
15	85	0.90	1.30	1.80	2.30	3.10	5.10	15.90
16	15	0.90	1.00	1.80	2.20	3.80	4.70	5.57

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	50	0.34	0.55	0.72	1.08	1.99	3.17	4.68
2	29	0.18	0.40	0.70	0.98	1.60	2.20	5.70
3	41	0.30	0.85	1.42	1.80	2.94	4.12	7.12
4	37	< 0.01	0.50	0.80	1.17	1.70	3.80	7.43
5	73	0.16	0.40	0.60	0.90	1.37	1.60	4.96
6	246	0.24	0.67	0.97	1.38	1.99	2.79	10.63
7	120	0.10	0.40	0.50	0.80	1.10	1.50	6.70
8	89	0.23	0.83	1.06	1.53	2.13	3.49	4.82
9	130	0.09	0.40	0.60	0.87	1.20	1.69	2.80
10	27	0.30	0.40	0.50	0.70	1.02	1.36	4.56
11	41	0.20	0.30	0.50	0.70	1.10	1.50	2.91
12	29	0.20	0.30	0.60	1.10	1.80	3.54	7.07
13	47	< 0.01	0.10	0.30	0.70	1.10	2.60	6.40
14	30	0.23	0.40	0.72	0.99	1.49	1.67	6.84
15	82	< 0.01	0.20	0.30	0.50	0.90	1.40	4.20
16	14	0.20	0.20	0.30	0.60	1.00	1.70	4.00

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	38	0.10	0.14	0.21	0.36	0.57	0.72	4.80
2	32	< 0.01	0.10	0.19	0.30	0.40	0.53	1.30
3	44	0.11	0.16	0.21	0.32	0.63	0.99	2.08
4	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.60	2.10	5.60	7.00
5	70	< 0.01	0.10	0.14	0.20	0.30	0.42	5.50
6	201	0.07	0.15	0.22	0.31	0.42	0.67	3.30
7	118	< 0.01	< 0.01	0.10	0.10	0.20	0.40	1.34
8	81	< 0.01	0.16	0.19	0.27	0.37	0.65	4.01
9	133	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.10	0.17	0.30	4.30
10	28	< 0.01	0.10	0.17	0.20	0.36	1.07	1.38
11	36	< 0.01	0.10	0.10	0.18	0.23	0.36	0.95
12	32	< 0.01	< 0.01	0.10	0.48	1.35	2.60	4.30
13	51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.10	0.20	1.10	4.50
14	26	0.05	0.08	0.19	0.24	0.46	1.10	1.24
15	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.20	0.30	1.60
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.08	0.10	0.10

Tab. 3.21: Kohlenstoffgehalt (%): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	52	0.03	0.18	0.23	0.30	0.40	0.53	0.77
2	34	0.10	0.15	0.17	0.24	0.31	0.40	0.65
3	45	< 0.01	0.21	0.34	0.43	0.64	0.74	1.01
4	40	0.11	0.14	0.18	0.27	0.39	0.60	0.91
5	75	0.09	0.15	0.20	0.28	0.40	0.60	0.89
6	250	0.04	0.19	0.24	0.31	0.42	0.51	1.58
7	134	0.06	0.10	0.15	0.21	0.29	0.41	0.73
8	92	0.03	0.19	0.25	0.30	0.43	0.54	0.99
9	145	< 0.01	0.04	0.07	0.10	0.16	0.21	3.88
10	28	0.06	0.07	0.12	0.19	0.27	0.39	0.64
11	42	0.07	0.10	0.16	0.25	0.34	0.49	1.04
12	35	0.03	0.11	0.17	0.25	0.40	0.62	0.69
13	54	0.04	0.07	0.09	0.17	0.25	0.44	0.59
14	36	< 0.01	0.08	0.16	0.24	0.33	0.58	0.97
15	85	0.03	0.05	0.07	0.09	0.15	0.25	0.77
16	15	0.05	0.05	0.05	0.10	0.15	0.19	0.24

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	50	< 0.01	0.04	0.07	0.10	0.17	0.25	0.42
2	29	< 0.01	< 0.01	0.02	0.09	0.20	0.49	0.77
3	41	0.05	0.08	0.12	0.17	0.26	0.35	0.47
4	37	< 0.01	< 0.01	0.04	0.10	0.14	0.17	0.70
5	73	< 0.01	< 0.01	0.04	0.07	0.12	0.14	0.56
6	246	0.02	0.07	0.09	0.12	0.16	0.21	0.61
7	120	< 0.01	< 0.01	0.03	0.05	0.07	0.12	0.64
8	89	0.04	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.27
9	130	< 0.01	< 0.01	0.03	0.04	0.05	0.07	0.13
10	27	< 0.01	0.02	0.03	0.06	0.08	0.11	0.70
11	41	< 0.01	0.02	0.04	0.05	0.10	0.12	0.42
12	29	0.01	0.02	0.05	0.10	0.16	0.34	0.64
13	47	< 0.01	< 0.01	0.02	0.04	0.08	0.12	0.33
14	30	< 0.01	0.03	0.05	0.08	0.12	0.16	0.29
15	82	< 0.01	< 0.01	0.01	0.02	0.04	0.06	0.77
16	14	< 0.01	< 0.01	0.02	0.03	0.04	0.06	0.13

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe.	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	38	< 0.01	< 0.01	0.02	0.04	0.06	0.21	0.32
2	32	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.04	0.10	0.28	0.70
3	44	< 0.01	0.02	0.03	0.05	0.08	0.14	0.22
4	34	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.05	0.10	0.13	0.42
5	70	< 0.01	< 0.01	0.01	0.03	0.06	0.09	0.70
6	201	< 0.01	0.02	0.04	0.07	0.09	0.12	0.21
7	118	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	0.04	0.05	0.70
8	81	< 0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.08	0.42
9	133	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.02	0.17
10	28	< 0.01	< 0.01	0.02	0.03	0.04	0.08	0.14
11	36	< 0.01	< 0.01	0.01	0.03	0.04	0.08	0.70
12	32	< 0.01	< 0.01	0.01	0.03	0.07	0.12	0.29
13	51	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.02	0.06	0.10
14	26	< 0.01	0.01	0.02	0.03	0.06	0.10	0.14
15	81	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.01	0.02	0.35
16	15	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.00	0.00	0.00

Tab. 3.22: Stickstoffgehalt (%): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Tiefenbereich 1		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	52	9	30	42	69	97	129	321
2	34	4	16	25	40	54	63	89
3	45	15	25	39	53	86	122	155
4	40	15	27	33	41	54	63	71
5	75	10	21	28	42	53	67	111
6	250	8	19	25	35	51	64	130
7	134	6	15	19	28	41	50	86
8	92	10	18	24	34	53	66	114
9	145	3	6	8	13	18	24	43
10	28	17	19	23	31	47	61	157
11	42	11	15	23	30	45	55	118
12	35	12	16	25	48	74	103	129
13	54	< 1	9	15	22	37	75	130
14	36	4	8	23	35	52	72	117
15	85	6	10	12	17	24	32	41
16	15	7	8	12	13	18	19	23

Tiefenbereich 2		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	50	4	13	25	44	88	136	274
2	29	6	7	11	22	32	58	74
3	41	7	14	18	30	59	85	137
4	37	7	16	21	26	35	43	204
5	73	3	7	14	20	27	34	66
6	246	2	7	10	17	30	43	108
7	120	1	8	12	16	23	29	57
8	89	5	7	9	17	31	44	73
9	130	3	4	6	10	13	18	58
10	27	6	9	13	17	27	39	127
11	41	4	8	9	14	20	29	98
12	29	8	10	17	28	50	67	104
13	47	10	5	8	12	18	31	65
14	30	3	6	9	13	23	31	67
15	82	4	6	7	11	16	20	40
16	14	8	9	10	14	16	26	47

Tiefenbereich 3		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	38	6	19	23	45	121	222	365
2	32	4	6	10	18	36	50	90
3	44	2	5	10	19	28	44	194
4	34	9	21	25	33	45	62	139
5	70	2	5	10	17	30	45	59
6	201	1	5	8	12	27	38	73
7	118	4	7	10	17	23	30	68
8	81	2	5	7	10	21	34	74
9	133	3	4	6	8	11	14	55
10	28	6	11	22	35	41	49	58
11	36	3	4	11	19	26	36	49
12	32	4	6	12	22	35	45	57
13	51	< 1	4	6	9	18	29	45
14	26	2	3	5	10	19	33	79
15	81	1	4	6	8	13	21	48
16	15	3	4	6	8	9	13	18

Tab. 3.23: Phosphorgehalt (mg/100 g): Statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Vorrat von 0 - 30 cm			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	151	266	909	3644	6113	9569	19884
2	34	23	49	178	658	2653	8467	12920
3	45	35	160	223	409	771	1303	4443
4	40	188	740	2923	9003	13830	30444	51243
5	75	46	144	204	421	785	2073	7788
6	250	19	64	99	156	285	468	9876
7	134	13	57	88	151	264	582	7057
8	92	17	59	79	135	250	450	7434
9	145	7	37	57	83	135	247	2299
10	28	105	205	419	1838	5559	29001	38120
11	42	52	120	175	307	816	1618	7424
12	35	1022	2721	3989	13597	34438	39094	49864
13	54	46	129	249	3850	12105	18498	37033
14	36	59	85	142	667	3495	23656	35379
15	85	26	67	94	183	446	784	5689
16	15	58	60	77	142	236	320	1122

Vorrat von 0 - 60 cm			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	172	529	2389	8950	15998	26201	48359
2	34	40	70	249	1600	6714	17615	31653
3	45	96	245	565	1306	2239	5891	13746
4	40	669	2940	9598	21782	35380	58227	103571
5	75	50	255	549	1331	2566	7271	13642
6	250	24	89	165	264	549	1438	12661
7	134	17	90	127	220	446	1009	10780
8	92	38	75	119	221	475	1111	14229
9	145	7	52	81	121	179	317	2439
10	28	145	1517	3116	9466	16878	69800	88068
11	42	77	253	533	1036	3132	11595	15156
12	35	1685	4788	9275	42555	79538	84137	92138
13	54	72	409	2170	10924	23933	41271	86137
14	36	70	115	364	1980	7109	39175	81558
15	85	52	88	142	378	1099	4765	16867
16	15	88	89	113	228	282	412	1456

Vorrat von 0 - 90 cm			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	172	609	4175	12235	21989	32490	77148
2	34	58	85	321	1993	12594	31653	47105
3	45	119	441	787	2212	5854	10930	29068
4	40	711	4369	13847	37567	57195	91164	151308
5	75	63	584	1217	3453	6143	11716	24271
6	250	24	106	187	379	936	2784	14115
7	134	21	111	166	290	765	2364	15517
8	92	49	90	133	297	766	1678	20828
9	145	7	57	93	131	212	347	2979
10	28	167	6032	9380	19358	52697	110210	137316
11	42	102	413	1100	1937	7863	21942	45989
12	35	2207	6550	12447	74486	114277	131246	139458
13	54	175	854	6873	17588	30990	72816	140523
14	36	71	159	560	2102	9606	50626	129898
15	85	52	112	193	572	3963	16533	50960
16	15	89	122	133	255	437	504	1534

Tab. 3.24: Vorrat an austauschbarem Kalzium im Mineralboden (kg/ha): Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Vorrat von 0 - 30 cm			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	22	67	216	993	2114	4082	6333
2	34	5	14	22	71	497	2352	3170
3	45	10	19	28	59	114	279	477
4	40	37	89	414	764	2352	4656	5688
5	75	< 1	27	42	109	309	647	4640
6	250	3	16	24	38	64	132	931
7	134	5	12	17	30	53	115	2613
8	92	5	10	18	29	47	118	633
9	145	3	6	8	13	26	62	341
10	28	16	34	51	270	785	1109	2249
11	42	13	22	35	93	199	463	1110
12	35	113	167	222	429	818	984	1564
13	54	7	19	39	351	789	1331	3504
14	36	14	21	35	72	382	677	1176
15	85	5	10	14	28	60	98	486
16	15	10	11	14	24	30	31	53

Vorrat von 0 - 60 cm			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	31	161	991	2598	5175	9511	17253
2	34	10	17	33	139	1501	4343	8657
3	45	32	44	80	177	617	1251	5193
4	40	79	386	871	2294	6305	9107	12553
5	75	< 1	62	238	631	1275	1939	8795
6	250	3	25	40	81	191	446	3255
7	134	8	17	25	45	95	430	3997
8	92	5	14	24	43	135	475	1413
9	145	4	7	11	19	34	82	374
10	28	24	141	767	1535	1965	2931	6618
11	42	25	53	177	376	948	1855	2631
12	35	251	385	470	1000	1555	2306	3622
13	54	12	56	429	964	1973	2758	7847
14	36	17	36	85	528	959	1459	2196
15	85	6	14	24	53	137	877	3063
16	15	14	14	16	27	43	52	77

Vorrat von 0 - 90 cm			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	31	290	1400	4783	8072	10350	29527
2	34	14	28	62	245	3062	8123	10838
3	45	49	76	174	355	1217	2626	11183
4	40	103	386	1574	3354	10498	14607	19480
5	75	16	285	730	1408	2717	4033	10841
6	250	3	29	53	145	409	1103	5192
7	134	11	21	33	69	216	1125	4906
8	92	5	20	29	70	303	1109	3217
9	145	4	8	14	21	41	91	400
10	28	33	159	2097	2442	3493	4675	10986
11	42	34	176	465	916	2187	3540	4803
12	35	251	530	825	1359	2094	3802	5932
13	54	16	150	766	1714	2860	3958	11756
14	36	17	37	162	830	1869	2468	2612
15	85	9	20	34	107	609	2038	8329
16	15	14	14	19	27	64	75	84

Tab. 3.25: Vorrat an austauschbarem Magnesium (kg/ha): Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Vorrat von 0 - 30 cm			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	13	91	151	233	396	563	621
2	34	30	46	73	161	335	530	1182
3	45	76	136	206	357	718	1056	2671
4	40	165	243	310	410	588	812	1020
5	75	93	145	171	241	393	554	1043
6	250	15	74	107	158	220	277	1014
7	134	10	54	86	121	197	272	509
8	92	13	51	85	124	183	247	570
9	145	11	37	58	77	101	130	394
10	28	70	71	192	276	422	553	801
11	42	95	139	158	212	284	400	958
12	35	31	88	118	181	275	430	822
13	54	27	57	65	130	271	337	529
14	36	27	94	124	171	284	380	2977
15	85	15	30	48	98	133	186	267
16	15	15	22	34	52	84	87	92

Vorräte von 0 - 60 cm			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	23	157	341	527	748	1099	1257
2	34	58	85	104	243	623	1218	5359
3	45	138	300	421	700	1648	3602	6844
4	40	357	495	575	907	1208	1465	2757
5	75	93	289	385	588	816	1101	2282
6	250	40	129	182	298	425	571	1601
7	134	29	95	154	244	381	564	983
8	92	21	99	137	250	353	478	903
9	145	11	56	94	128	177	249	586
10	28	154	282	548	764	1065	1300	1533
11	42	195	294	396	514	788	958	2225
12	35	109	141	211	346	565	791	1141
13	54	44	130	195	309	545	713	989
14	36	78	167	268	331	611	811	5029
15	85	28	53	93	183	285	392	513
16	15	26	35	66	102	140	154	162

Vorrat von 0 - 90 cm			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	63	203	445	689	1139	1458	2241
2	34	87	105	142	284	1095	1769	10983
3	45	178	338	584	1163	2249	4560	9921
4	40	357	524	843	1510	1798	2070	3549
5	75	93	435	560	908	1372	1771	3378
6	250	61	142	230	370	577	773	2942
7	134	37	127	205	358	612	823	1457
8	92	23	128	177	326	530	750	1296
9	145	11	74	120	162	233	291	1114
10	28	249	494	896	1200	1754	2057	2247
11	42	294	375	549	710	1314	1567	3548
12	35	159	238	296	471	778	1034	1729
13	54	145	213	269	482	829	1166	1554
14	36	109	188	387	481	875	1087	6620
15	85	39	81	169	288	473	770	1583
16	15	26	35	91	134	169	218	225

Tab. 3.26: Vorrat an austauschbarem Kalium (kg/ha): Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Vorrat von 0 - 30 cm		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	865	2668	4022	5033	7142	8280	11882
2	34	400	507	1463	2597	4182	5074	16430
3	45	2131	3509	5026	7188	8855	11559	15475
4	40	760	1616	3175	5160	6183	7813	27287
5	75	662	1383	2275	3771	5069	6960	14114
6	250	692	2513	3261	4151	5443	7192	25594
7	134	253	1009	1616	2480	3428	4671	16091
8	92	893	2212	2872	4029	5086	6147	9049
9	145	< 1	775	1129	1812	2542	3496	15084
10	28	995	1332	2087	3133	4376	8925	19818
11	42	428	1333	2166	3283	4973	5670	12967
12	35	1122	2606	4075	6185	8849	10313	16195
13	54	762	1152	1760	3675	6066	7744	13536
14	36	1101	1881	2751	3860	6029	7827	12318
15	85	428	917	1248	1896	2474	4341	16762
16	15	550	1330	1438	1733	2743	3406	4025

Vorrat von 0 - 60 cm		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	865	3676	5468	6977	9207	10967	23473
2	34	400	767	2000	3939	6353	9552	44959
3	45	3428	4952	7373	10224	13286	17878	24913
4	40	760	1616	3868	7516	9185	11251	41695
5	75	662	2180	3531	5677	7535	9620	38219
6	250	1089	3686	4785	6225	7921	10515	32574
7	134	253	1109	2342	3685	4961	7917	33371
8	92	1365	3172	4193	6048	7566	8796	12418
9	145	< 1	876	1735	2607	3628	4684	15084
10	28	995	2261	3409	4984	7210	10820	32596
11	42	428	2114	3407	4796	6826	9416	25694
12	35	1998	3529	5690	8222	12328	17537	28144
13	54	762	1697	2585	3982	7721	10953	20322
14	36	1320	2669	4199	6448	9435	12390	18154
15	85	428	1194	1921	2432	3236	5442	31021
16	15	550	1330	1827	2202	3953	4270	5330

Vorrat von 0 - 90 cm		Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung						Max.
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	
1	52	865	3701	5829	7979	10848	13794	28709
2	34	400	995	2000	4749	7218	12412	73398
3	45	3660	5297	8601	11235	15395	20615	30088
4	40	760	1616	4079	8364	11022	14740	55652
5	75	662	2180	4548	6872	8966	11496	73520
6	250	1300	4170	5250	7094	9329	12701	35877
7	134	253	1168	2676	4233	5870	10361	37029
8	92	1366	3463	5190	7212	8995	10415	15358
9	145	< 1	954	1758	2804	4157	5525	15084
10	28	995	2864	4263	6235	9167	11324	37872
11	42	794	2646	4499	5720	7223	12230	40478
12	35	2492	3695	5925	9752	13694	20803	34406
13	54	762	2054	2975	4820	8767	12521	23562
14	36	1320	2669	4324	7470	11482	14585	19651
15	85	428	1205	2170	2836	3963	5886	37528
16	15	550	1330	1827	2202	3957	4275	5330

Tab. 3.27: Vorrat an austauschbarem Stickstoff (kg/ha): Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Vorrat von 0 - 30 cm			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	52	144	435	875	1396	2571	4178	5547
2	34	48	142	238	601	966	1344	1659
3	45	195	435	624	1107	1760	2541	4947
4	40	424	615	792	1065	1250	1929	2569
5	75	154	347	526	841	1092	1354	1976
6	250	65	249	361	559	926	1268	2329
7	134	71	278	393	557	803	989	2124
8	92	78	231	318	545	885	1172	1828
9	145	44	151	219	334	456	629	1725
10	28	293	430	620	776	1241	1767	4292
11	42	301	364	404	636	926	1178	4284
12	35	350	473	644	1493	1835	2266	4097
13	54	< 1	328	422	672	901	1699	2528
14	36	127	276	452	566	1034	2288	3863
15	85	148	277	354	492	638	860	1353
16	15	285	320	401	515	639	905	1173

Vorrat von 0 - 60 cm			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	52	329	744	1408	2793	5340	8197	13313
2	34	95	246	433	1050	1903	2556	2912
3	45	342	743	1111	1927	3257	4801	8477
4	40	581	1038	1485	2113	2847	3689	6697
5	75	347	626	850	1588	2051	2612	3800
6	250	152	387	559	900	1616	2213	5410
7	134	119	490	689	1010	1475	1788	4464
8	92	133	345	500	820	1513	2093	3440
9	145	65	280	410	644	851	1272	2945
10	28	672	1003	1481	1797	2851	3964	6549
11	42	349	540	746	1204	1896	2365	6119
12	35	616	855	1809	2538	3218	3976	8527
13	54	< 1	577	811	1188	1808	2637	4970
14	36	208	504	668	1038	1965	4136	5479
15	85	223	528	673	952	1253	1655	2506
16	15	703	705	776	945	1144	1788	2013

Vorrat von 0 - 90 cm			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
Gruppe	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
1	52	329	978	1931	3194	7372	10999	23163
2	34	146	354	545	1114	2628	3645	4723
3	45	388	788	1403	2197	4221	6555	12408
4	40	581	1344	2263	3311	4252	5246	9810
5	75	347	663	1284	2259	3027	3660	5314
6	250	172	443	649	1168	2051	2847	6267
7	134	142	725	991	1501	1956	2681	4867
8	92	172	407	685	1014	1759	2663	4851
9	145	75	330	534	882	1192	1601	4437
10	28	909	2009	2343	3022	4651	5899	6718
11	42	349	622	1094	1803	2746	3955	8520
12	35	812	1063	1970	3318	4231	5673	11500
13	54	< 1	925	1210	1733	2668	4346	5938
14	36	242	572	781	1585	2733	5508	7335
15	85	278	749	902	1331	1813	2556	3729
16	15	979	988	1072	1311	1613	2065	2127

Tab. 3.28: Vorrat an austauschbarem Phosphor (kg/ha): Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstraten der Bodenbildung

Ausgangssubstratgruppen	n	Versauerungsfrontklassen				
		1	2	3	4	5
1	52	30	10	2	-	10
2	34	12	5	2	1	14
3	45	11	19	7	3	5
4	40	30	7	-	2	1
5	75	6	21	5	8	35
6	250	16	31	19	13	177
7	134	4	5	12	2	112
8	92	3	6	5	2	76
9	145	-	-	-	-	145
10	28	19	7	1	-	1
11	42	6	6	6	2	22
12	35	31	2	-	-	2
13	54	36	6	3	1	8
14	36	14	5	2	2	13
15	85	7	15	9	3	51
16	15	-	1	1	-	13

Tab. 3.29: Häufigkeit der Tiefenlage der Versauerungsfront in klassifizierten Mineralbodenbereichen (Klasse 1: 0-30 cm, Klasse 2: 30 - 60 cm, Klasse 3: 60-90 cm, Klasse 4: 90-120 cm, Klasse 5: > 120 cm; vgl. dazu auch Kap. 5.3.3.1), getrennt nach Substratgruppen

Ausgr.	n	Mull	mullartiger Moder	feinhumus- armer Moder	feinhumus- reicher Moder	rohhumus- artiger Moder	Rohhumus	kein Humus
1	52	23	7	5	6	5	-	6
2	34	16	3	4	7	1	3	-
3	45	27	9	3	4	2	-	-
4	40	28	2	4	4	-	-	2
5	75	33	7	16	6	6	5	2
6	250	42	45	51	69	24	10	9
7	134	53	24	27	17	4	9	-
8	92	6	10	16	26	19	12	3
9	145	22	9	29	31	20	33	1
10	28	18	1	5	2	-	1	1
11	42	13	5	5	5	4	6	4
12	35	27	2	1	1	1	-	3
13	54	33	1	6	5	1	3	5
14	36	12	4	4	4	2	3	7
15	85	21	3	14	19	9	6	13
16	15	1	-	3	9	-	2	-

Tab. 3.30: Häufigkeitsverteilung der Humusformen, getrennt nach Substratgruppen

Ausgr.	n	Fichte	Kiefer	s. Ndl	Buche	Eiche	Lb Mi	Ndl Mi	s.Lb	kein
1	52	15	-	2	15	5	3	1	9	2
2	34	10	2	2	13	4	1	1	-	1
3	45	7	1	2	25	5	2	-	3	-
4	40	2	5	6	9	12	-	1	5	-
5	75	22	4	4	10	19	-	3	6	7
6	250	131	2	12	31	29	9	10	16	11
7	134	31	15	14	35	22	8	4	4	1
8	92	49	2	5	13	10	4	4	3	2
9	145	10	66	15	22	19	6	5	2	-
10	28	4	2	3	13	3	1	-	2	-
11	42	19	6	1	3	8	1	-	-	4
12	35	1	1	-	3	7	-	-	21	2
13	54	2	14	2	5	13	1	-	17	-
14	36	8	3	1	5	7	-	-	7	5
15	85	8	37	3	8	26	-	-	3	-
16	15	-	13	1	-	1	-	-	-	-

Tab. 3.31: Häufigkeitsverteilung der aufstockenden Baumbestände (s.Ndl = sonstige Nadelhölzer, Lb Mi = Laubholzreiche Mischbestände, Ndl Mi = Nadelholzreiche Mischbestände, s.Lb = sonstige Laubhölzer), getrennt nach Substratgruppen

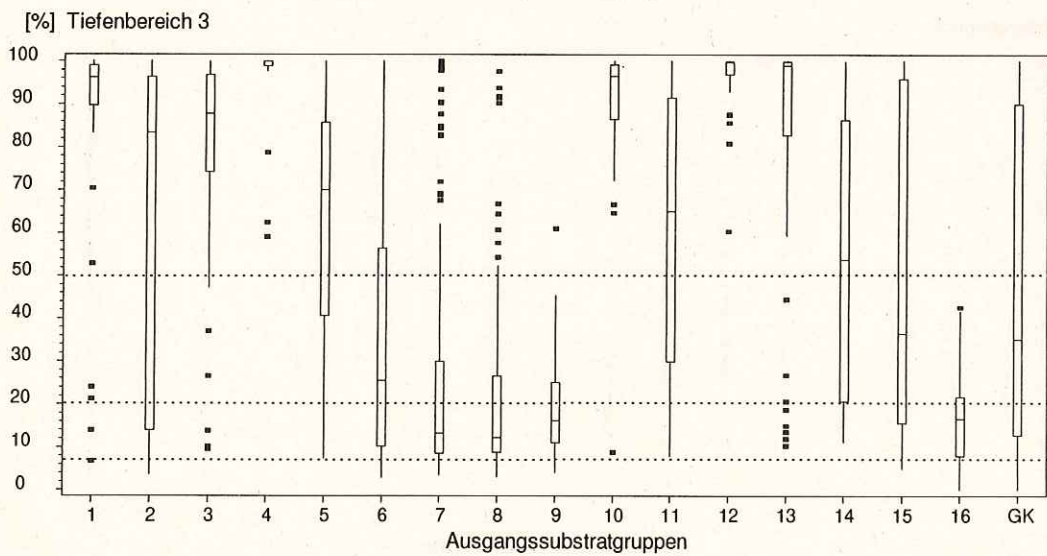
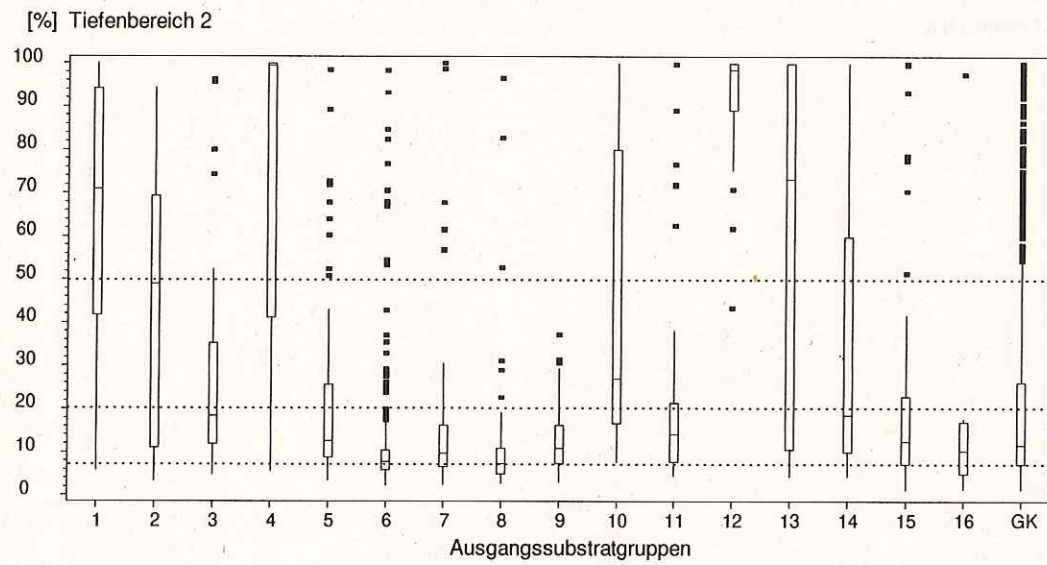
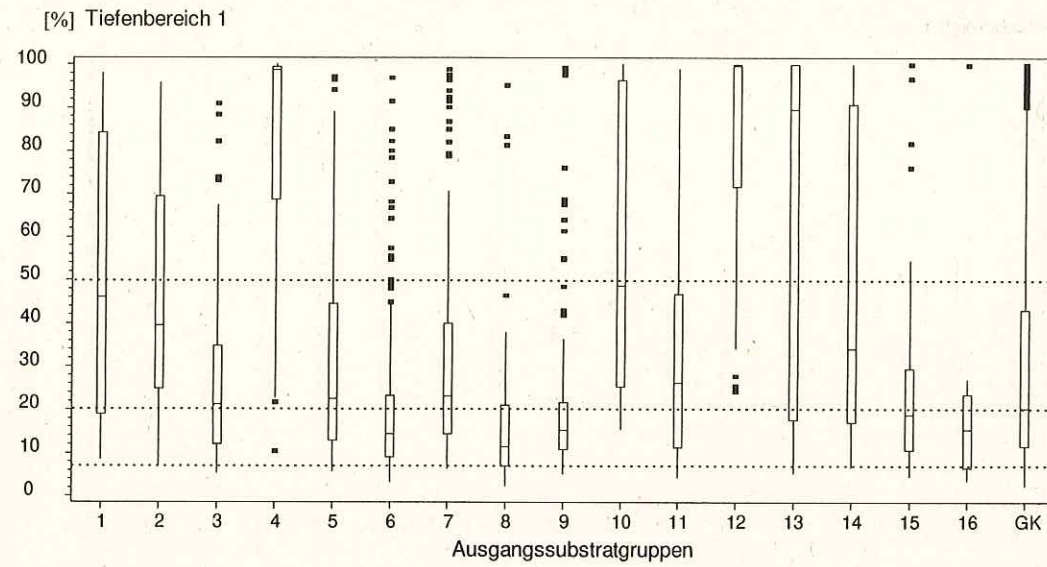


Abb. 3.1: Basensättigung in %: Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstratgruppen und Tiefenbereichen. Erläuterungen zur BOX-Plotdarstellung vgl. Kapitel 4., GK = Gesamtkollektiv

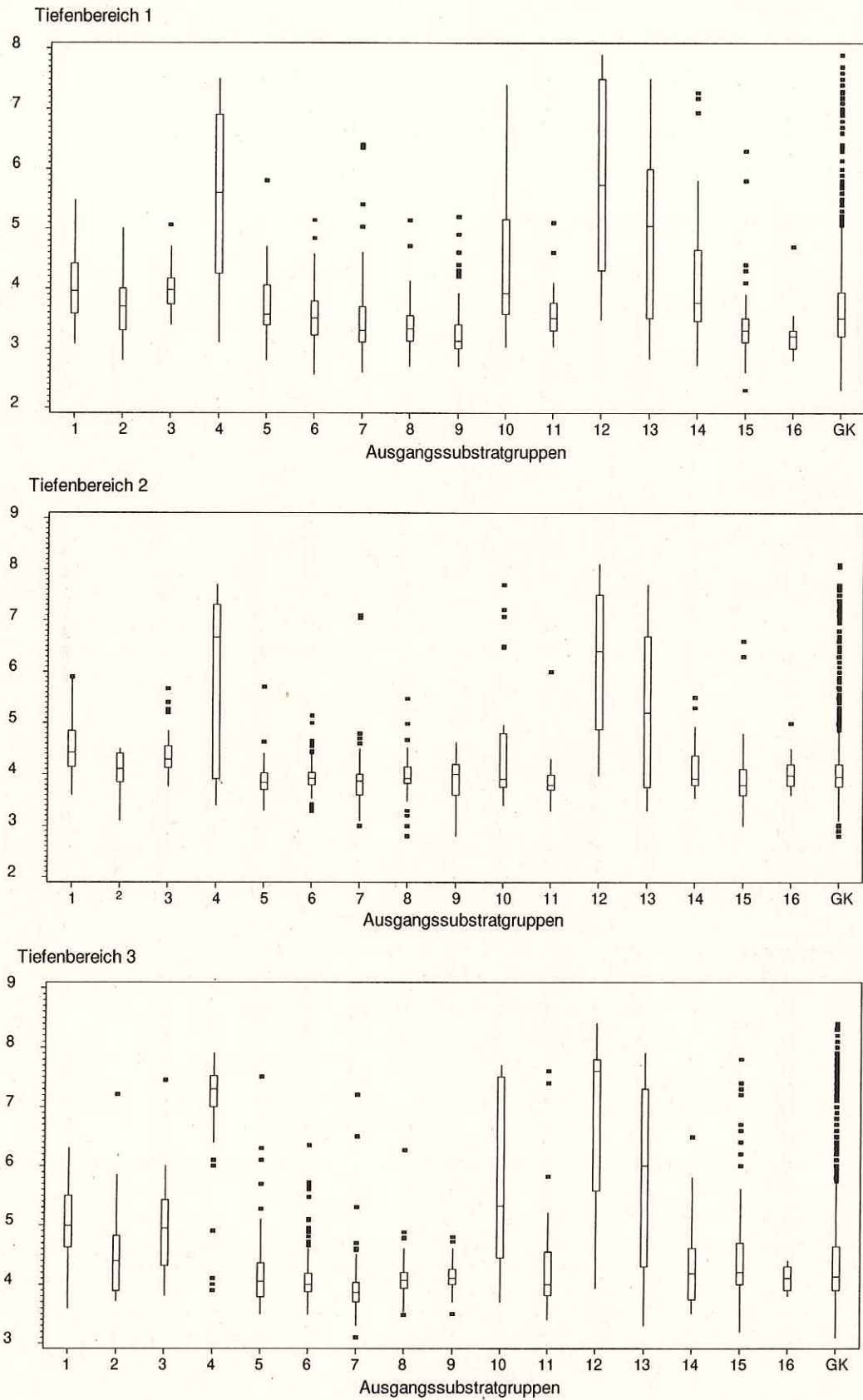


Abb. 3.2: pH-Werte (CaCl₂): Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstratgruppen und Tiefenbereichen. Erläuterungen zur BOX-Plotdarstellung vgl. Kapitel 4., GK = Gesamtkollektiv

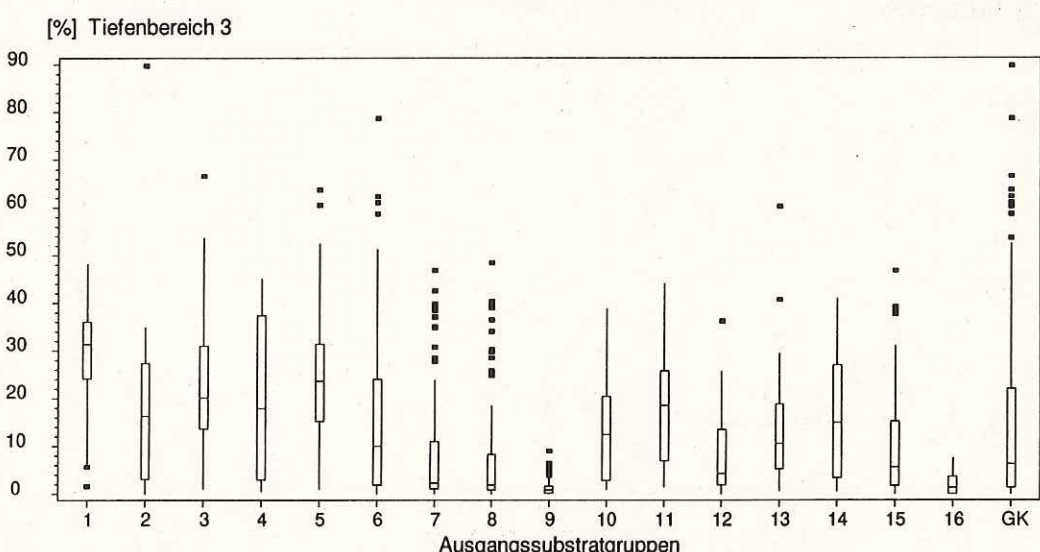
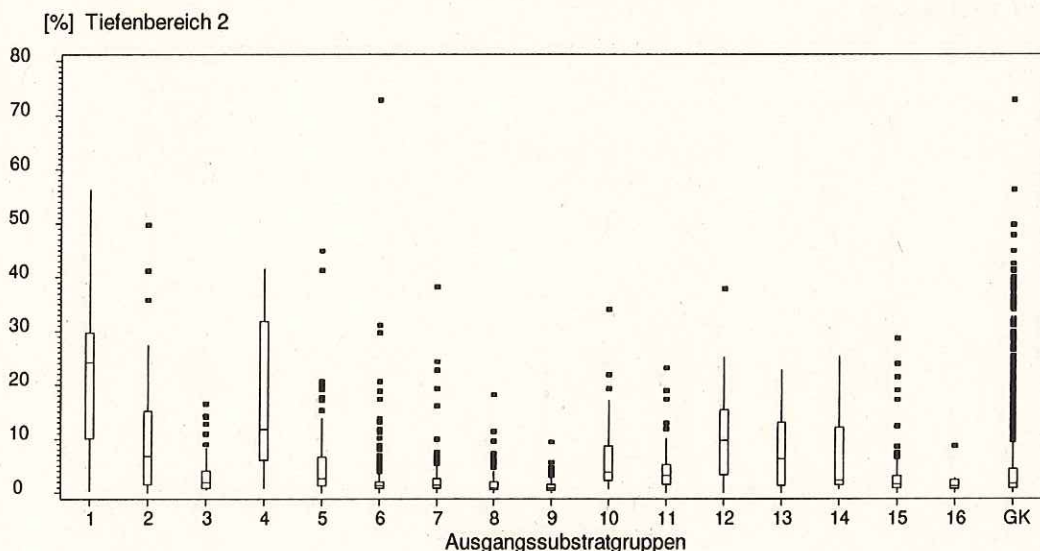
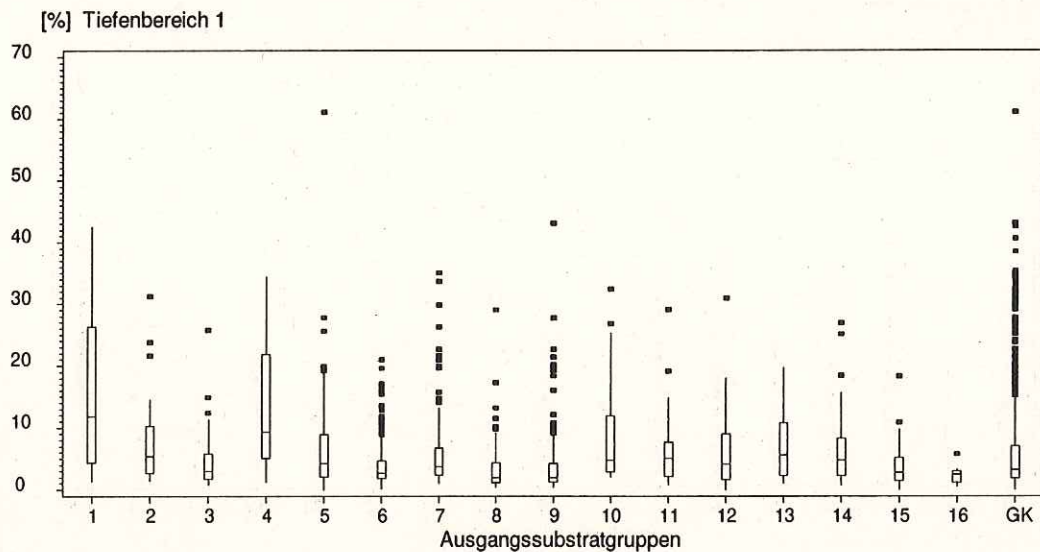


Abb. 3.3: Magnesiumsättigung des Kationenaustauschers in %: Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstratgruppen und Tiefenbereichen. Erläuterungen zur BOX-Plotdarstellung vgl. Kapitel 4., GK = Gesamtkollektiv

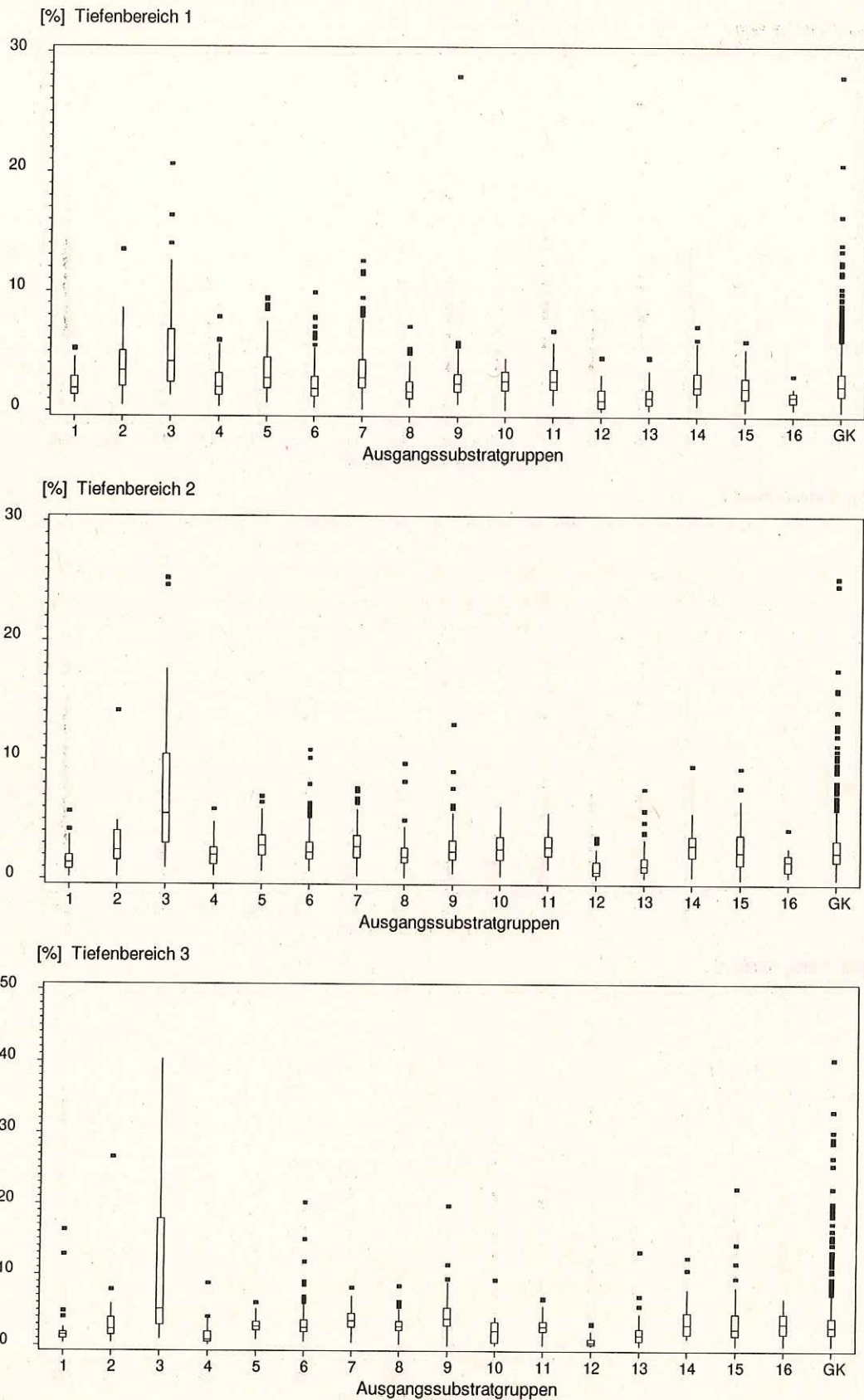


Abb. 3.4: Kaliumsättigung des Kationenaustauschers in %: Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstratgruppen und Tiefenbereichen. Erläuterungen zur BOX-Plotdarstellung vgl. Kapitel 4., GK = Gesamtkollektiv

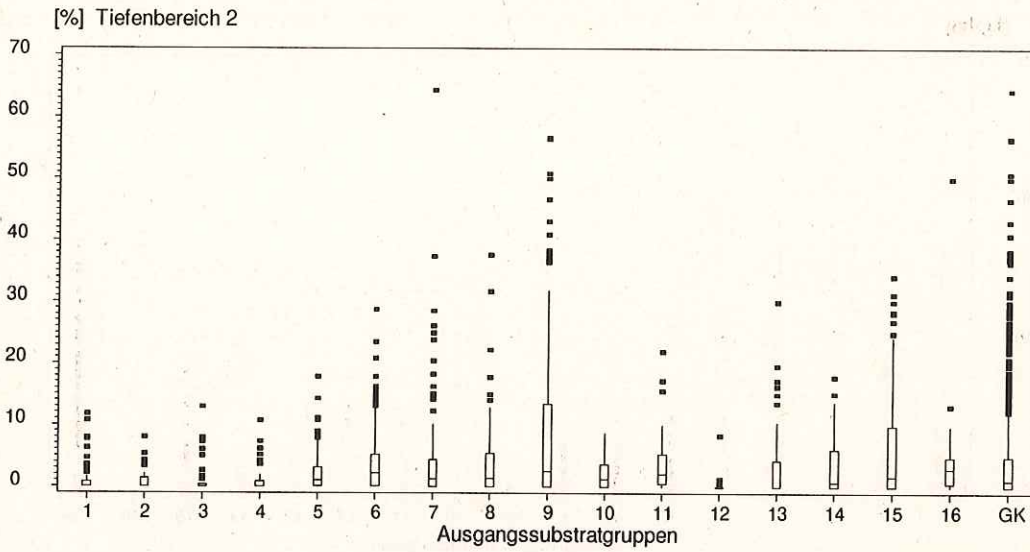


Abb. 3.5: Eisen- und Protonensättigung des Kationenaustauschers in %: Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstratgruppen und Tiefenbereichen. Erläuterungen zur BOX-Plotdarstellung vgl. Kapitel 4., GK = Gesamtkollektiv

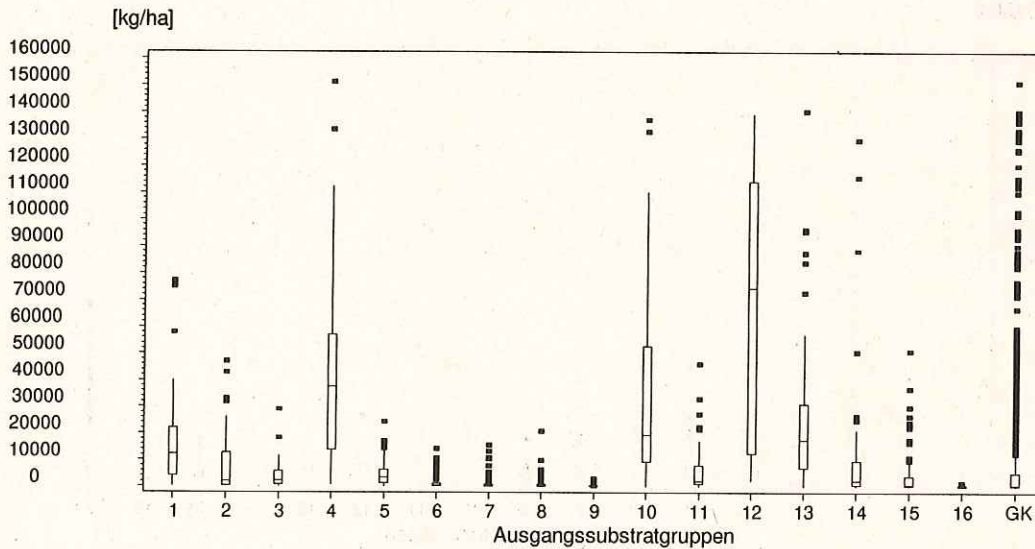


Abb. 3.6: Ca-Vorrat im Mineralboden von 0 - 90 cm Bodentiefe: Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstratgruppen und Tiefenbereichen. Erläuterungen zur BOX-Plotdarstellung vgl. Kapitel 4., GK = Gesamtkollektiv

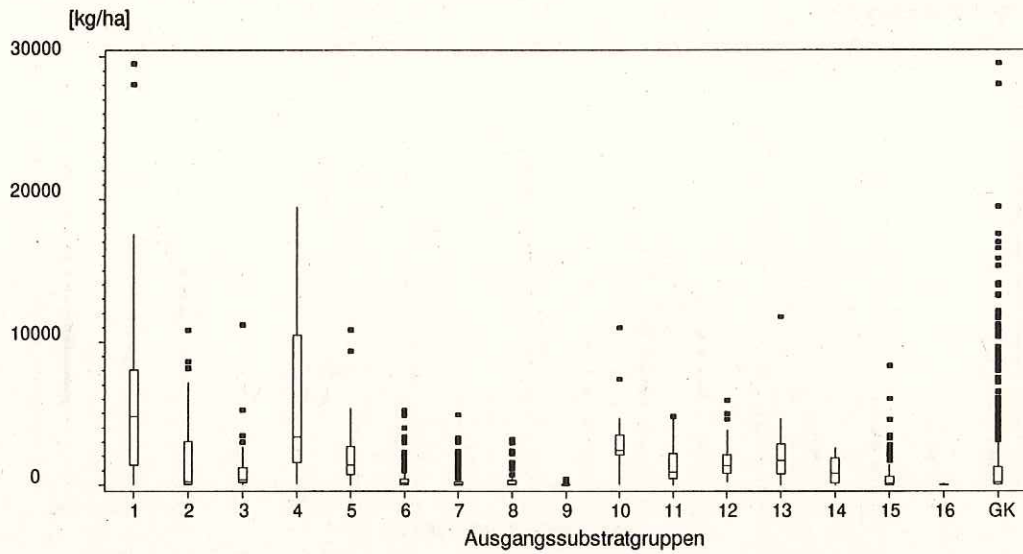


Abb. 3.7: Mg-Vorrat Mineralboden von 0-90 cm Bodentiefe: Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstratgruppen und Tiefenbereichen. Erläuterungen zur BOX-Plotdarstellung vgl. Kapitel 4., GK = Gesamtkollektiv

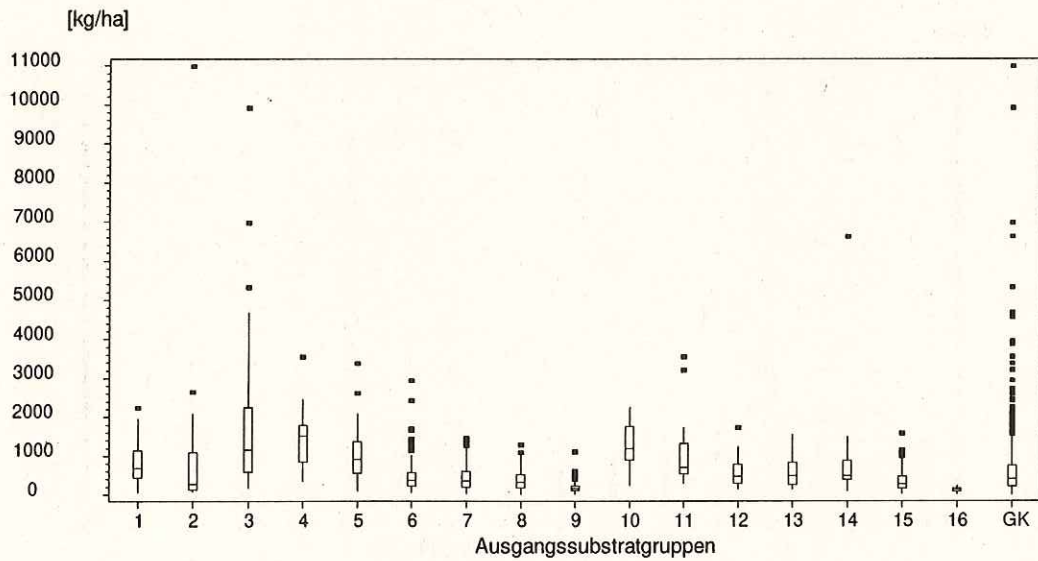


Abb. 3.8: K-Vorrat Mineralboden von 0-90 cm Bodentiefe: Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstratgruppen und Tiefenbereichen. Erläuterungen zur BOX-Plotdarstellung vgl. Kapitel 4., GK = Gesamtkollektiv

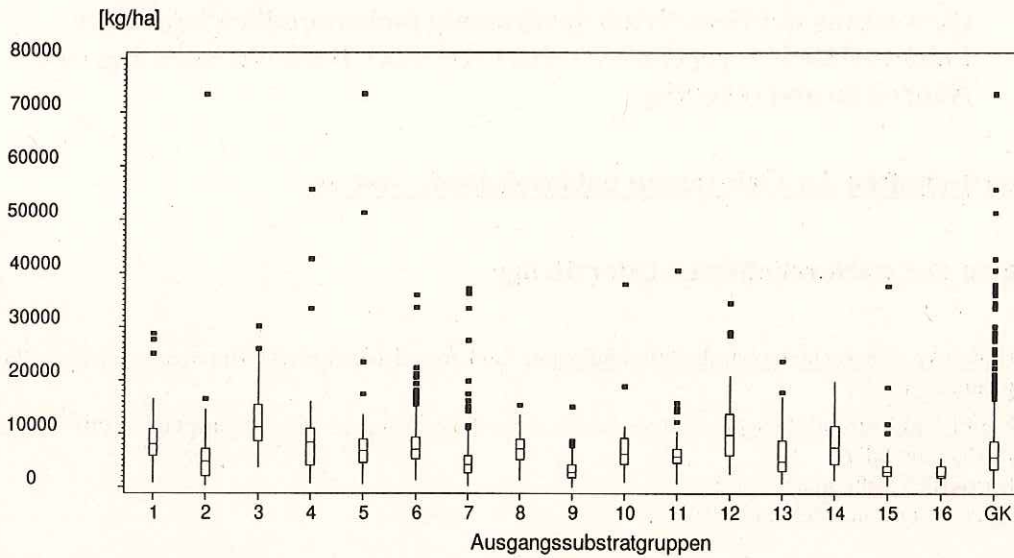


Abb. 3.9: N-Vorrat Mineralboden von 0-90 cm Bodentiefe: Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstratgruppen und Tiefenbereichen. Erläuterungen zur BOX-Plotdarstellung vgl. Kapitel 4., GK = Gesamtkollektiv

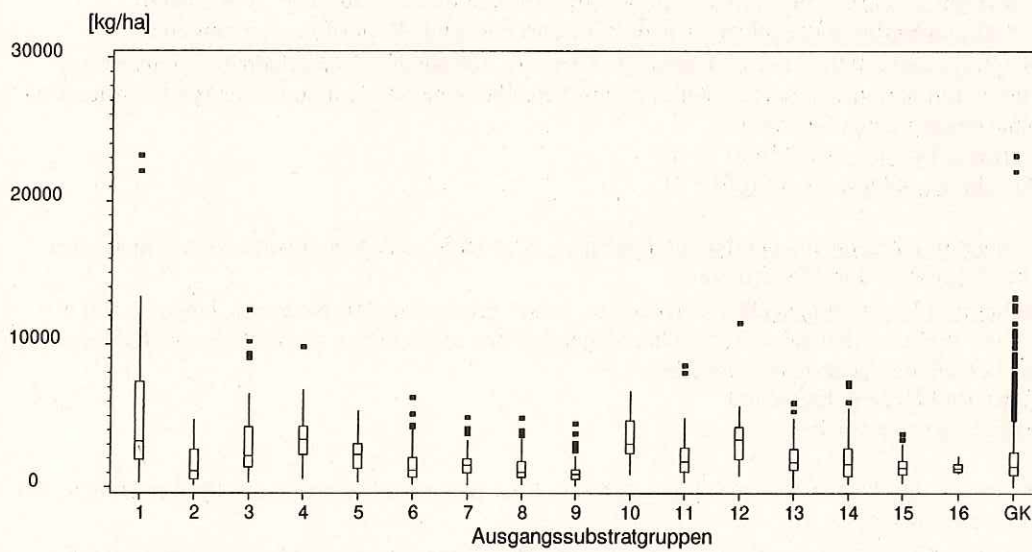


Abb. 3.10: P-Vorrat Mineralboden von 0-90 cm Bodentiefe: Statistische Kennwerte getrennt nach Ausgangssubstratgruppen und Tiefenbereichen. Erläuterungen zur BOX-Plotdarstellung vgl. Kapitel 4., GK = Gesamtkollektiv

Anhang 4: Beschreibung der Bodengesellschaften sowie Tabellen zu Kapitel 5 (Bewertung der Sensitivität großräumig bodenkundlich kartierter Flächeneinheiten gegenüber fortschreitender Bodenversauerung und Nährelementverarmung)

Bodengesellschaften der Gebiete mit paläozoischem Gestein

I. Böden der stark reliefierten Quarzitzüge

- 1 ¹ Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat: Ranker und skelettreiche Braunerde aus Hauptlage über Quarzit
Relief und Verbreitungsgebiet: stark geneigte bis steile Hänge ($\geq 10^\circ$ Neigung) der Kerb- und Kerbsohlentäler
Kartierte Fläche in ha: 2500
Anzahl der untersuchten Profile: 0
- 2 ² Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat: Ranker und skelettreiche Braunerde aus Hauptlage über Quarzit
Relief und Verbreitungsgebiet: schmale (< 100 m breit), langgestreckte (bis ca. 6000 m lang) Kulminationsbereiche (Rücken und Kuppen) mit konvexer Wölbungstendenzen und stark geneigte bis steile Hangansätze und Hänge (Oberhangpartien) ($\geq 10^\circ$ Neigung) teilweise mit Felstdurchragungen. In der Regel oberhalb 600 m NN
Kartierte Fläche in ha: 2795
Anzahl der untersuchten Profile: 7
- 3 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat: Braunerde aus Hauptlage über Quarzit
Relief und Verbreitungsgebiet: sich an BG 2 anschließende Reliefformen geringerer Neigungsstärke. Mittel bis stark geneigte Hänge ($5-10^\circ$ Neigung) unterhalb des Steilanstiegs zum Kulminationsbereich und Kulminationsbereiche ohne oder mit konvexer Wölbungstendenz ohne ausgeprägten Steilabfall
Kartierte Fläche in ha: 15660
Anzahl der untersuchten Profile: 21
- 4 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat: Braunerde, z.T. pseudovergleyt, aus quarzitreicher Hauptlage über Tonschiefer
Relief und Verbreitungsgebiet: schwach bis mittel geneigte ($2-10^\circ$ Neigung), lange (> 500 m) Mittel- und Unterhangabschnitte, überwiegend gestreckt bis konvex gewölbt, die die Kulminationsbereiche der Quarzitzüge umgeben
Kartierte Fläche in ha: 20860
Anzahl der untersuchten Profile: 26
- 5 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat: Lockerbraunerde (ferritische, lockere Braunerde) der Quarzitzüge
Relief und Verbreitungsgebiet: lokale Besonderheit, die eine pedogenetische Varietät der Bodenformen 2 und 3 darstellt und somit in den gleichen Reliefpositionen auftritt, jedoch nur oberhalb ca. 550 m NN
Kartierte Fläche in ha: 15155
Anzahl der untersuchten Profile: 0³

¹ Nummer der Kartiereinheit der BÜK = Nummer der Untersuchungseinheit dieser Arbeit

² Nur zu den grau schraffierten Kartiereinheiten liegen analysierte Bodenprofile vor. Die Böden der Kartiereinheiten 1, 8, 11, 16, 17, 19, 20, 21 und 22 können daher nicht charakterisiert werden

³ Die Verbreitung der Lockerbraunerde ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Es besteht noch Forschungsbedarf. Die ursprünglich hier eingeordneten Bodenprofile wurden deshalb nach Rücksprache mit den Kartierern den Bodengesellschaften 2 und 3 zugeschlagen

6

Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat:

1. Braunerde, i.d.R. schwach pseudovergleyt, aus Hauptlage, und
2. Braunerde-Pseudogley und Pseudogley, mit geringmächtiger lößlehmhaltiger Mittellage über Quarzit und Tonschiefer

Relief und Verbreitungsgebiet: schwach bis mittel geneigte (2-10° Neigung) Mittel- und Unterhangabschnitte mit gestreckter bis konkaver Wölbungstendenz, tw. mit deutlicher lateraler Hangdifferenzierung in Rücken und Hangdellen⁴ und weite, halbkreisförmige (Ø 1000 bis 5000 Meter), in flache Rücken und Dellen gegliederte Talanfangsmuldensysteme, die die Kulminationsbereiche der Quarzitzüge umgeben; kleinräumiger Wechsel der Reliefformen.

Kartierte Fläche in ha: 13505

Anzahl der untersuchten Profile: 34: Bodenform 6.1= 19 und Bodenform 6.2 = 15 Profile⁵

7

Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat: Pseudogley aus lößlehmreichen Deckschichten (Mittellage)

Relief und Verbreitungsgebiet: sehr schwach bis schwach, untergeordnet mittel geneigte (1-5°/-10° Neigung), Mittel- und Unterhangabschnitte mit gestreckter bis konkaver Wölbungstendenz unterhalb ca. 470 m NN, die die Kulminationsbereich der Quarzitzüge umgeben. Weite, fläche, halbkreisförmige (Ø 1000 bis 5000 Meter), vorwiegend nach NE, SE und SW offene Talanfangsmuldensysteme, zwischen den Kämmen der Quarzitzüge, bis ca. 580 m NN. Ausschließlich im Soonwald.

Kartierte Fläche in ha: 4190

Anzahl der untersuchten Profile: 8

8

Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat: Moor

Relief und Verbreitungsgebiet: keine Angabe

Kartierte Fläche in ha: 280

Anzahl der untersuchten Profile: 0

II. Böden der Tonschiefer-Hochflächen

9

Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat: Ranker und skelettreiche Braunerde aus Hauptlage über Tonschiefer

Relief und Verbreitungsgebiet: stark geneigte bis steile Hänge (≥ 10° Neigung) der Kerb- und Kerbsohlentäler

Kartierte Fläche in ha: 51735

Anzahl der untersuchten Profile: 63

10

Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat: Braunerde aus Hauptlage über Tonschiefer

Relief und Verbreitungsgebiet: Durch die Zuflüsse von Rhein und Mosel stark in Riedel und Rücken aufgelöste Hochflächenreste. Es überwiegen mehrgipflige Kulminationsbereiche mit konvexer Wölbungstendenz und daran anschließende Quellmulden (Ø < 500 Meter), die sich rasch einkerben. Die Hänge sind schwach bis stark geneigt (2-15° Neigung) und relativ kurz (< 1000 m); morphologisch stark zergliedert.

Kartierte Fläche in ha: 103510

Anzahl der untersuchten Profile: 89

⁴ Beispiel: Bei einer Entfernung der Kulminationslinien zweier Rücken von 200-500 m und einer Höhendifferenz zu den dazwischenliegenden Tiefenlinien der Dellen von ca. < 20 m ergibt sich ein Wölbungsradius von 300 bis 3000 Metern (schwach bis sehr schwach gewölbt)

⁵ Die Bodengesellschaften 6, 12, 13 und 18 haben jeweils 2 Bodenformen, die sich nach Aufbau und Hydro-morphie unterscheiden. Sie sind eng miteinander vergesellschaftet und wurden bei der Kartierung als eine Kartiereinheit erfaßt. Die Auswertung erfolgt jedoch getrennt

- 11 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat: Braunerde aus Hauptlage mit hohem Anteil an quartärem Tuff unbekannter Herkunft über Tonschiefer
Relief und Verbreitungsgebiet: nördliches Mosel-Hunsrückgebiet, Hochfläche über Tonschiefer
Kartierte Fläche in ha: 3165
Anzahl der untersuchten Profile: 0
- 12 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat:
 1. Parabraunerde-Braunerde, Braunerde, häufig pseudovergleyt und aus Hauptlage über Tonschiefer, häufig intensiv verwittert (Saprolit) über Tonschiefer und
 2. Pseudogley-Parabraunerde-Braunerde aus löblehmhaltigen Deckschichten (Mittellage) über Tonschiefer, häufig intensiv verwittert (Saprolit)
Relief und Verbreitungsgebiet: Randlich, durch allmählich tiefer eingeschnittene Tälchen stärker aufgelöste Hochfläche, mit schwach bis mittel geneigten (2-10° Neigung), deutlich in flache Rücken und Dellen gegliederten Hängen, schmalen (< 500 m breit), mehrgipfligen Kulminationsbereichen mit konvexer Wölbungstendenz und daran anschließende Talanfangsmulden (Ø < 1000 Meter) mit schwachem bis mittlerem Wölbungsradius (100 bis 1000 Meter), zwischen 350 und 450 m NN; engräumiger Wechsel;
Kartierte Fläche in ha: 25710
Anzahl der untersuchten Profile: 39; Bodenform 12.1 = 23; Bodenform 12.2 = 16 Profile¹⁵
- 13 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat:
 1. Braunerde-Pseudogley aus Hauptlage über Tonschiefer und
 2. Parabraunerde-Braunerde-Pseudogley und Pseudogley aus löblehmhaltigen Deckschichten (Mittellage) über Tonschiefer, häufig intensiv verwittert (Saprolit)
Relief und Verbreitungsgebiet: Zentrale, nur wenig zerschnittene, flachwellige Hochflächen im Hauptwasserscheidenbereich zwischen 450 und 550 m NN. Ebene bis mittel geneigte (0-10° Neigung) flächenhafte, gestreckte Kulminationsbereiche, Hänge und Talanfangsmuldensysteme
Kartierte Fläche in ha: 13345
Anzahl der untersuchten Profile: 21; Bodenform 13.1 = 9; Bodenform 13.2 = Profile 14¹⁵
- 14 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat: Parabraunerde, pseudovergleyt und Pseudogley-Parabraunerde aus löblehmreichen Deckschichten, örtlich aus umgelagertem Lößlehm (Mittellage)
Relief und Verbreitungsgebiet: ebene bis schwach geneigte (0-5° Neigung) Reliefformen unterschiedlicher Genese (Umlauffläche, Hochflächenriedel) in Nähe zu den Hauptvorflutern Rhein, Mosel und Saar, in Höhen zwischen 200 bis 300 m NN, vereinzelt bis 500 m NN
Kartierte Fläche in ha: 4465
Anzahl der untersuchten Profile: 8
- 15 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat: Pseudogley und Parabraunerde-Pseudogley aus löblehmreichen Deckschichten (Mittellage)
Relief und Verbreitungsgebiet: sehr schwach bis schwach geneigte (1-5° Neigung) Bereiche der zentralen, nur wenig zerschnittenen, flachwelligen Hochfläche. Sehr schwach bis schwach geneigte (1-5° Neigung) Hänge, die in gestreckte und in sehr schwach konkav und konvex gewölbte (Wölbungsradius > 1000 Meter) Formen gegliedert sind. Die Horizontalerstreckung der Hänge beträgt zwischen 2 und 10 km, bei einer Vertikalerstreckung von 1-2 km. Sie sind NE- und E-exponiert. Die Höhenlage differiert regional zwischen 350 m NN und 470 m NN. Weite, flache Muldentäler und halbkreisförmige (Ø 1000 bis 2000 Meter) Talanfangsmuldensysteme zwischen ca. 400 und 500 m NN.
Kartierte Fläche in ha: 6845
Anzahl der untersuchten Profile: 10

Bodengesellschaften der Gebiete mit mesozoischem Gestein

I. Böden der Sandsteingebiete

- 16 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat:
Braunerde, häufig podsoliert aus Hauptlage über Sandstein
Relief und Verbreitungsgebiet: morphologisch stark gegliederte Gebiete im äußersten SW des Untersuchungsgebietes
Kartierte Fläche in ha: 1940
Anzahl der untersuchten Profile: 0
- 17 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat:
Pseudogley und Anmoorpseudogley aus lößlehmreichen Deckschichten über Sandstein
Relief und Verbreitungsgebiet: äußerster SW des Untersuchungsgebietes
Kartierte Fläche in ha: 340
Anzahl der untersuchten Profile: 0
- 18 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat:
1. Braunerde aus Hauptlage über Terrassensedimenten und Parabraunerde aus Hochflutlehm und
2. Pseudogley-Parabraunerde und Pseudogley aus lößlehmreichen Deckschichten (Mittellage)
Relief und Verbreitungsgebiet: Höhen-, Haupt- und Mittelterrassen der Hauptvorfluter Mosel, Saar und Rhein. Flachwellige Terrassenflächen auf unterschiedlichen Höhenniveaus (ca. 150-180 m NN, ca. 270-300 m NN, ca. 320-350 m NN). 18.1 häufig an den Rändern der Terrassenflächen, 18.2 eher in zentralen Bereichen der Flächen
Kartierte Fläche in ha: 1775
Anzahl der untersuchten Profile: 9; Bodenform 18.1 = 5; Bodenform 18.2 = 4 Profile¹⁵
- 19 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat:
Parabraunerde, pseudovergleyt und Pseudogley-Parabraunerde aus umgelagertem Löß, örtlich aus lößlehmreichen Deckschichten
Relief und Verbreitungsgebiet: Höhen und Hauptterrassen der Hauptvorfluter Mosel, Saar und Rhein. Flachwellige Terrassenflächen auf unterschiedlichen Höhenniveaus (ca. 270-300 m NN - ca. 320-350 m NN).
Kartierte Fläche in ha: 2900
Anzahl der untersuchten Profile: 0
- 20 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat:
Parabraunerde, z.T. pseudovergleyt und Pseudogley-Parabraunerde aus lößlehmreichen Deckschichten oder umgelagertem Lößlehm mit hohem Anteil an quartärem Tuff unbekannter Herkunft in der Hauptlage Kiese und Sande
Relief und Verbreitungsgebiet: altpleistozäne Moselterrassen
Kartierte Fläche in ha: 1365
Anzahl der untersuchten Profile: 0
- 21 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat:
Böden der breiten Talsohlen
Relief und Verbreitungsgebiet: /
Kartierte Fläche in ha: 1765
Anzahl der untersuchten Profile: 0
- 22 Bodentyp, Deckschichtenaufbau und Substrat:
Rigosol der Weinanbaugebiete an Rhein, Mosel, Saar und Ruwer
Relief und Verbreitungsgebiet: /
Kartierte Fläche in ha: 9590
Anzahl der untersuchten Profile: 0

Datenvolumen: Flächengröße des Untersuchungsgebietes: 303 395 ha
Kartierte Fläche ohne Stichproben : 39 000 ha

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	2.70	2.70	2.80	3.07	3.48	3.82	3.82
3	21	2.70	2.80	3.05	3.20	3.28	3.82	4.12
4	26	2.82	2.97	3.03	3.23	3.42	3.80	4.05
6.1	19	2.84	2.90	2.98	3.44	3.71	3.74	3.79
6.2	15	3.27	3.30	3.40	3.60	3.76	3.97	4.01
7	8	3.25	3.25	3.36	3.50	3.72	4.18	4.18
9	63	3.01	3.22	3.39	3.60	3.88	3.98	4.21
10	89	2.90	3.02	3.20	3.45	3.69	3.91	4.16
12.1	23	2.56	2.98	3.20	3.36	3.72	3.88	4.05
12.2	16	3.13	3.22	3.34	3.63	3.86	4.71	5.14
13.1	9	3.11	3.11	3.20	3.31	3.59	3.88	3.88
13.2	14	3.13	3.19	3.33	3.50	3.85	4.07	4.32
14	8	3.34	3.34	3.57	3.99	4.69	5.69	5.69
15	10	3.30	3.34	3.41	3.53	3.70	4.10	4.20
18.1	5	2.72	2.72	3.36	3.47	3.64	3.95	3.95
18.2	4	3.60	3.60	3.74	3.94	4.05	4.09	4.09

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	2.80	2.80	3.20	4.00	4.03	4.15	4.15
3	21	3.00	3.70	3.75	3.96	4.15	4.30	4.67
4	24	3.48	3.75	3.92	4.09	4.23	4.31	4.33
6.1	18	3.28	3.29	3.59	3.88	3.96	4.17	4.25
6.2	15	3.66	3.70	3.73	3.85	4.10	4.27	4.49
7	8	3.73	3.73	3.78	3.88	4.06	4.31	4.31
9	63	3.69	3.75	3.80	3.89	4.00	4.11	4.62
10	88	3.54	3.71	3.82	3.93	4.05	4.20	4.45
12.1	23	3.53	3.75	3.82	3.87	3.93	4.00	4.05
12.2	15	3.66	3.66	3.78	3.95	4.03	4.72	4.99
13.1	9	3.54	3.54	3.75	3.81	4.00	4.16	4.16
13.2	14	3.48	3.74	3.83	3.93	4.04	4.44	4.63
14	8	3.73	3.73	3.75	3.81	4.21	7.21	7.21
15	10	3.72	3.73	3.77	3.90	4.01	4.55	4.96
18.1	5	3.80	3.80	3.80	3.82	3.89	3.90	3.90
18.2	4	3.80	3.80	3.82	3.92	4.24	4.48	4.48

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	6	3.81	3.81	3.93	4.05	4.20	4.25	4.25
3	18	3.73	3.80	4.00	4.15	4.25	4.52	4.58
4	24	3.53	3.80	3.94	4.02	4.19	4.33	4.78
6.1	16	3.62	3.71	3.80	3.93	4.01	4.08	4.14
6.2	8	3.74	3.74	3.94	4.04	4.07	4.51	4.51
7	7	4.60	4.60	4.60	4.88	5.18	5.82	5.82
9	55	3.71	3.81	3.95	4.06	4.18	4.50	5.63
10	68	3.49	3.70	3.83	3.93	4.02	4.12	5.47
12.1	21	3.73	3.75	3.81	3.88	4.02	4.22	4.30
12.2	16	3.65	3.65	3.96	4.08	4.33	4.77	5.08
13.1	4	3.57	3.57	3.62	3.72	3.78	3.79	3.79
13.2	14	3.78	4.00	4.08	4.25	4.51	4.72	5.27
14	8	4.22	4.22	4.39	5.02	7.49	7.62	7.62
15	10	3.90	3.92	4.09	4.27	4.88	5.15	5.22
18.1	3	3.59	3.59	3.59	3.72	4.34	4.34	4.34
18.2	4	3.97	3.97	3.99	4.09	4.49	4.79	4.79

Tab. 4.1: pH(CaCl₂): statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereich und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	75	75	76	111	149	188	188
3	21	59	75	98	124	147	161	166
4	26	76	87	109	129	143	169	178
6.1	19	60	67	76	106	131	152	165
6.2	15	57	65	83	94	119	183	209
7	8	42	42	53	108	116	121	121
9	63	55	69	88	102	129	158	229
10	89	50	80	95	112	131	159	225
12.1	23	50	66	82	96	141	159	193
12.2	16	56	67	72	88	113	162	195
13.1	9	84	84	99	124	162	223	223
13.2	14	73	87	94	112	121	130	130
14	8	56	56	87	104	113	185	185
15	10	58	60	69	108	120	134	135
18.1	5	63	63	65	70	86	177	177
18.2	4	62	62	63	80	120	143	143

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	38	38	40	67	85	146	146
3	21	24	39	53	62	70	81	108
4	24	15	44	45	52	60	71	93
6.1	18	33	34	44	52	59	71	72
6.2	15	35	36	44	47	70	77	79
7	8	17	17	35	48	54	80	80
9	63	37	45	51	62	71	80	93
10	88	31	41	47	57	67	73	84
12.1	23	35	44	46	53	63	66	92
12.2	15	35	41	43	47	61	64	78
13.1	9	33	33	47	51	63	102	102
13.2	14	27	30	41	49	56	62	64
14	8	50	50	51	60	86	510	510
15	10	45	45	46	50	57	77	95
18.1	5	29	29	32	36	38	41	41
18.2	4	38	38	42	50	57	61	61

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	6	19	19	26	32	44	69	69
3	18	8	14	16	24	36	61	64
4	24	13	15	23	36	46	70	80
6.1	16	22	23	34	43	59	73	79
6.2	8	24	24	57	84	89	112	112
7	7	46	46	86	91	125	128	128
9	55	21	33	39	53	60	74	88
10	68	14	23	38	48	65	76	95
12.1	21	27	36	42	52	73	90	98
12.2	16	30	41	58	77	97	105	143
13.1	4	31	31	34	65	100	107	107
13.2	14	38	54	73	89	109	136	137
14	8	82	82	123	132	502	557	557
15	10	50	62	91	100	103	124	138
18.1	3	6	6	6	51	58	58	58
18.2	4	73	73	75	85	108	122	122

Tab. 4.2: AKe in $\mu\text{mol I\ddot{A}/g}$: statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	2.0	2.0	3.4	6.0	12.7	28.9	28.9
3	21	1.1	1.5	2.3	5.5	7.2	12.3	28.4
4	26	0.6	2.8	4.6	5.9	9.0	13.2	19.1
6.1	19	1.3	1.5	2.3	6.0	10.2	14.7	18.6
6.2	15	3.2	3.7	5.2	7.1	11.4	25.3	85.4
7	8	1.2	1.2	2.7	6.3	18.0	24.9	24.9
9	63	1.8	3.9	5.8	11.0	24.7	36.1	50.3
10	89	0.9	2.7	4.9	7.7	13.5	25.3	62.6
12.1	23	3.5	4.7	5.9	10.1	16.8	21.7	23.2
12.2	16	3.1	4.5	7.7	13.9	36.9	60.1	60.5
13.1	9	2.7	2.7	7.4	14.3	55.2	110.1	110.1
13.2	14	3.9	4.8	5.7	10.6	18.1	28.1	44.8
14	8	4.5	4.5	19.1	42.7	67.1	148.5	148.5
15	10	3.4	3.5	6.5	9.5	26.8	55.7	69.6
18.1	5	6.0	6.0	13.1	22.1	24.8	27.8	27.8
18.2	4	14.5	14.5	21.3	38.9	52.0	54.3	54.3

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	0.8	0.8	0.9	1.0	2.5	2.9	2.9
3	21	0.6	0.7	0.9	1.0	1.7	3.3	4.1
4	24	0.1	0.4	0.5	0.9	1.2	2.3	4.1
6.1	18	0.5	0.6	0.8	1.2	2.0	3.3	3.6
6.2	15	0.1	1.1	1.9	3.3	5.5	7.9	9.5
7	8	0.7	0.7	1.4	3.2	5.6	15.1	15.1
9	63	0.4	0.9	1.3	2.1	3.2	6.0	41.1
10	88	0.1	0.6	0.9	1.2	2.3	3.7	20.7
12.1	23	0.6	0.7	1.1	1.3	2.7	3.8	5.8
12.2	15	0.8	1.2	1.5	3.6	9.2	35.0	36.7
13.1	9	1.0	1.0	1.2	2.7	3.1	7.1	7.1
13.2	14	0.6	0.7	1.0	1.7	3.8	7.1	11.4
14	8	1.2	1.2	4.6	10.1	20.9	475.3	475.3
15	10	1.6	1.8	2.1	3.9	8.1	21.9	26.2
18.1	5	1.1	1.1	1.5	2.4	4.1	5.8	5.8
18.2	4	4.4	4.4	4.8	7.0	21.9	35.0	35.0

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	6	0.4	0.4	0.6	1.0	1.1	3.1	3.1
3	18	0.2	0.3	0.3	0.7	1.2	2.5	3.3
4	24	0.2	0.3	0.5	0.6	1.2	2.1	4.7
6.1	16	0.4	0.7	0.9	2.5	3.1	4.7	10.6
6.2	8	2.7	2.7	11.6	17.7	19.5	57.2	57.2
7	7	23.5	23.5	29.2	54.2	65.6	71.2	71.2
9	55	0.5	0.9	1.5	5.1	12.9	20.6	34.9
10	68	0.1	0.6	1.0	1.8	3.6	8.0	42.4
12.1	21	1.2	1.5	2.9	7.0	11.7	18.8	38.7
12.2	16	1.4	7.4	17.6	24.2	38.1	44.4	65.7
13.1	4	1.8	1.8	2.6	6.5	9.8	10.1	10.1
13.2	14	1.0	11.0	14.3	27.8	39.5	45.8	47.3
14	8	31.6	31.6	66.3	79.9	472.6	523.7	523.7
15	10	25.7	28.8	33.3	46.7	64.5	76.9	87.4
18.1	3	2.2	2.2	2.2	2.7	11.9	11.9	11.9
18.2	4	18.5	18.5	27.5	40.2	45.9	47.8	47.8

Tab. 4.3: Austauschbarer Calciumgehalt in $\mu\text{mol I\ddot{A}/g}$: statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	2.0	2.0	2.4	4.5	17.0	26.0	26.0
3	21	0.7	1.4	2.0	4.3	5.6	10.5	27.0
4	26	0.7	2.1	3.0	5.1	6.7	11.7	16.0
6.1	19	1.7	2.0	2.2	4.9	8.8	13.3	15.1
6.2	15	3.4	4.6	6.1	7.1	13.8	14.8	50.2
7	8	2.4	2.4	3.6	7.5	15.8	21.4	21.4
9	63	3.0	3.7	5.6	11.0	19.9	31.3	53.2
10	89	1.2	2.3	4.3	6.5	14.7	21.1	34.2
12.1	23	4.3	5.0	6.5	10.6	13.6	16.0	27.4
12.2	16	3.2	4.3	11.0	14.4	34.1	70.2	74.7
13.1	9	3.3	3.3	6.0	14.5	34.1	49.4	49.4
13.2	14	4.1	4.2	4.7	9.5	24.8	28.3	44.3
14	8	4.0	4.0	26.1	43.7	64.4	80.3	80.3
15	10	2.6	3.8	5.7	14.0	25.3	67.6	72.0
18.1	5	9.5	9.5	15.7	18.7	25.6	38.2	38.2
18.2	4	22.6	22.6	30.3	41.7	48.6	51.7	51.7

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	1.3	1.3	1.5	1.7	2.6	6.5	6.5
3	21	0.8	1.1	1.4	1.7	3.4	6.9	7.9
4	24	0.1	0.5	1.1	1.8	2.6	4.0	4.5
6.1	18	1.2	1.2	1.7	2.6	3.1	6.1	8.2
6.2	15	0.1	2.7	3.6	5.4	10.2	17.1	20.5
7	8	2.8	2.8	3.7	5.7	12.4	29.0	29.0
9	63	0.6	1.9	2.2	3.3	5.4	11.4	64.1
10	88	0.2	1.1	1.6	2.5	4.0	5.9	33.5
12.1	23	1.0	1.5	1.9	3.0	4.4	5.5	10.4
12.2	15	1.9	2.5	3.0	6.8	14.3	63.3	74.5
13.1	9	1.6	1.6	2.3	6.1	7.0	11.9	11.9
13.2	14	1.6	1.6	2.5	3.2	6.2	21.5	42.1
14	8	1.5	1.5	8.6	17.5	34.1	93.2	93.2
15	10	2.8	3.5	4.5	8.1	14.2	36.6	54.7
18.1	5	3.0	3.0	4.8	6.0	11.4	20.1	20.1
18.2	4	9.5	9.5	11.6	15.1	37.0	57.3	57.3

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	6	1.3	1.3	1.4	2.2	5.8	12.1	12.1
3	18	0.7	0.8	1.3	3.1	5.4	10.0	10.8
4	24	0.3	0.6	1.6	2.3	3.5	6.8	11.1
6.1	16	1.5	1.9	3.4	4.5	5.8	12.7	19.6
6.2	8	11.4	11.4	17.0	23.1	24.7	51.1	51.1
7	7	33.9	33.9	43.4	51.0	58.0	59.6	59.6
9	55	1.0	2.5	3.8	9.4	20.0	38.6	66.6
10	68	0.1	1.2	2.4	4.2	7.1	13.5	59.1
12.1	21	2.8	4.8	5.3	11.1	25.6	36.0	42.8
12.2	16	4.7	8.1	24.8	34.2	43.6	64.9	65.1
13.1	4	4.9	4.9	6.9	9.9	10.9	11.0	11.0
13.2	14	2.8	12.8	18.3	26.4	41.2	45.8	55.4
14	8	38.6	38.6	53.0	61.9	93.9	94.7	94.7
15	10	34.0	37.3	43.1	48.0	63.4	71.6	72.2
18.1	3	4.3	4.3	4.3	20.5	45.8	45.8	45.8
18.2	4	25.4	25.4	30.7	37.4	50.8	62.9	62.9

Tab. 4.4: Calciumsättigung des Kationenaustauschers in %: statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
2	7	0.7	0.7	0.7	1.7	2.5	19.3	19.3
3	21	0.7	0.8	1.3	1.7	2.6	4.9	6.3
4	26	0.7	0.9	1.6	2.5	7.1	10.3	12.5
6.1	19	0.5	0.8	1.0	2.2	2.8	8.5	12.8
6.2	15	0.9	1.7	1.8	3.9	8.5	15.3	49.4
7	8	0.8	0.8	1.0	1.7	5.1	8.2	8.2
9	63	1.1	1.8	2.7	4.1	6.6	12.0	18.1
10	89	0.7	1.3	1.8	2.6	4.9	12.1	24.0
12.1	23	0.3	1.3	1.5	2.7	4.5	5.8	8.9
12.2	16	0.0	1.2	2.0	2.9	5.1	6.6	8.4
13.1	9	1.0	1.0	4.4	6.2	10.3	19.6	19.6
13.2	14	0.0	1.5	2.4	3.4	5.7	16.7	25.9
14	8	2.6	2.6	3.6	6.4	15.4	26.8	26.8
15	10	1.9	1.9	2.4	2.8	7.8	9.4	9.6
18.1	5	1.5	1.5	2.4	3.0	3.6	7.5	7.5
18.2	4	3.2	3.2	3.5	5.2	7.2	8.0	8.0

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
2	7	0.3	0.3	0.4	0.5	0.8	1.2	1.2
3	21	0.0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9
4	24	0.1	0.3	0.3	0.4	0.6	1.2	2.7
6.1	18	0.2	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2	2.2
6.2	15	0.4	0.7	0.8	1.7	3.0	4.2	4.4
7	8	0.3	0.3	0.8	1.5	2.3	9.5	9.5
9	63	0.3	0.5	0.7	1.1	1.9	3.3	8.1
10	88	0.0	0.2	0.4	0.6	0.9	1.3	15.4
12.1	23	0.0	0.4	0.5	0.6	0.9	1.4	2.2
12.2	15	0.0	0.0	0.7	0.8	2.6	3.0	11.2
13.1	9	0.0	0.0	0.3	1.1	1.2	5.6	5.6
13.2	14	0.4	0.6	0.7	1.3	2.8	3.7	5.8
14	8	0.9	0.9	1.6	2.5	5.3	17.6	17.6
15	10	0.0	0.0	0.0	0.7	3.2	7.9	12.1
18.1	5	0.3	0.3	0.5	0.5	0.6	0.8	0.8
18.2	4	0.7	0.7	0.8	1.9	6.7	10.7	10.7

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
2	6	0.1	0.1	0.4	0.5	0.9	1.6	1.6
3	18	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	1.8
4	24	0.1	0.2	0.2	0.3	0.7	3.6	11.6
6.1	16	0.1	0.2	0.4	1.4	2.6	5.6	15.4
6.2	8	6.8	6.8	9.3	26.8	31.3	40.7	40.7
7	7	17.9	17.9	29.5	36.6	45.8	56.3	56.3
9	55	0.3	0.5	1.2	8.2	13.9	22.7	43.4
10	68	0.0	0.2	0.5	1.4	5.4	14.2	19.3
12.1	21	0.2	1.3	2.6	7.2	16.0	21.4	31.5
12.2	16	2.1	2.5	7.6	16.4	24.4	30.3	50.3
13.1	4	0.7	0.7	4.2	9.1	13.3	16.1	16.1
13.2	14	0.4	11.5	22.7	36.8	39.4	47.8	82.3
14	8	13.6	13.6	17.1	23.4	30.1	36.2	36.2
15	10	13.5	14.9	17.0	29.9	32.1	39.6	42.0
18.1	3	0.4	0.4	0.4	1.6	3.0	3.0	3.0
18.2	4	10.2	10.2	14.4	21.9	33.6	42.0	42.0

Tab. 4.5: Austauschbarer Magnesiumgehalt in $\mu\text{mol I\ddot{A}/g}$; statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen von Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
2	7	0.9	0.9	0.9	1.1	1.8	17.3	17.3
3	21	0.5	1.0	1.1	1.2	2.3	4.4	7.2
4	26	0.8	0.9	1.1	2.0	5.9	8.2	9.1
6.1	19	0.8	0.8	1.2	1.8	2.3	8.0	13.2
6.2	15	1.0	1.9	2.7	4.5	5.2	10.2	29.1
7	8	1.2	1.2	1.7	2.1	4.4	7.1	7.1
9	63	1.0	1.9	2.5	3.9	6.5	8.2	16.2
10	89	0.8	1.2	1.7	2.3	4.0	10.4	19.7
12.1	23	0.4	1.3	1.7	2.5	3.4	6.6	7.6
12.2	16	0.0	1.5	2.0	3.6	5.0	6.6	9.8
13.1	9	1.2	1.2	3.6	4.7	6.3	8.8	8.8
13.2	14	0.0	1.4	2.1	3.2	5.2	19.2	25.7
14	8	2.3	2.3	3.5	8.0	12.3	26.8	26.8
15	10	2.1	2.1	2.5	3.3	7.6	11.0	13.5
18.1	5	2.4	2.4	2.8	4.2	4.3	5.6	5.6
18.2	4	4.6	4.6	4.9	5.6	7.2	8.3	8.3

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
2	7	0.5	0.5	0.5	0.9	1.1	2.1	2.1
3	21	0.0	0.5	0.5	0.7	0.8	1.1	1.2
4	24	0.4	0.5	0.6	0.7	1.0	2.1	3.1
6.1	18	0.3	0.4	0.6	1.0	1.7	2.7	3.8
6.2	15	0.6	1.2	2.0	2.9	5.8	7.3	9.7
7	8	1.6	1.6	1.8	2.8	5.0	18.2	18.2
9	63	0.6	1.0	1.3	1.8	2.7	5.2	11.2
10	88	0.0	0.4	0.7	1.1	1.6	2.2	31.2
12.1	23	0.0	0.8	0.9	1.2	1.6	2.0	4.0
12.2	15	0.0	0.0	1.3	1.8	5.0	5.4	17.4
13.1	9	0.0	0.0	0.5	1.9	3.0	5.5	5.5
13.2	14	0.9	1.3	1.4	2.3	5.0	13.7	17.7
14	8	1.1	1.1	3.0	3.6	5.1	12.2	12.2
15	10	0.0	0.0	0.0	1.6	6.4	9.7	12.7
18.1	5	1.0	1.0	1.2	1.3	1.6	2.8	2.8
18.2	4	1.5	1.5	1.9	3.8	11.4	17.5	17.5

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
2	6	0.4	0.4	1.1	1.2	2.6	6.3	6.3
3	18	0.0	0.3	0.4	0.6	1.1	1.7	7.1
4	24	0.2	0.5	0.7	1.1	2.1	6.5	16.6
6.1	16	0.5	0.8	1.1	3.1	6.0	8.1	28.5
6.2	8	12.2	12.2	23.4	31.9	37.6	39.8	39.8
7	7	29.6	29.6	32.4	38.8	44.0	48.4	48.4
9	55	0.9	1.2	3.0	16.2	26.4	34.9	62.3
10	68	0.0	0.8	1.1	2.3	11.3	23.8	34.0
12.1	21	0.8	3.2	5.3	16.1	23.6	31.0	34.0
12.2	16	4.7	7.1	9.8	20.3	27.4	39.5	58.6
13.1	4	1.8	1.8	5.1	11.7	24.5	34.0	34.0
13.2	14	1.1	20.6	29.1	37.8	41.9	48.6	60.5
14	8	2.7	2.7	3.2	18.8	26.2	35.4	35.4
15	10	17.9	18.2	27.0	29.4	31.6	34.9	36.0
18.1	3	3.1	3.1	3.1	5.1	6.9	6.9	6.9
18.2	4	14.0	14.0	19.2	25.6	30.7	34.5	34.5

Tab. 4.6: Magnesiumsättigung des Kationenaustauschers in %: statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	1.0	1.0	1.1	1.2	1.5	3.4	3.4
3	21	0.5	0.7	0.9	1.4	2.1	2.6	3.4
4	26	0.9	1.3	1.5	1.6	2.7	3.5	4.0
6.1	19	0.8	0.8	1.1	2.1	3.0	3.7	4.3
6.2	15	0.4	0.7	1.5	2.1	2.9	3.1	3.2
7	8	0.8	0.8	1.4	2.1	3.2	4.3	4.3
9	63	0.7	1.2	1.5	2.1	3.3	4.2	5.0
10	89	0.6	1.0	1.4	2.0	2.5	3.4	4.6
12.1	23	1.4	1.9	2.0	2.3	3.0	3.3	4.7
12.2	16	1.2	1.5	1.8	2.7	4.3	6.2	7.6
13.1	9	0.7	0.7	1.7	3.5	6.7	8.5	8.5
13.2	14	1.2	1.7	1.8	2.2	2.5	2.9	3.8
14	8	1.1	1.1	2.7	3.1	5.7	8.0	8.0
15	10	0.9	1.2	1.7	2.3	2.6	3.5	3.5
18.1	5	1.5	1.5	1.7	2.2	2.5	2.6	2.6
18.2	4	2.6	2.6	2.7	3.0	4.6	6.0	6.0

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	0.1	0.1	0.2	0.8	0.9	3.4	3.4
3	21	0.3	0.5	0.9	1.0	1.1	1.5	2.4
4	24	0.5	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6	2.0
6.1	18	0.2	0.6	1.0	1.2	1.4	2.1	2.5
6.2	15	0.1	0.6	0.8	0.9	1.7	1.8	2.2
7	8	0.6	0.6	0.7	1.0	1.5	2.6	2.6
9	63	0.5	0.7	0.9	1.4	1.8	2.3	2.7
10	88	0.3	0.6	0.9	1.2	1.4	1.9	3.2
12.1	23	1.1	1.3	1.4	1.6	1.7	1.9	5.1
12.2	15	0.8	1.0	1.2	1.5	2.5	2.9	4.8
13.1	9	0.5	0.5	0.9	0.9	1.0	2.9	2.9
13.2	14	0.5	0.5	0.8	0.9	1.5	1.7	1.7
14	8	1.1	1.1	1.6	2.7	4.0	7.0	7.0
15	10	0.6	0.9	1.1	1.5	1.9	2.6	2.9
18.1	5	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.3	1.3
18.2	4	1.2	1.2	1.3	1.8	2.2	2.3	2.3

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	6	0.1	0.1	0.1	0.8	1.3	1.6	1.6
3	18	0.2	0.3	0.5	0.6	0.9	1.0	1.8
4	24	0.4	0.7	0.8	1.0	1.5	2.1	2.7
6.1	16	0.4	0.4	0.7	1.1	2.0	2.3	2.7
6.2	8	0.8	0.8	1.1	1.7	2.3	2.6	2.6
7	7	1.3	1.3	1.8	2.5	2.8	3.2	3.2
9	55	0.4	0.5	1.0	1.5	2.1	2.5	4.1
10	68	0.2	0.6	0.8	1.2	1.8	2.1	2.5
12.1	21	0.8	0.8	1.4	1.7	2.1	2.3	2.8
12.2	16	1.0	1.0	1.6	2.4	2.8	3.6	9.5
13.1	4	0.7	0.7	0.9	1.1	1.4	1.6	1.6
13.2	14	1.1	1.1	1.3	2.0	2.3	3.9	5.6
14	8	1.4	1.4	2.4	2.8	3.9	34.7	34.7
15	10	1.8	1.8	2.0	2.2	2.5	3.6	3.7
18.1	3	0.6	0.6	0.6	1.2	1.8	1.8	1.8
18.2	4	1.8	1.8	2.2	3.1	3.8	4.0	4.0

Tab. 4.7: Austauschbarer Kaliumgehalt in $\mu\text{mol IÄ/g}$; statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	0.7	0.7	0.7	1.3	1.6	3.0	3.0
3	21	0.4	0.5	0.9	1.1	1.9	2.1	2.6
4	26	0.9	0.9	1.1	1.4	2.0	2.8	4.4
6.1	19	0.7	1.0	1.2	1.8	2.7	4.8	5.5
6.2	15	0.8	1.0	1.3	1.9	2.5	3.4	3.5
7	8	1.4	1.4	1.8	2.6	3.3	3.7	3.7
9	63	0.5	1.0	1.3	1.9	3.3	3.8	6.5
10	89	0.6	0.8	1.1	1.8	2.6	3.4	4.6
12.1	23	1.2	1.4	1.8	2.3	2.9	4.4	7.1
12.2	16	1.2	1.6	1.8	2.6	4.7	9.1	9.9
13.1	9	0.9	0.9	1.3	2.1	3.3	6.8	6.8
13.2	14	1.3	1.4	1.6	2.0	2.3	3.2	3.7
14	8	1.0	1.0	2.5	3.8	5.0	7.4	7.4
15	10	0.7	1.0	1.5	2.9	3.7	4.1	4.5
18.1	5	1.4	1.4	2.0	2.4	3.3	3.7	3.7
18.2	4	3.3	3.3	3.8	4.2	4.4	4.5	4.5

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	0.2	0.2	0.4	1.1	2.1	2.3	2.3
3	21	0.7	1.0	1.4	1.5	1.7	2.6	4.1
4	24	0.7	1.1	1.6	2.0	2.6	3.3	4.4
6.1	18	0.7	1.0	1.7	2.3	3.1	3.8	5.1
6.2	15	0.3	1.2	1.4	2.1	2.6	2.9	3.8
7	8	1.6	1.6	1.8	2.5	3.3	5.6	5.6
9	63	0.9	1.3	1.6	2.3	2.9	3.7	4.8
10	88	0.8	1.2	1.6	2.1	2.6	3.4	4.7
12.1	23	1.4	2.3	2.5	2.9	3.6	4.2	9.7
12.2	15	1.8	2.0	2.2	3.2	4.5	8.2	8.3
13.1	9	0.8	0.8	1.6	2.0	2.5	2.9	2.9
13.2	14	1.0	1.4	1.7	1.9	2.6	2.9	3.4
14	8	1.0	1.0	1.9	3.1	5.0	14.1	14.1
15	10	1.3	1.6	1.9	2.9	3.4	5.5	6.1
18.1	5	2.0	2.0	2.7	3.2	3.5	3.6	3.6
18.2	4	2.8	2.8	3.0	3.5	4.2	4.6	4.6

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	6	0.2	0.2	0.5	2.3	3.5	3.6	3.6
3	18	0.7	0.9	1.9	2.3	3.6	5.1	5.1
4	24	1.7	1.9	2.5	3.1	4.5	5.7	8.4
6.1	16	1.1	1.3	2.1	2.7	3.5	4.2	4.2
6.2	8	1.1	1.1	2.0	2.4	3.3	3.6	3.6
7	7	1.9	1.9	2.0	2.5	2.8	3.2	3.2
9	55	0.9	1.6	1.9	2.8	3.7	4.2	6.3
10	68	0.6	1.5	2.1	2.4	2.9	3.9	6.8
12.1	21	1.6	1.9	2.0	3.0	4.1	4.7	6.1
12.2	16	1.7	1.7	2.1	3.3	3.9	4.3	14.9
13.1	4	1.3	1.3	1.4	2.0	2.6	2.8	2.8
13.2	14	1.7	1.7	1.9	2.2	2.8	3.0	4.6
14	8	0.5	0.5	0.7	1.8	2.4	26.5	26.5
15	10	1.9	1.9	2.0	2.5	2.6	3.8	4.0
18.1	3	2.4	2.4	2.4	3.2	10.7	10.7	10.7
18.2	4	1.9	1.9	2.5	3.2	4.5	5.5	5.5

Tab. 4.8: Kaliumsättigung des Kationenaustauschers in %: statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7	1.6	1.6
3	21	0.2	0.3	0.4	0.7	1.0	1.1	2.5
4	26	0.0	0.2	0.4	0.6	1.1	1.5	4.4
6.1	19	0.2	0.3	0.3	0.5	0.6	0.8	0.9
6.2	15	0.0	0.0	0.3	0.6	0.8	1.4	1.5
7	8	0.1	0.1	0.3	0.5	0.8	1.8	1.8
9	63	0.2	0.3	0.4	0.7	1.0	1.6	4.2
10	89	0.0	0.3	0.4	0.5	0.8	1.1	3.8
12.1	23	0.0	0.2	0.3	0.6	0.9	1.1	2.0
12.2	16	0.0	0.2	0.3	0.8	1.2	1.9	1.9
13.1	9	0.2	0.2	0.6	0.8	1.1	1.8	1.8
13.2	14	0.0	0.0	0.3	0.4	0.8	1.8	2.0
14	8	0.2	0.2	0.4	0.8	1.3	1.6	1.6
15	10	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0
18.1	5	0.2	0.2	0.5	1.0	1.0	1.3	1.3
18.2	4	0.3	0.3	0.7	1.1	1.2	1.3	1.3

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	0.0	0.0	0.0	0.4	1.5	2.8	2.8
3	21	0.0	0.2	0.3	0.5	0.8	1.6	2.1
4	24	0.0	0.1	0.2	0.4	0.9	1.9	4.6
6.1	18	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.8	1.4
6.2	15	0.0	0.2	0.3	0.6	0.7	1.0	1.9
7	8	0.0	0.0	0.2	0.5	0.9	1.6	1.6
9	63	0.1	0.3	0.3	0.5	0.8	1.4	4.5
10	88	0.0	0.2	0.3	0.4	0.6	1.0	4.0
12.1	23	0.0	0.1	0.1	0.4	0.6	1.2	2.0
12.2	15	0.2	0.3	0.4	0.7	0.9	1.6	1.6
13.1	9	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5
13.2	14	0.2	0.2	0.2	0.3	0.6	1.0	1.7
14	8	0.1	0.1	0.4	0.8	1.3	2.1	2.1
15	10	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	1.0	1.0
18.1	5	0.2	0.2	0.3	0.9	0.9	1.2	1.2
18.2	4	0.3	0.3	0.4	0.8	1.8	2.5	2.5

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	6	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	0.6	0.6
3	18	0.0	0.1	0.2	0.3	0.7	1.5	1.8
4	24	0.0	0.1	0.2	0.3	1.0	1.7	4.5
6.1	16	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	1.8	2.1
6.2	8	0.0	0.0	0.3	0.7	0.8	1.0	1.0
7	7	0.6	0.6	1.2	1.9	4.2	5.5	5.5
9	55	0.1	0.2	0.4	0.5	0.8	1.8	4.7
10	68	0.0	0.1	0.3	0.4	0.6	0.8	3.8
12.1	21	0.0	0.0	0.2	0.6	0.8	1.4	2.3
12.2	16	0.2	0.2	0.2	0.6	1.3	1.8	2.2
13.1	4	0.2	0.2	0.2	0.5	0.8	1.0	1.0
13.2	14	0.2	0.5	0.6	0.8	2.2	2.4	3.0
14	8	0.4	0.4	0.7	1.1	2.3	4.9	4.9
15	10	0.6	0.6	0.8	1.1	1.4	1.7	1.9
18.1	3	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9
18.2	4	0.5	0.5	0.5	1.3	2.3	2.6	2.6

Tab. 4.9: Austauschbarer Natriumgehalt in $\mu\text{mol I\ddot{A}/g}$; statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	0.0	0.0	0.0	0.3	0.7	2.1	2.1
3	21	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.9	1.5
4	26	0.0	0.2	0.3	0.5	0.8	1.3	3.3
6.1	19	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.7	0.7
6.2	15	0.0	0.1	0.2	0.7	0.9	1.2	1.3
7	8	0.1	0.1	0.3	0.7	1.1	1.6	1.6
9	63	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.3	4.2
10	89	0.0	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0	3.0
12.1	23	0.0	0.3	0.4	0.6	0.9	1.1	2.3
12.2	16	0.1	0.3	0.4	0.6	1.2	1.8	2.0
13.1	9	0.2	0.2	0.5	0.5	0.8	1.1	1.1
13.2	14	0.0	0.0	0.3	0.4	0.8	1.7	1.9
14	8	0.3	0.3	0.4	0.8	1.0	1.4	1.4
15	10	0.3	0.3	0.4	0.8	1.2	2.0	2.8
18.1	5	0.3	0.3	0.7	0.8	1.2	1.5	1.5
18.2	4	0.5	0.5	0.6	1.0	1.6	1.8	1.8

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	0.1	0.1	0.1	0.6	1.8	1.9	1.9
3	21	0.0	0.4	0.5	0.9	1.2	1.8	3.6
4	24	0.0	0.2	0.3	0.8	2.1	2.9	6.4
6.1	18	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	1.6	2.2
6.2	15	0.1	0.4	0.6	1.0	1.6	2.0	4.2
7	8	0.0	0.0	0.5	1.4	2.0	3.1	3.1
9	63	0.3	0.4	0.6	0.8	1.2	2.5	6.8
10	88	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0	1.9	6.0
12.1	23	0.1	0.1	0.3	0.7	1.2	2.3	4.4
12.2	15	0.4	0.6	0.9	1.5	2.0	2.5	3.6
13.1	9	0.3	0.3	0.4	0.6	0.8	1.3	1.3
13.2	14	0.4	0.4	0.5	0.7	1.3	2.6	3.4
14	8	0.2	0.2	0.3	0.9	2.0	2.6	2.6
15	10	0.4	0.5	1.1	1.2	1.7	1.8	1.8
18.1	5	0.6	0.6	0.8	2.4	2.9	3.0	3.0
18.2	4	0.7	0.7	0.9	2.0	3.4	4.1	4.1

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	6	0.1	0.1	0.2	0.6	0.9	2.0	2.0
3	18	0.0	0.3	0.9	1.7	2.7	7.5	10.8
4	24	0.0	0.2	0.5	1.5	3.4	9.3	10.2
6.1	16	0.3	0.4	0.5	0.7	1.3	2.6	3.3
6.2	8	0.1	0.1	0.4	0.8	1.6	3.1	3.1
7	7	0.7	0.7	1.1	2.6	3.7	6.4	6.4
9	55	0.2	0.4	0.7	1.1	1.9	4.1	7.1
10	68	0.1	0.2	0.4	0.8	1.5	2.1	6.6
12.1	21	0.1	0.1	0.3	0.8	1.7	2.6	6.4
12.2	16	0.3	0.3	0.4	0.8	1.6	2.4	4.3
13.1	4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.9	1.1	1.1
13.2	14	0.4	0.5	0.6	1.2	1.8	2.4	2.6
14	8	0.2	0.2	0.2	0.4	1.8	3.7	3.7
15	10	0.7	0.7	0.9	1.2	1.4	1.6	1.7
18.1	3	1.4	1.4	1.4	1.5	13.8	13.8	13.8
18.2	4	0.6	0.6	0.6	1.2	2.6	3.4	3.4

Tab. 4.10: Natriumsättigung des Kationenaustauschers in %; statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	21.3	21.3	37.5	67.7	93.5	165.4	165.4
3	21	16.8	43.1	61.7	87.7	109.0	125.8	137.8
4	26	46.3	60.9	72.5	84.2	100.9	117.0	138.2
6.1	19	35.8	50.7	57.6	67.2	91.4	107.7	114.4
6.2	15	21.9	39.9	43.0	65.2	78.9	121.9	159.6
7	8	33.5	33.5	44.8	55.3	76.8	99.5	99.5
9	63	15.9	36.0	45.4	70.9	90.3	101.2	133.5
10	89	27.8	47.4	57.7	74.0	88.2	104.8	140.3
12.1	23	25.1	39.0	48.8	65.9	82.9	93.6	111.3
12.2	16	4.0	8.1	38.6	54.1	76.3	83.6	87.5
13.1	9	36.4	36.4	44.4	63.5	73.0	79.4	79.4
13.2	14	17.5	30.1	52.5	75.6	82.8	85.9	90.1
14	8	3.1	3.1	8.8	23.2	43.2	88.8	88.8
15	10	2.6	12.3	38.1	49.7	71.9	94.4	96.5
18.1	5	27.9	27.9	33.6	37.8	39.9	65.3	65.3
18.2	4	18.2	18.2	18.6	25.0	36.1	41.2	41.2

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	22.0	22.0	36.9	63.4	65.8	133.8	133.8
3	21	21.6	36.0	42.3	55.7	66.3	72.6	99.3
4	24	12.4	37.6	41.3	46.7	53.5	64.7	73.6
6.1	18	22.5	28.5	37.1	43.4	51.1	56.1	65.5
6.2	15	25.8	26.7	31.4	40.2	55.9	63.8	65.3
7	8	14.5	14.5	20.7	32.2	42.8	65.6	65.6
9	63	13.7	35.5	40.9	49.3	57.0	65.9	79.9
10	88	13.5	34.8	40.0	47.9	56.6	64.5	74.8
12.1	23	26.8	37.8	38.6	41.5	54.6	57.0	75.6
12.2	15	6.9	11.8	32.6	36.7	43.7	55.0	65.9
13.1	9	25.4	25.4	35.4	41.3	52.4	80.3	80.3
13.2	14	10.2	18.6	35.9	41.0	46.7	51.5	54.3
14	8	9.5	9.5	21.4	41.9	52.2	75.5	75.5
15	10	10.6	21.1	36.0	40.3	47.1	55.5	58.9
18.1	5	19.7	19.7	24.2	26.0	32.0	34.9	34.9
18.2	4	7.9	7.9	17.4	29.0	33.7	36.2	36.2

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	6	17.3	17.3	19.9	29.2	41.9	63.6	63.6
3	18	7.3	11.8	13.3	20.1	30.9	55.6	60.4
4	24	10.5	11.7	18.9	28.8	41.4	55.9	71.6
6.1	16	19.2	19.6	25.3	31.2	47.5	63.0	70.7
6.2	8	9.5	9.5	16.6	24.2	36.1	54.9	54.9
7	7	1.4	1.4	1.8	4.0	6.2	9.7	9.7
9	55	0.0	11.1	19.1	29.5	37.8	48.4	63.6
10	68	1.7	17.8	26.5	34.2	51.7	60.6	82.6
12.1	21	11.9	12.6	23.5	27.8	45.4	57.6	59.8
12.2	16	2.8	5.8	9.6	21.5	38.8	60.6	70.4
13.1	4	13.9	13.9	22.3	49.3	69.8	71.7	71.7
13.2	14	1.2	6.4	11.0	26.1	35.2	50.1	51.4
14	8	0.0	0.0	8.8	9.5	13.2	24.5	24.5
15	10	2.7	2.9	5.5	10.3	23.1	25.6	27.6
18.1	3	1.2	1.2	1.2	36.2	42.3	42.3	42.3
18.2	4	3.9	3.9	13.0	24.9	32.0	36.2	36.2

Tab. 4.11: Austauschbarer Aluminiumgehalt in $\mu\text{mol I\AA}/\text{g}$; statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	29	29	38	56	81	88	88
3	21	25	51	59	74	82	86	93
4	26	47	54	59	70	75	88	91
6.1	19	51	53	58	69	82	88	88
6.2	15	13	58	62	68	75	78	84
7	8	42	42	59	79	83	85	85
9	63	17	43	50	66	75	81	89
10	89	33	43	57	67	77	84	94
12.1	23	44	48	58	63	70	75	82
12.2	16	5	12	36	60	70	73	78
13.1	9	16	16	27	61	64	76	76
13.2	14	17	35	59	67	73	76	77
14	8	2	2	8	28	51	80	80
15	10	4	12	44	61	68	74	74
18.1	5	37	37	43	44	48	63	63
18.2	4	20	20	24	29	39	48	48

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	57	57	77	92	95	96	96
3	21	58	83	89	92	92	95	95
4	24	77	81	86	89	92	94	94
6.1	18	67	68	79	86	92	94	94
6.2	15	56	68	70	78	84	89	92
7	8	40	40	72	77	84	88	88
9	63	21	71	77	83	88	90	94
10	88	29	78	81	87	90	92	94
12.1	23	74	76	80	85	87	87	92
12.2	15	15	20	66	80	85	87	89
13.1	9	67	67	77	79	83	92	92
13.2	14	38	56	77	82	88	92	93
14	8	2	2	43	68	78	92	92
15	10	22	42	68	80	86	89	90
18.1	5	68	68	72	76	84	85	85
18.2	4	13	13	36	65	75	79	79

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	6	77	77	90	92	93	95	95
3	18	72	75	83	90	94	95	97
4	24	69	72	82	86	91	94	96
6.1	16	40	72	76	85	89	91	94
6.2	8	8	8	31	41	51	62	62
7	7	1	1	3	4	7	8	8
9	55	0	16	43	62	81	90	93
10	68	3	51	68	80	87	91	95
12.1	21	22	23	50	61	70	78	89
12.2	16	3	7	15	36	52	77	79
13.1	4	45	45	56	70	78	83	83
13.2	14	2	5	12	27	48	58	93
14	8	0	0	2	4	14	21	21
15	10	2	3	6	15	21	25	28
18.1	3	20	20	20	62	83	83	83
18.2	4	5	5	14	23	37	50	50

Tab. 4.12: Aluminiumsättigung des Kationenaustauschers in %: statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	0.1	0.1	0.5	2.0	3.6	12.4	12.4
3	21	0.0	0.0	0.1	0.5	2.5	7.7	10.2
4	26	0.1	0.4	0.7	1.3	3.2	6.7	19.4
6.1	19	0.1	0.1	0.3	0.5	3.3	8.8	12.5
6.2	15	0.2	0.5	0.8	4.4	7.9	11.1	19.1
7	8	0.1	0.1	0.4	1.4	2.6	6.7	6.7
9	63	0.1	1.5	2.9	6.0	8.6	12.7	19.9
10	89	0.4	1.0	1.9	3.0	6.8	12.1	16.8
12.1	23	1.4	2.0	2.5	5.4	7.7	9.9	14.0
12.2	16	0.8	1.3	2.4	3.1	8.8	18.9	24.5
13.1	9	0.5	0.5	1.6	2.5	26.3	33.9	33.9
13.2	14	0.4	0.7	1.1	2.3	6.4	11.0	11.8
14	8	2.5	2.5	3.5	4.3	6.0	9.2	9.2
15	10	0.7	0.9	1.3	6.6	10.4	14.3	17.4
18.1	5	3.1	3.1	3.3	5.0	5.2	10.3	10.3
18.2	4	2.5	2.5	4.6	9.7	19.9	27.2	27.2

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	0.0	0.0	0.2	0.5	1.3	2.0	2.0
3	21	0.0	0.0	0.2	0.6	1.2	2.3	9.5
4	24	0.2	0.4	0.8	1.4	2.4	3.1	4.5
6.1	18	0.0	0.0	0.1	0.6	2.0	5.4	6.4
6.2	15	0.1	0.2	0.2	1.3	3.0	8.0	10.3
7	8	0.0	0.0	0.7	1.1	2.6	3.9	3.9
9	63	0.0	0.7	1.2	2.0	2.9	4.7	11.5
10	88	0.3	0.5	0.9	1.5	2.3	3.5	9.8
12.1	23	0.8	0.9	1.2	2.4	3.6	4.1	5.1
12.2	15	0.8	0.9	1.3	1.6	2.5	2.9	3.5
13.1	9	0.8	0.8	1.6	2.1	4.7	8.0	8.0
13.2	14	0.3	0.4	0.5	1.4	3.2	4.4	5.6
14	8	0.6	0.6	0.9	1.3	1.7	1.9	1.9
15	10	0.8	1.1	2.1	2.3	3.6	4.4	4.9
18.1	5	0.5	0.5	0.6	1.1	2.4	2.5	2.5
18.2	4	0.8	0.8	1.5	2.1	2.2	2.2	2.2

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	6	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4
3	18	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	1.0	1.1
4	24	0.0	0.1	0.3	0.6	1.1	1.3	1.4
6.1	16	0.0	0.1	0.3	0.4	0.7	1.7	5.1
6.2	8	0.0	0.0	0.5	0.6	1.0	1.3	1.3
7	7	0.2	0.2	0.4	1.0	1.8	1.8	1.8
9	55	0.0	0.3	0.6	1.2	2.1	2.7	6.7
10	68	0.0	0.2	0.5	0.9	1.5	2.9	6.6
12.1	21	0.3	0.4	0.7	1.1	1.7	2.6	4.7
12.2	16	0.1	0.2	0.5	0.8	1.3	2.3	3.1
13.1	4	0.4	0.4	0.4	0.5	1.2	1.9	1.9
13.2	14	0.3	0.3	0.3	0.4	0.9	1.4	1.9
14	8	0.3	0.3	0.3	0.6	0.8	1.1	1.1
15	10	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	1.0	1.2
18.1	3	0.1	0.1	0.1	0.6	1.7	1.7	1.7
18.2	4	0.3	0.3	0.3	0.7	1.9	2.7	2.7

Tab. 4.13: Austauschbarer Mangengehalt in $\mu\text{mol IA/g}$; statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
2	7	0.2	0.2	0.3	1.1	3.2	11.2	11.2
3	21	0.0	0.0	0.2	0.5	2.6	6.6	10.3
4	26	0.1	0.2	0.5	1.0	3.4	6.5	17.3
6.1	19	0.1	0.1	0.2	0.6	2.2	9.8	11.8
6.2	15	0.2	0.4	0.7	3.1	9.3	16.8	17.1
7	8	0.2	0.2	0.6	1.5	2.2	5.8	5.8
9	63	0.1	0.9	2.7	5.7	9.3	14.6	20.3
10	89	0.4	0.8	1.5	3.0	7.3	11.7	22.2
12.1	23	0.8	1.4	2.8	4.3	8.8	12.7	27.1
12.2	16	0.9	1.2	2.7	4.4	8.4	13.9	25.0
13.1	9	0.5	0.5	1.3	2.5	12.0	16.2	16.2
13.2	14	0.3	0.5	1.2	2.4	7.4	10.2	12.3
14	8	2.2	2.2	3.1	4.8	5.9	11.7	11.7
15	10	0.6	0.7	2.0	9.0	10.6	13.7	14.5
18.1	5	2.9	2.9	3.6	5.3	7.6	14.7	14.7
18.2	4	4.0	4.0	7.4	12.0	16.1	19.0	19.0

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
2	7	0.0	0.0	0.3	0.9	1.5	3.0	3.0
3	21	0.0	0.0	0.3	0.9	2.0	4.3	18.1
4	24	0.4	0.6	1.4	2.9	5.2	6.3	7.1
6.1	18	0.0	0.0	0.2	1.2	3.0	10.8	11.7
6.2	15	0.2	0.2	0.3	2.7	8.6	12.4	18.0
7	8	0.2	0.2	1.6	2.3	3.8	7.7	7.7
9	63	0.0	1.5	2.2	3.0	4.7	9.4	14.4
10	88	0.4	1.1	1.8	2.7	4.0	5.9	15.5
12.1	23	1.6	1.8	2.8	4.3	6.0	7.3	11.5
12.2	15	1.4	2.0	2.1	3.4	4.1	7.3	8.2
13.1	9	2.3	2.3	2.9	3.6	9.9	21.0	21.0
13.2	14	0.6	0.9	1.2	2.7	5.2	11.4	11.8
14	8	0.1	0.1	1.2	2.2	3.0	3.4	3.4
15	10	0.8	1.6	3.6	4.6	7.8	9.4	10.2
18.1	5	1.5	1.5	1.9	2.8	6.7	7.7	7.7
18.2	4	1.6	1.6	2.6	4.1	5.1	5.6	5.6

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
2	6	0.0	0.0	0.2	0.3	1.0	1.2	1.2
3	18	0.0	0.0	0.0	0.6	1.9	4.7	6.2
4	24	0.0	0.3	0.8	2.2	3.0	4.1	5.6
6.1	16	0.2	0.2	0.6	0.8	1.9	4.5	10.1
6.2	8	0.0	0.0	0.5	0.7	1.4	3.2	3.2
7	7	0.2	0.2	0.4	1.4	2.0	2.1	2.1
9	55	0.0	0.5	1.5	2.4	3.7	5.2	9.3
10	68	0.0	0.7	1.1	1.9	3.0	4.4	9.7
12.1	21	0.6	0.7	1.1	2.8	3.7	5.8	6.4
12.2	16	0.2	0.3	0.8	1.1	1.7	2.5	3.0
13.1	4	0.4	0.4	0.7	1.5	2.0	2.0	2.0
13.2	14	0.2	0.3	0.3	0.6	1.1	1.9	2.2
14	8	0.1	0.1	0.1	0.5	0.7	0.9	0.9
15	10	0.1	0.2	0.5	0.7	1.0	1.7	2.3
18.1	3	1.2	1.2	1.2	2.4	2.9	2.9	2.9
18.2	4	0.3	0.3	0.3	0.9	2.6	3.8	3.8

Tab. 4.14: Mangansättigung des Kationenaustauschers in %: statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	5.0	5.0	8.0	22.0	34.2	49.9	49.9
3	21	0.0	1.6	10.0	14.4	19.0	32.1	49.2
4	26	0.0	1.0	7.0	15.0	23.0	27.0	46.9
6.1	19	2.0	3.0	3.2	10.0	24.0	31.0	46.0
6.2	15	0.5	2.0	3.0	5.0	11.0	13.2	14.0
7	8	0.0	0.0	2.6	6.5	12.0	18.0	18.0
9	63	0.0	1.0	3.0	5.5	11.0	18.0	36.0
10	89	0.0	1.4	4.0	10.0	17.0	29.0	54.3
12.1	23	0.0	2.0	5.0	8.1	22.0	37.0	55.0
12.2	16	0.0	0.0	1.5	6.0	13.0	17.8	18.0
13.1	9	2.0	2.0	15.0	16.0	18.0	35.0	35.0
13.2	14	0.0	0.0	3.1	6.6	12.0	17.0	22.0
14	8	0.0	0.0	0.0	2.0	7.9	9.0	9.0
15	10	0.0	0.5	1.0	6.0	9.0	12.5	15.0
18.1	5	1.0	1.0	7.0	10.0	10.0	57.0	57.0
18.2	4	2.0	2.0	2.0	4.2	7.7	9.0	9.0

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	0.0	0.0	0.0	0.2	10.4	11.1	11.1
3	21	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	2.5	18.8
4	24	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	3.0	4.0
6.1	18	0.0	0.0	0.0	1.0	3.0	6.0	11.0
6.2	15	0.0	0.0	0.0	1.0	3.0	3.0	3.6
7	8	0.0	0.0	0.3	2.0	3.0	4.0	4.0
9	63	0.0	0.0	0.0	1.0	3.0	5.0	7.0
10	88	0.0	0.0	0.0	1.0	4.0	7.0	11.0
12.1	23	0.0	0.0	0.0	1.0	2.3	3.0	7.0
12.2	15	0.0	0.0	0.0	0.9	2.0	3.0	7.0
13.1	9	0.0	0.0	0.0	1.0	3.0	7.0	7.0
13.2	14	0.0	0.0	0.0	0.6	2.0	3.0	8.0
14	8	0.0	0.0	0.5	1.5	2.0	3.0	3.0
15	10	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.0	4.0
18.1	5	0.0	0.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0
18.2	4	0.0	0.0	0.0	0.1	4.1	8.0	8.0

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
3	18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
4	24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	1.2	2.0
6.1	16	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	3.0	4.0
6.2	8	0.0	0.0	1.0	1.5	2.5	3.0	3.0
7	7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
9	55	0.0	0.0	0.0	1.4	2.2	3.0	6.0
10	68	0.0	0.0	0.0	1.1	4.0	8.0	9.0
12.1	21	0.0	0.0	0.5	2.0	3.0	3.6	5.0
12.2	16	0.0	0.0	0.6	1.1	2.5	4.0	4.0
13.1	4	1.0	1.0	1.5	2.5	5.0	7.0	7.0
13.2	14	0.0	0.0	0.0	1.1	2.0	2.3	3.0
14	8	0.0	0.0	0.0	0.5	1.5	3.0	3.0
15	10	0.0	0.0	0.0	1.0	2.0	4.0	5.0
18.1	3	0.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0
18.2	4	0.0	0.0	0.5	1.5	5.0	8.0	8.0

Tab. 4.15: Austauschbare Protonen in $\mu\text{mol I\ddot{A}/g}$; statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	0.7	0.7	1.5	4.8	5.6	6.0	6.0
3	21	0.0	0.5	1.9	4.9	8.5	11.7	14.7
4	26	0.2	0.5	1.4	7.3	9.9	12.9	16.2
6.1	19	0.6	0.7	1.6	3.2	8.2	11.3	23.4
6.2	15	0.2	0.4	0.6	2.6	4.4	8.1	9.5
7	8	0.2	0.2	0.5	1.5	6.2	9.8	9.8
9	63	0.0	0.0	0.1	0.8	4.2	10.9	18.7
10	89	0.0	0.2	0.4	1.8	6.1	13.2	29.5
12.1	23	0.0	0.1	0.2	1.4	8.0	10.0	19.0
12.2	16	0.0	0.0	0.0	0.9	2.8	4.6	8.5
13.1	9	0.7	0.7	5.0	6.3	8.2	13.8	13.8
13.2	14	0.0	0.1	0.5	3.9	9.9	13.6	13.9
14	8	0.0	0.0	0.0	0.1	1.5	2.6	2.6
15	10	0.0	0.1	0.5	1.5	9.5	16.2	19.3
18.1	5	0.1	0.1	0.2	0.4	8.5	11.0	11.0
18.2	4	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.6

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	4.7	4.7
3	21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	2.4	5.3
4	24	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.9	4.0
6.1	18	0.0	0.0	0.0	0.2	1.0	1.8	9.7
6.2	15	0.0	0.0	0.0	0.2	0.9	1.2	3.9
7	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.9	0.9
9	63	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	2.1
10	88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	1.8
12.1	23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.7
12.2	15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
13.1	9	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.4	0.4
13.2	14	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	3.1
14	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.3
15	10	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
18.1	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.4	0.4
18.2	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.7
4	24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8
6.1	16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	1.2
6.2	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
9	55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.1
10	68	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.9
12.1	21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
12.2	16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
13.1	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
13.2	14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
14	8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	10	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
18.1	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	0.6
18.2	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tab. 4.16: Austauschbarer Eisengehalt in $\mu\text{mol I\AA}/\text{g}$: statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	5	5	7	21	41	49	49
3	21	0	3	12	19	24	34	55
4	26	1	2	12	20	23	29	41
6.1	19	4	4	8	13	26	34	34
6.2	15	1	3	4	9	12	14	18
7	8	2	2	8	11	13	23	23
9	63	0	1	3	7	11	19	25
10	89	0	2	5	10	20	30	45
12.1	23	0	3	6	12	20	31	40
12.2	16	0	0	2	9	12	18	21
13.1	9	7	7	11	16	23	28	28
13.2	14	0	3	7	10	14	23	28
14	8	0	0	0	3	9	10	10
15	10	0	1	2	8	20	20	20
18.1	5	2	2	10	16	22	38	38
18.2	4	2	2	3	4	10	14	14

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	7	0	0	0	0	18	32	32
3	21	0	0	0	0	3	6	38
4	24	0	0	0	0	2	7	9
6.1	18	0	0	0	3	9	22	29
6.2	15	0	0	1	3	7	8	9
7	8	0	0	2	4	7	9	9
9	63	0	0	0	2	5	7	14
10	88	0	0	0	2	6	14	24
12.1	23	0	0	0	2	5	6	8
12.2	15	0	0	0	1	4	6	15
13.1	9	0	0	0	2	5	11	11
13.2	14	0	0	0	1	4	7	18
14	8	0	0	1	2	3	6	6
15	10	0	0	0	0	2	6	9
18.1	5	0	0	3	3	5	6	6
18.2	4	0	0	0	0	8	15	15

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	
2	6	0	0	0	0	0	1	1
3	18	0	0	0	0	0	1	2
4	24	0	0	0	0	1	2	6
6.1	16	0	0	0	1	5	6	6
6.2	8	0	0	1	3	4	4	4
7	7	0	0	0	0	1	1	1
9	55	0	0	0	3	5	5	13
10	68	0	0	0	3	7	15	24
12.1	21	0	0	1	3	6	7	9
12.2	16	0	0	1	2	4	4	6
13.1	4	3	3	3	4	6	7	7
13.2	14	0	0	0	1	2	3	4
14	8	0	0	0	0	1	4	4
15	10	0	0	0	1	3	4	5
18.1	3	0	0	0	4	4	4	4
18.2	4	0	0	1	1	5	9	9

Tab. 4.17: Eisen- und Protonensättigung des Kationenaustauschers in %: statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

Tiefenbereich 1			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
2	7	4	4	5	8	21	46	46
3	21	2	3	5	7	11	20	35
4	26	4	5	7	10	16	20	28
6.1	19	5	5	6	9	15	23	30
6.2	15	9	10	12	13	22	26	81
7	8	8	8	8	12	24	33	33
9	63	7	9	11	18	29	42	73
10	89	3	6	8	12	22	34	49
12.1	23	9	10	12	16	21	25	39
12.2	16	8	9	17	23	41	83	92
13.1	9	6	6	12	29	43	62	62
13.2	14	8	8	9	16	29	51	74
14	8	8	8	37	57	88	96	96
15	10	6	9	13	22	33	80	91
18.1	5	15	15	22	27	32	49	49
18.2	4	34	34	41	52	61	65	65

Tiefenbereich 2			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
2	7	3	3	3	5	7	11	11
3	21	3	4	4	5	7	10	16
4	24	2	4	4	6	9	10	11
6.1	18	4	4	5	7	9	11	12
6.2	15	5	7	9	10	18	29	31
7	8	7	7	8	14	21	53	53
9	63	4	6	7	9	12	19	77
10	88	3	4	5	7	9	12	68
12.1	23	6	6	7	8	11	12	19
12.2	15	7	8	10	13	29	78	83
13.1	9	3	3	6	10	13	20	20
13.2	14	5	5	7	9	14	43	60
14	8	5	5	16	27	53	98	98
15	10	6	7	12	13	25	52	69
18.1	5	8	8	10	12	19	30	30
18.2	4	17	17	19	24	54	83	83

Tiefenbereich 3			Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					
BG	n	Min.	10	25	50	75	90	Max.
2	6	3	3	6	8	9	21	21
3	18	3	4	6	8	13	22	24
4	24	4	5	7	9	14	25	27
6.1	16	4	6	10	11	15	23	54
6.2	8	35	35	47	55	66	90	90
7	7	91	91	91	94	95	99	99
9	55	5	8	13	30	52	78	99
10	68	3	5	7	12	20	41	96
12.1	21	7	12	22	30	45	71	76
12.2	16	16	20	46	58	83	90	93
13.1	4	10	10	16	24	37	48	48
13.2	14	7	38	50	71	86	93	97
14	8	77	77	84	95	98	99	99
15	10	69	70	75	82	93	97	98
18.1	3	11	11	11	30	77	77	77
18.2	4	46	46	57	72	85	94	94

Tab. 4.18: Basensättigung in %: statistische Kennwerte getrennt nach Tiefenbereichen und Bodengesellschaften (BG)

BG	n	Min.	Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
			10	25	50	75	90	
2	7	71	71	90	112	156	174	174
3	21	49	69	90	131	190	440	495
4	26	27	63	128	196	263	372	666
6.1	19	82	85	190	338	579	876	954
6.2	15	433	1080	1516	1678	2043	2897	3907
7	8	1640	1640	2328	3365	7750	9815	9815
9	63	53	137	171	366	713	1418	2792
10	89	30	89	144	269	423	623	2311
12.1	23	126	273	366	532	981	1210	2835
12.2	16	423	872	1324	3294	6095	7409	7827
13.1	9	232	232	748	1284	1341	1873	1873
13.2	14	785	1012	1587	3298	5186	6397	7058
14	8	1583	1583	7990	10829	37545	103397	103397
15	10	3453	3909	4401	5069	5710	10438	12512
18.1	5	115	115	384	588	843	2355	2355
18.2	4	1848	1848	3737	5693	7525	9290	9290

Tab. 4.19: Calciumvorräte im Mineralboden von 0 - 90 cm (kg/ha): statistische Kennwerte getrennt nach Bodengesellschaften

BG	n	Min.	Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
			10	25	50	75	90	
2	7	13	13	13	23	41	71	71
3	21	5	16	21	26	41	45	88
4	26	21	23	34	49	107	222	817
6.1	19	16	20	50	107	192	512	668
6.2	15	489	527	562	1017	1409	1593	1603
7	8	823	823	1512	1987	3080	3540	3540
9	63	14	45	64	154	305	508	1807
10	89	6	26	38	74	156	274	1253
12.1	23	37	64	126	238	502	689	1192
12.2	16	143	260	439	881	1502	2401	3989
13.1	9	77	77	504	592	845	1253	1253
13.2	14	316	430	1238	2731	3271	4894	5192
14	8	813	813	1467	2290	2760	3012	3012
15	10	1024	1096	1341	1759	2265	2430	2440
18.1	5	17	17	89	121	159	197	197
18.2	4	347	347	1094	1985	2207	2285	2285

Tab. 4.20: Magnesiumvorräte im Mineralboden von 0 - 90 cm (kg/ha): statistische Kennwerte getrennt nach Bodengesellschaften

BG	n	Min.	Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
			10	25	50	75	90	
2	7	23	23	43	82	154	326	326
3	21	72	119	145	172	282	364	504
4	26	164	203	245	331	437	604	754
6.1	19	142	229	272	372	665	816	927
6.2	15	184	301	431	589	623	693	902
7	8	533	533	624	715	810	899	899
9	63	86	129	198	316	423	529	983
10	89	61	119	189	313	449	587	752
12.1	23	240	322	401	577	674	781	1086
12.2	16	390	460	643	906	1314	1567	1655
13.1	9	327	327	419	491	594	669	669
13.2	14	366	421	540	726	935	1421	1708
14	8	755	755	1174	1459	1988	7815	7815
15	10	703	726	762	967	1086	1385	1574
18.1	5	133	133	373	408	443	481	481
18.2	4	811	811	831	931	1048	1087	1087

Tab. 4.21: Kaliumvorräte im Mineralboden von 0 - 90 cm (kg/ha): statistische Kennwerte getrennt nach Bodengesellschaften

BG	n	Min.	Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
			10	25	50	75	90	
2	7	3.88	3.88	4.93	5.48	5.65	6.50	6.50
3	21	3.77	4.32	4.93	5.59	5.76	5.87	6.03
4	26	3.82	4.49	4.71	5.17	5.42	6.09	6.25
6.1	19	4.10	4.59	4.76	5.10	6.03	6.14	6.14
6.2	15	2.57	2.77	3.15	3.85	4.71	4.87	5.15
7	8	2.63	2.63	3.19	3.78	4.14	4.42	4.42
9	63	2.19	2.77	3.99	4.60	4.98	5.26	5.92
10	89	2.74	4.15	4.54	4.81	5.37	5.81	6.14
12.1	23	2.85	4.04	4.65	4.87	5.12	5.31	5.59
12.2	16	0.33	0.61	2.93	3.41	4.55	5.04	5.54
13.1	9	3.71	3.71	3.98	4.43	5.76	5.81	5.81
13.2	14	1.71	1.75	3.68	3.97	4.07	4.70	4.79
14	8	0.00	0.00	0.94	2.62	3.00	4.27	4.27
15	10	0.61	1.79	3.35	3.61	4.35	4.85	4.90
18.1	5	2.69	2.69	4.49	4.81	5.09	5.15	5.15
18.2	4	1.05	1.05	1.65	2.52	3.17	3.54	3.54

A) Versauerungskennziffern (VSKZ)

BG	n	Min.	Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
			10	25	50	75	90	
2	7	4.33	4.33	4.67	6.00	6.00	6.00	6.00
3	21	3.33	3.67	4.00	5.00	5.33	6.67	7.00
4	24	1.67	3.00	3.33	3.67	4.67	5.67	6.00
6.1	18	1.67	2.00	3.33	3.67	4.67	5.67	5.67
6.2	15	1.33	1.67	2.00	2.33	2.67	3.00	3.34
7	8	1.00	1.00	1.17	1.83	2.17	2.67	2.67
9	63	0.33	2.00	2.67	3.00	4.00	4.67	6.34
10	88	1.33	2.33	3.00	4.00	5.00	5.34	7.00
12.1	23	1.00	1.33	2.00	2.67	3.00	3.33	5.34
12.2	15	0.33	0.33	0.83	1.17	2.33	2.67	3.00
13.1	9	1.67	1.67	1.67	2.66	3.00	3.67	3.67
13.2	14	0.00	0.00	1.00	1.33	2.33	2.33	2.67
14	8	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.33	1.33
15	10	0.00	0.00	0.33	0.33	0.33	1.00	1.33
18.1	5	2.00	2.00	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00
18.2	4	0.33	0.33	0.33	0.67	1.17	1.33	1.33

B) Närelementkennziffern (NFKZ)

BG	n	Min.	Perzentile der Summenhäufigkeitsverteilung					Max.
			10	25	50	75	90	
2	7	8.76	8.76	9.88	10.50	11.48	11.54	11.54
3	21	6.43	7.70	8.76	9.87	10.59	11.53	12.82
4	26	5.87	6.32	6.98	7.90	9.25	10.09	10.71
6.1	19	4.48	4.76	6.26	7.32	8.75	9.86	9.93
6.2	15	2.24	2.41	3.15	4.37	5.21	6.05	6.15
7	8	1.79	1.79	2.78	3.60	3.94	4.85	4.85
9	63	1.55	4.35	6.26	7.23	8.71	9.42	11.21
10	89	3.57	6.15	6.88	8.32	9.59	10.36	12.37
12.1	23	2.60	3.99	4.65	5.70	6.65	6.76	8.93
12.2	16	-0.34	0.11	1.43	2.63	4.54	5.70	6.87
13.1	9	3.67	3.67	4.66	5.26	5.43	7.42	7.42
13.2	14	-0.25	0.57	2.68	3.71	4.04	4.29	4.73
14	8	-0.50	-0.50	0.94	1.55	2.32	5.10	5.10
15	10	-1.39	-0.02	1.63	2.16	3.01	3.19	3.23
18.1	5	4.69	4.69	5.99	6.81	7.65	10.10	10.10
18.2	4	0.05	0.05	0.31	0.85	2.50	3.88	3.88

C) Profilsensitivitätskennziffern (PSKZ)

Tab. 4.22: Bewertungsergebnis: A) VSKZ, B) NEKZ und C) PSKZ: statistische Kennwerte getrennt nach Bodengesellschaften

Bewertungsbogen

Bitte nutzen Sie dieses vorbereitete Bewertungsformular, um ihre Bewertungsergebnisse festzuhalten. Die Bewertung soll nach einer 6-stufigen Skala erfolgen:

Stufen	Zustand: bei VSST und NES	Sensitivität: bei GB
1	sehr günstig	sehr gering
2	günstig	gering
3	mäßig günstig	mittel-gering
4	ungünstig	mittel-hoch
5	sehr ungünstig	hoch
6	äußerst ungünstig	sehr hoch

Bewertet werden soll jedes Bodenprofil hinsichtlich **Versauerungseigenschaften (VSST)** und **Nährelementstatus (NES)**. Die Einzelresultate sollen zu einer **Gesamtprofilbewertung (GB)** zusammengefaßt werden.

ARNR	VSST	NES	GB	Kurze Begründung ¹
2251				
1057				
1060				
1077				
1052				
2354				
7016				
2414				
2245				
2407				
2411				
2330				
2343				
2433				
2446				
7003				
9005				
1098				
2106				
2234				
2238				
2493				
7027				
2420				
7014				
2448				
2444				
2202				
2145				
2403				

¹ bei Bedarf bitte gesondertes Blatt benutzen

Tab: 4.23: Bewertungsbogen für Gutachter

Bisher sind folgende Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz erschienen:

- | | | |
|---------|---|----------|
| 1/1987 | Jahresbericht 1984-1986
ISSN 0931 - 9662 | |
| 2/1987 | BLOCK, STELZER:
Radioökologische Untersuchungen in Waldbeständen
ISSN 0931 - 9662 | DM 12,-- |
| 3/1987 | BLOCK, BOCKHOLT, BORCHERT, FINGERHUT, FRAUDE, HEIDINGSFELD:
Sondermeßprogramm Wald (SMW)
ISSN 0931 - 9662 | DM 12,-- |
| 4/1987 | BEUTEL, BLOCK:
Terrestrische Feldgehölzschadenserhebung (TFGE 1986)
ISSN 0931 - 9662 | DM 12,-- |
| 5/1988 | Die Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz im Dienste von Wald und
Forstwirtschaft - Reden anlässlich der Übergabe des Schlosses Trippstadt
als Dienstsitz am 10.04.1987
ISSN 0931 - 9662 | DM 12,-- |
| 6/1988 | Jahresbericht 1987
ISSN 0931 - 9662 | |
| 7/1988 | BEUTEL, BLOCK:
Terrestrische Parkgehölzschadenserhebung (TPGE 1987)
ISSN 0931 - 9662 | DM 12,-- |
| 8/1988 | GERECKE:
Zum Wachstumsgang von Buchen in der Nordpfalz
ISSN 0931 - 9662 | DM 30,-- |
| 9/1989 | Jahresbericht 1988
ISSN 0936 - 6067 | |
| 10/1989 | HEIDINGSFELD:
Verfahren zur luftbildgestützten Intensiv-Waldschadenserhebung in
Rheinland-Pfalz
ISSN 0931 - 9662 | DM 25,-- |
| 11/1989 | BLOCK, DEINET, HEUPEL, ROEDER, WUNN:
Empirische, betriebswirtschaftliche und mathematische Untersuchungen zur
Wipfelköpfung der Fichte
ISSN 0931 - 9662 | DM 12,-- |
| 12/1989 | Jahresbericht 1989
ISSN 0931 - 9662
ISSN 0936 - 6067 | |
| 13/1990 | SCHÜLER:
Der kombinierte Durchforstungs- und Düngungsversuch Kastellaun
- angelegt 1959 - heute noch aktuell?
ISSN 0931 - 9662 | DM 12,-- |
| 14/1990 | BLOCK:
Ergebnisse der Stoffdepositionsmessungen in rheinland-pfälzischen
Waldgebieten 1984 - 1989
ISSN 0931 - 9662 | DM 12,-- |
| 15/1990 | Jahresbericht 1990
ISSN 0931 - 9662
ISSN 0936 - 6067 | |
| 16/1991 | BLOCK, BOCKHOLT, BORCHERT, FINGERHUT, HEIDINGSFELD, SCHRÖCK:
Immissions-, Wirkungs- und Zustandsuntersuchungen in Waldgebieten von
Rheinland-Pfalz - Sondermeßprogramm Wald, Ergebnisse 1983 - 1989
ISSN 0931 - 9662 | DM 12,-- |

17/1991	BLOCK, BOPP, GATTI, HEIDINGSFELD, ZOTH: Waldschäden, Nähr- und Schadstoffgehalte in Nadeln und Waldböden in Rheinland-Pfalz ISSN 0931 - 9662	DM 12,--
18/1991	SCHÜLER, BUTZ-BRAUN, SCHÖNE: Versuche zum Bodenschutz und zur Düngung von Waldbeständen ISSN 0931 - 9662	DM 12,--
19/1991	AUTORENKOLLEKTIV Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Sturm- und Immissionsschäden im Vorderen Hunsrück - "SIMS" - ISSN 0931 - 9662	DM 12,--
20/1992	Jahresbericht 1991 ISSN 0931 - 9662 ISSN 0936 - 6067	
21/1992	AUTORENKOLLEKTIV Der vergleichende Kompensationsversuch mit verschiedenen Puffersubstanzen zur Minderung der Auswirkungen von Luftschadstoffeinträgen in Waldökosystemen - Zwischenergebnisse aus den Versuchsjahren 1988 - 1991 - ISSN 0931 - 9662	DM 12,--
22/1992	Jahresbericht 1992 ISSN 0931 - 9662 ISSN 0936 - 6067	
23/1993	HEIDINGSFELD: Neue Konzepte zum Luftbildeinsatz für großräumig permanente Waldzustandserhebungen und zur bestandesbezogenen Kartierung flächenhafter Waldschäden ISSN 0931 - 9662	DM 18,--
24/1993	BLOCK: Verteilung und Verlagerung von Radiocäsium in zwei Waldökosystemen in Rheinland-Pfalz insbesondere nach Kalk- und Kaliumdüngungen ISSN 0931 - 9662	DM 12,--
25/1994	WIERLING: Zur Ausweisung von Wasserschutzgebieten und den Konsequenzen für die Forstwirtschaft am Beispiel des Pfälzerwaldes	DM 12,--
26/1994	Jahresbericht 1993 ISSN 0931 - 9662 ISSN 0936 - 6067	
27/1994	OESTEN, ROEDER: Zur Wertschätzung der Infrastrukturleistungen des Pfälzerwaldes ISSN 0931 - 9662	DM 12,--
28/1994	SCHRÖCK: Kronenzustand auf Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz - Entwicklung und Einflußfaktoren - ISSN 0931 - 9662	DM 12,--
29/1994	FISCHER: Untersuchung der Qualitätseigenschaften, insbesondere der Festigkeit von Douglasien-Schnittholz (Pseudotsuga Menziesii (Mirb.) Franco), erzeugt aus nicht-wertgeästeten Stämmen	DM 12,--
30/1994	SCHÜLER: Ergebnisse forstmeteorologischer Messungen für den Zeitraum 1988 bis 1992 ISSN 0931 - 9662	DM 12,--
31/1995	Jahresbericht 1994 ISSN 0931 - 9662 ISSN 0936 - 6067	
32/1995	AUTORENKOLLEKTIV Untersuchungen an Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz ISSN 0931 - 9662	DM 12,--

- 33/1995 EISENBARTH:
Schnittholzeigenschaften bei Lebendlagerung von Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.)
aus Wintersturmwurf 1990 in Abhängigkeit von Lagerart und Lagerdauer
ISSN 0931 - 9662 DM 12,--
- 34/1995 AUTORENKOLLEKTIV
Genetik und Waldbau unter besonderer Berücksichtigung der heimischen
Eichenarten
ISSN 0931 - 9662 DM 15,--

1880

1880

1880

... ..

...

1880

1880

1880

... ..

...

...