

Stratifizierung der BZE-Stichprobe hinsichtlich der Dynamik bodenchemischer Eigenschaften

**- Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung,
Landwirtschaft und Forsten -**

von

**Dr. Winfried Riek
Fachhochschule Eberswalde**

Eberswalde, August 1999

Gliederung

	Seite
1. Problemstellung und Zielsetzung	2
2. Grundlagen	3
2.1. Auswertungsansatz	3
2.2. Datenmaterial	6
2.3. Maßstabsebene der Auswertung	7
2.4. Faktoren der bodenchemischen Dynamik	8
3. Ergebnisse	10
3.1. Richtung der Bodenzustandsveränderungen	10
3.2. Hauptgruppenbildung	14
3.3. Mindestdifferenzen und Stichprobenumfang	17
3.4. Stratifizierung nach dem Säurezustand	20
3.5. Stratifizierung nach dem Stickstoffzustand	29
3.6. Stratifizierung nach dem Säure- <i>und</i> Stickstoffzustand	33
4. Diskussion	37
5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	39
6. Literatur	41
Anhang	

1 Problemstellung und Zielsetzung

Die bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) soll Auskunft über den aktuellen chemischen Zustand der Waldböden und dessen Veränderung im Laufe der Zeit geben. In den Jahren 1987 bis 1993 erfolgte die Erstaufnahme der Bodenzustandsdaten durch die Länder. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Länderberichten und dem "Deutschen Waldbodenbericht 1996" dokumentiert (Wolff und Riek 1997). Die Grundlage der BZE bilden ca. 1800 Erhebungspunkte eines repräsentativen Stichprobennetzes mit der Basismaschenweite von 8x8 km. Das Ziel der vorliegenden Studie besteht darin, zu prüfen, ob es notwendig und zweckmäßig ist, bei einer Wiederholungsinventur *alle* Erhebungspunkte der Erstaufnahme erneut zu beproben, oder ob sich der Erhebungs- und damit Kostenaufwand durch ein *stratifiziertes Erhebungsdesign* in Zukunft möglicherweise reduzieren läßt.

Für eine Stratifizierung der BZE-Punkte spricht die Tatsache, daß sich die bodenchemische Dynamik in Abhängigkeit vom Ausgangszustand der Böden sehr unterschiedlich darstellt. Beispielsweise sind Veränderungen des *Aciditätsgrades* von Böden auf *Carbonatgestein* aufgrund der hohen Pufferkapazität des Carbonatpuffersystems (Ulrich 1981) bis zur vollständigen Entkalkung der Oberböden nicht zu erwarten. Auch in *stark versauerten* Böden sind meßbare Veränderungen der Kennwerte des Säure-Basen-Zustandes im Oberboden eher unwahrscheinlich. So zeigen die BZE-Ergebnisse, daß die Basensättigung kaum unter ca. 5 % absinkt und selbst bei extremer Versauerung von einem substratspezifischen "eisernen Bestand" an austauschbar gebundenen Neutralkationen auszugehen ist, der nicht unterschritten wird (vgl. Buberl et al. 1994, Hildebrand 1986, Wolff und Riek 1997). Hinsichtlich des *Stickstoffstatus* der Waldböden kann ebenfalls festgestellt werden, daß das Ausmaß der durch atmogene N-Einträge induzierten Bodenzustandsveränderungen stark vom chemischen Ausgangszustand abhängig ist. Vergleichende Auswertungen von aktuellen und historischen Bodendaten von Altweiserflächen im Nordostdeutschen Tiefland belegen in diesem Zusammenhang exemplarisch, daß sich die Tendenz der eintragsbedingten N-Anreicherung am stärksten auf ursprünglich N-armen Standorten abzeichnet. Auf Böden mit engen C/N-Verhältnissen - insbesondere unter alten Laubholz- und Mischbeständen - sind hingegen keine Unterschiede zwischen Erst- und Zweitbeprobung zu erkennen (vgl. Konopatzki et al. 1998).

In dieser Studie soll anhand von Ergebnissen der BZE-Erstinventur *das Potential der BZE-Standorte, auf Stoffeinträge mit meßbaren Veränderungen chemischer Kennwerte der Bodenfestphase zu reagieren*, eingeschätzt werden. Die Betrachtung beschränkt sich dabei auf mögliche *Veränderungen des Säurezustandes (pH-Wert, Basensättigung) und des C/N-Verhältnisses als Folge versauernd bzw. eutrophierend wirkender Depositionen*. Anhand der Ergebnisse sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie das BZE-Kollektiv für Folgeinventuren am zweckmäßigsten stratifiziert werden könnte.

Die *Konsequenzen* einer stratifizierten BZE-Wiederholung sind bezüglich folgender Aspekte zu bewerten:

- Vergleichbarkeit zwischen Erst- und Folgeerhebung
- Aussagekraft für den aktuellen Bodenzustand zum Zeitpunkt zukünftiger Erhebungen (Repräsentanz)
- Folgen für das forstliche Umweltmonitoring einschließlich integrierender Auswertungen.

2 Grundlagen

2.1 Auswertungsansatz

Zur Bearbeitung der dargelegten Fragestellung erscheint es zunächst naheliegend, die BZE-Erhebungspunkte nach *standortskundlichen Einheiten*, wie geologischem Ausgangssubstrat oder Bodentyp, zu stratifizieren und anschließend deren Sensibilität gegenüber Veränderungen bodenchemischer Merkmale einzuschätzen. Hiervon wurde jedoch abgesehen, weil die Auswertung der BZE-Ersterhebung gezeigt hat, daß bodenchemische Eigenschaften - insbesondere in Bezug auf den Oberbodenzustand - und makromorphologische Bodeneigenschaften als Ausdruck der Pedogenese nur geringfügig miteinander korrelieren. So lassen sich klare Unterschiede bodenchemischer Merkmale ausschließlich zwischen den gut gepufferten Standorten auf Carbonatgestein auf der einen Seite und allen entkalkten Standorten auf der anderen Seite feststellen. Die Ursache für die zu beobachtende *flächendeckende, substratanabhängige Nivellierung der chemischen Oberbodenzustände* ist vor allem im atmogenen Eintrag von Säurebildnern und Stickstoff zu vermuten (Wolff und Riek 1997). Daher erscheint die Stratifizierung der

BZE-Punkte nach Substrat und Pedogenese zur Differenzierung der bodenchemischen Dynamik wenig erfolgversprechend.

Vielmehr muß zunächst die Frage geklärt werden, welche bodenchemischen Veränderungen in *qualitativer* Hinsicht prinzipiell möglich bzw. wahrscheinlich sind, d.h. in welche *Richtung* sich die Dynamik des bodenchemischen Zustandes unter den gegenwärtigen Stoffeintragsbedingungen vollzieht. Hierzu werden in Kapitel 3 Vergleiche zwischen historischen Daten aus der Literatur und den Daten der BZE angestellt. Das Wissen darüber, in welche Richtung sich die Merkmalsveränderungen synchron vollziehen, ist die Grundvoraussetzung für eine Bewertung der *Sensibilität* der BZE-Punkte gegenüber diesen Veränderungen.

Für die Stratifizierung der BZE-Punkte in homogene Gruppen wird ein statistischer Ansatz gewählt. Zum Einsatz kommt das multivariat-statistische Verfahren der Clusteranalyse zu dem bereits Erfahrungen im Rahmen der integrierenden Auswertung von Daten des forstlichen Umweltmonitorings vorliegen (Riek und Wolff 1998, 1999). Auf die Darstellung methodischer Details wird an dieser Stelle mit Hinweis auf die genannte Literatur verzichtet.

Nach erfolgter Einordnung der BZE-Ehebungspunkte in die ermittelten Straten und Beschreibung deren regionaler Verteilung erfolgt eine gutachtliche Einschätzung der Sensibilität dieser Gruppen gegenüber eintragsbedingten Veränderungen bodenchemischer Merkmalsausprägungen. Für alle ermittelten Straten werden sodann Aussagen zu Mindestdifferenzen der bodenchemischen Parameter (Δ_{\min}) zwischen Erst- und Zweiterhebung getroffen, die notwendig sind, um Bodenzustandsveränderungen statistisch signifikant nachweisen zu können. Als Irrtumswahrscheinlichkeit wird hierbei $\alpha < 0.05$ zugrundegelegt. Nach dem t-Test zur Prüfung von Meßwertdifferenzen zwischen gepaarten Stichproben ist

$$t_{emp} = \Delta \times \frac{\sqrt{n}}{SD} \quad \text{bzw.} \quad \Delta_{\min} = t_{n-1; \alpha} \times \frac{SD}{\sqrt{n}}$$

mit

t t-Wert für zweiseitige Fragestellungen

(t_{emp}empirischer t-Wert;

$t_{n-1; \alpha}$Tabellenwert für n-1 Freiheitsgrade und Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha < 0.05$)

Δ Mittelwert der Differenzen zwischen Erst- und Zweiterhebung

Δ_{\min} mittlere Mindestdifferenz zwischen Erst- und Zweiterhebung, die bei gegebener Irrtumswahrscheinlichkeit notwendig ist, um auf signifikante Unterschiede schließen zu können

n Anzahl der gebildeten Differenzen innerhalb eines Stratum

SD Standardabweichung der Differenzen zwischen Erst- und Zweiterhebung.

Für die Auswertung werden simulierte Daten einer Wiederholungserhebung verwendet. Diese hypothetischen Meßwerte werden als normalverteilte Zufallszahlen mit vorgegebenen Mittelwerten und Standardabweichungen berechnet. Zur Veranschaulichung dient die Abb.1, in der beispielhaft für die C/N-Verhältnisse Häufigkeitsverteilungen 1) der Werte aus der BZE-Ersterhebung und 2) für die simulierten Werte dargestellt sind. Die simulierten Werte wurden so bestimmt, daß sie

- einer Normalverteilung unterliegen,
- dieselbe Standardabweichung besitzen wie die Werte der Erstinventur (im Beispiel: SD = 5.8) und daß
- der Mittelwertunterschied zwischen den beiden Datensätzen exakt 5 beträgt.

Analog lassen sich für verschiedene Mittelwertunterschiede Meßdaten synthetisieren.

Der Betrag der absicherbaren mittleren Differenz zwischen den simulierten Werten und den tatsächlichen BZE-Daten der Erstinventur wird in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang für die Parameter Basensättigung und C/N-Verhältnis grafisch dargestellt. Da die Prämisse der Simulation - die identischen Standardabweichungen - bei einer tatsächlichen Wiederholungsinventur nicht exakt erfüllt sein würde, handelt es sich bei den so ermittelten Mindestdifferenzen nur um *Orientierungswerte*, die dazu dienen sollen, eine Vorstellung von den Größenordnungen zu bekommen, in denen Bodenzustandsänderungen zu erfolgen hätten, um statistisch absicherbar zu sein. Insbesondere ermöglicht es dieser Ansatz, die Variabilität verschiedener Stichproben (Straten) unter dem Aspekt der Absicherbarkeit von *zeitlichen* Bodenzustandsunterschieden zu bewerten.

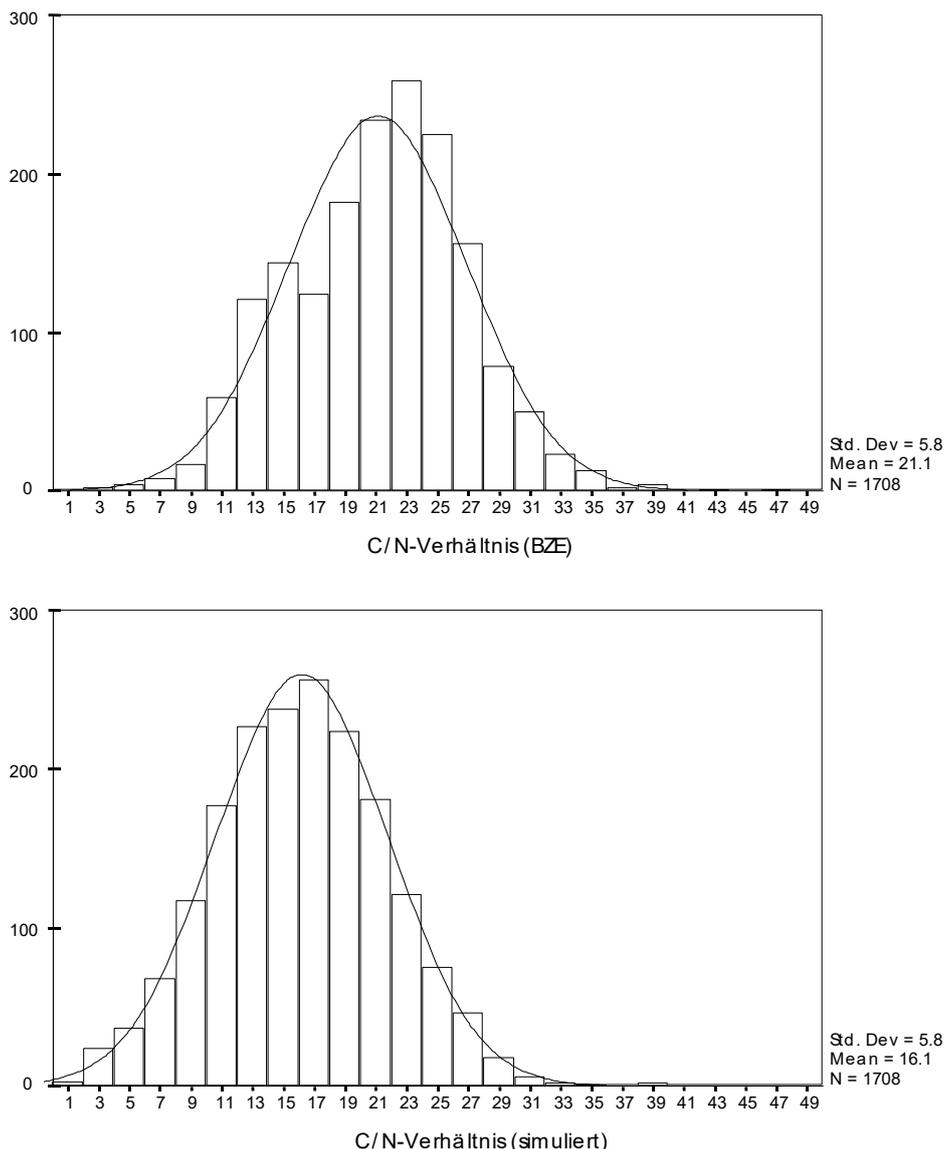


Abb.1: Vergleich von C/N-Verhältnissen aus der BZE-Erstinventur und C/N-Verhältnissen einer simulierten Zweitinventur (Prämisse der Simulation: SD identisch; Mittelwertunterschied = 5)

2.2 Datenmaterial

Aus der bundesweiten BZE-Datenbasis, wie sie gegenwärtig an der BFH verfügbar ist, wurden die für die angestrebten Auswertungen benötigten Daten extrahiert. Bezüglich *Stichprobenumfang* und *Stichprobenrepräsentativität* erscheinen folgende grundsätzliche Feststellungen für die statistische Auswertung von Bedeutung:

Die einzelnen Datensätze der BZE-Punkte sind mit Kennwerten des Unterbodens sehr unterschiedlich belegt. Bei Berücksichtigung *aller* Kennwerte und Tiefenstufen

(maximal bis 2 m Tiefe) stehen daher nur vergleichsweise wenig Punkte mit *komplettem* Merkmalspektrum zur Verfügung. Alle bayerischen Punkte würden ohnehin aus der Betrachtung herausfallen, da in Bayern grundsätzlich nur bis 30 cm Tiefe beprobt worden ist. Auch die Böden, bei denen das Festgestein in geringerer Tiefe als 200 cm ansteht, könnten in diesem Fall nicht berücksichtigt werden.

Einige Zahlen zum Stichprobenumfang mögen dies veranschaulichen: Die maximale Anzahl an BZE-Punkten, für die mindestens ein Datum vorliegt, beträgt 1827. Bei Berücksichtigung von pH-Wert *und* Basensättigung im Oberboden (0-10 cm Tiefe) liegen *komplette* Datensätze noch für 1730 BZE-Punkte vor. Nimmt man die Humusform und das C/N-Verhältnis hinzu, reduziert sich die Anzahl der Punkte mit kompletten Datensätzen weiterhin auf 1571. Würde man die pH-Werte und Basensättigungen bis 200 cm Tiefe, das C/N-Verhältnis und die Humusform gleichzeitig in einer statistischen Analyse berücksichtigen wollen, so hätte das eine Reduktion der Stichprobe auf 336 (!) Erhebungspunkte mit kompletten Datensätzen zur Folge.

Aus diesen Beispielen wird deutlich, daß die Wahrung der Repräsentativität von Ergebnissen der *multivariaten* Auswertungen nur auf Kosten der Breite des Merkmalspektrums, d.h. vor allem durch den Verzicht auf die Betrachtung der Kennwerte im Unterboden, möglich ist. Um die gewünschte Stratifizierung anhand von einer maximalen Anzahl an BZE-Punkten durchführen und dadurch flächenrepräsentative Aussagen gewährleisten zu können, werden in dieser Studie vorwiegend die Merkmale des Oberbodens betrachtet. *Bei der Interpretation der Ergebnisse, die sich aus der Analyse von Unterbodenmerkmalen ergeben, ist deren eingeschränkte Aussagekraft bezüglich der Gesamtwaldfläche Deutschlands zu beachten.*

2.3 Maßstabsebene der Auswertung

Eine exakte *punktbezogene* Quantifizierung der Dynamik von Bodenversauerung und Stickstoffanreicherung kann ausschließlich anhand ökosystemarer Stoffbilanzen erfolgen - ein Ansatz, dessen Realisierung den Untersuchungsflächen des Level II-Programms vorbehalten ist. Auf den Erhebungspunkten des Level I-Programms werden die dafür benötigten Daten der Bodenlösungschemie nicht erfaßt. Flächenrepräsentative Aussagen zur langfristigen Veränderung von Versauerungs-

und Stickstoffstatus lassen sich prinzipiell aber auch auf Level I durch Wiederholungsinventuren anhand von indikativen Merkmalen der *Bodenfestphase* treffen. Geeignete Kenngrößen hierfür sind der pH-Wert und die Basensättigung zur Kennzeichnung der Versauerung und das C/N-Verhältnis in Verbindung mit der morphologischen Humusform zur Charakterisierung des N-Status. Aufgrund der kleinräumigen Variabilität der bodenchemischen Kennwerte erscheint es aber unmöglich *punktbezogene* Aussagen zu den langfristigen Trends der Bodenchemie auf Level I zu treffen. Aussagen zur Dynamik können lediglich für bestimmte Befundeinheiten getroffen werden, wenn sich deren mittlere Merkmalsausprägungen (arithmetisches Mittel, Median) zwischen Erst- und Folgeinventuren unter Berücksichtigung der jeweiligen Streuung signifikant unterscheiden. Solche Befundeinheiten können entweder Regionen sein oder auch hinsichtlich ihres Merkmalspektrums homogene Typen, die nicht zwangsläufig räumlich vergesellschaftet sein müssen (vgl. Riek und Wolff 1999.). Daher stehen hier nicht die einzelnen Erhebungspunkte und deren bodenchemische Dynamik im Zentrum des Interesses sondern vielmehr die mittlere Veränderung innerhalb einer Gruppe bzw. eines Typs von Untersuchungspunkten. Die Ermittlung und Abgrenzung dafür geeigneter Gruppen erscheint für die Untersuchung zeitlicher Veränderungen auf Level I *in jedem Falle eine unabdingbare Voraussetzung*.

2.4 Faktoren der bodenchemischen Dynamik

Die bodenchemischen Kennwerte der Festphase Basensättigung, pH(KCl)-Wert und C/N-Verhältnis sind im Vergleich zur Bodenlösungschemie relativ stabile und reproduzierbare Merkmale, die nur geringfügig von innerannuell wirksamen Faktoren beeinflusst werden. Über lange Zeiträume hinweg unterliegen sie jedoch wie alle Bodenmerkmale gewissen Veränderungen, welche die Folge *natürlicher pedogener Prozesse* sind und letztlich zur Ausprägung unterschiedlicher Bodentypen in Abhängigkeit von Ausgangsgestein, Relief, Klima und Nutzung führen. Eine Zunahme der Dynamik chemischer Eigenschaften insbesondere der Oberböden infolge von *Depositionseinflüssen* vollzieht sich seit einigen Jahrzehnten in verschiedenen Regionen Deutschlands (Ulrich et al. 1989, v. Zezschwitz 1985, Wittmann und Fetzer 1982). Die Bedeutung der natürlichen Versauerung von Böden

in Relation zu der durch atmosphären Säureeintrag bedingten ist in der Literatur vielfach diskutiert worden (vgl. Veerhof et al. 1996).

Bei den BZE-Daten könnte der Nachweis, daß nach einer Zweiterhebung festzustellende Bodenzustandsveränderungen auf atmosphäre Einträge zurückzuführen sind, dadurch geführt werden, daß die Ausprägung der Unterschiede zwischen Erst- und Zweitinventur statistisch mit großräumigen Flächendaten zur atmosphären Stoffeintragungssituation während der Zeit zwischen den Erhebungen in Beziehung gesetzt wird. Die dafür notwendigen modellierten Naß- und Trockendepositionsdaten aller BZE-Punkte liegen im Prinzip vor. Sie wurden der BFH zur Verwendung im Rahmen des Projektes "Integrierende Auswertung von Waldzustandsdaten" (Riek und Wolff 1999) durch das Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt.

Ein wichtiger Aspekt anthropogen bedingter Bodenzustandsveränderungen ergibt sich ferner aus der durch Kalkungs- und Düngungsmaßnahmen induzierten Dynamik chemischer Kenngrößen in Waldböden. Ca. 2.3 Mio. Hektar Wald wurden in den Jahren 1984 - 1996 gekalkt bzw. gedüngt. Dies entspricht rd. 22 % der Gesamtwaldfläche Deutschlands (BML 1997). Daraus resultieren mehr oder weniger nachhaltige Veränderungen des chemischen Bodenzustandes. Eine Unterscheidung zwischen gedüngten und nicht gedüngten Erhebungspunkten ist aufgrund sehr lückiger Angaben zur forstlichen Bestandesbehandlung in der verfügbaren Datenbank nicht möglich. Es kann daher auf diesen Aspekt nicht weiter eingegangen werden.

Im folgenden werden mit Hilfe eines häufigkeitsstatistischen Ansatzes auf der Basis von BZE- und Literaturdaten Bodenzustandsveränderungen der vergangenen Jahrzehnte analysiert, deren Ursachen in atmosphären Säure- bzw. Stickstoffeinträgen gesehen werden können. Da Düngungsmaßnahmen insbesondere den Versauerungserscheinungen entgegenwirken, ist anzunehmen, daß die dargestellten Trends in ihrer Intensität eher noch unterschätzt werden.

3 Ergebnisse

3.1 Richtung der Bodenzustandsveränderungen

Die Grundlage der folgenden Untersuchung bildet der Befund, daß *bodenchemische* Veränderungen den *morphologischen* im Normalfall vorausgehen. Das heißt, daß sich beispielsweise durch anhaltende Stickstoffeinträge bodenchemische Merkmale verändern, was laboranalytisch zeitgleich nachgewiesen werden kann. Dagegen dauert es eine wesentlich längere Zeit, bis sich diese Veränderungen auch profilmorphologisch niederschlagen. Erst durch die langfristige Veränderung chemischer Randbedingungen der Humusdynamik als pedogenem Prozess kann es zur Modifikation der Auflageschichtung und Verteilung der organischen Substanz im Profil und damit zur Ausbildung neuer morphologischer Humusformen (und möglicherweise neuer Bodentypen) kommen. Der Umstand, daß die Veränderung der morphologischen Humusform dem durch atmogene Säure- und Stickstoffeinträge veränderten chemischen Bodenzustand hinterherläuft, wird genutzt, um über häufigkeitsstatistische Vergleiche aktuelle bodenchemische Trends zu visualisieren.

In Abb.2 sind die prozentualen Anteile der Humusformen in der BZE-Stichprobe dargestellt. Diesen Humusformen lassen sich C/N-Verhältnisse und pH-Werte zuordnen, wie sie aufgrund von Literaturdaten in den 70er Jahren zu finden waren. Als Datenbasis für diese historischen Angaben dienen Untersuchungen von v. Zezschwitz (1980) sowie von Kopp und Schwanecke (1994). Die Untersuchungen der Autoren beziehen sich auf Böden in naturnahen Wäldern des Westfälischen Berglandes bzw. Humusformen des Nordostdeutschen Tieflandes mit "Harmonie zwischen Stickstoff- und Säure-Basenstufe". In der genannten Literatur werden erstens für verschiedene Humusformen *typische* Bereiche der C/N-Verhältnisse und pH-Werte angeben und zweitens statistische Beziehungen zwischen pH-Werten und C/N-Verhältnissen dargelegt. Unter Verwendung dieser Angaben lassen sich *anhand der aktuellen Häufigkeitsverteilung der Humusformen "Soll-Verteilungen" der pH-Werte und C/N-Verhältnisse berechnen* und als prozentuale kumulative Häufigkeitsverteilungen darstellen (Abb.3). Die "Soll"-Verteilungen würden demnach den Verteilungen von pH-Werten bzw. C/N-Verhältnissen entsprechen wie sie vorlägen, wenn keine Bodenzustandsveränderungen erfolgt wären und die Abhängigkeit der chemischen Merkmale pH-Wert und C/N-Verhältnis von der morphologischen Humusform noch genauso wäre wie vor ca. 20 Jahren. Diesen

berechneten Verteilungskurven wurden die Häufigkeitsverteilungen der empirischen Daten aus der BZE-Erstinventur gegenübergestellt. Dadurch läßt sich qualitativ die Richtung möglicher Trends von Bodenzustandsveränderungen beschreiben.

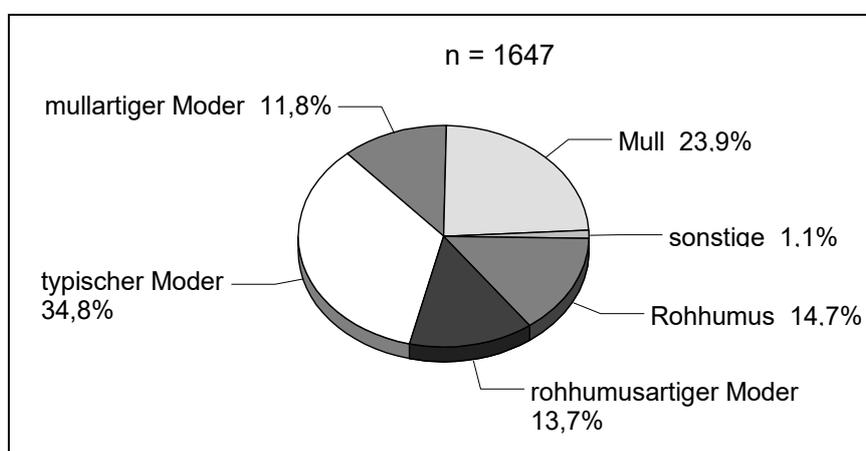


Abb.2: Prozentualer Anteil der Haupt-Humusformen in der BZE-Stichprobe

Der steilere Verlauf der in Abb.3 dargestellten *empirischen* Häufigkeitsverteilungen gegenüber den *berechneten* deutet auf eine generelle Tendenz zur Einengung der C/N-Verhältnisse bzw. Erniedrigung der pH-Werte hin. Der kumulative Verlauf der "Soll-Kurven" zeigt für die dargestellten Parameter annähernde Normalverteilungen. Demgegenüber ist der Median bei der empirischen Häufigkeitsverteilung des pH-Wertes in Richtung minimaler Werte verschoben, so daß sich eine rechtsschiefe Verteilungsfunktion ergibt. Diese tendenzielle Verschiebung der Häufigkeitsverteilung bringt die Richtung der Bodenzustandsdynamik gut zum Ausdruck. Die asymmetrischen Verteilungen chemischer Kennwerte im Oberboden, wie Basensättigung und pH-Wert wurden im "Deutschen Waldbodenbericht 1997" als Indiz für die Nivellierung der chemischen Oberbodenzustände durch atmogene Depositionen interpretiert, zumal sich mit zunehmender Bodentiefe die Verteilungen einem symmetrischen Verlauf annähern (Wolff und Riek 1997).

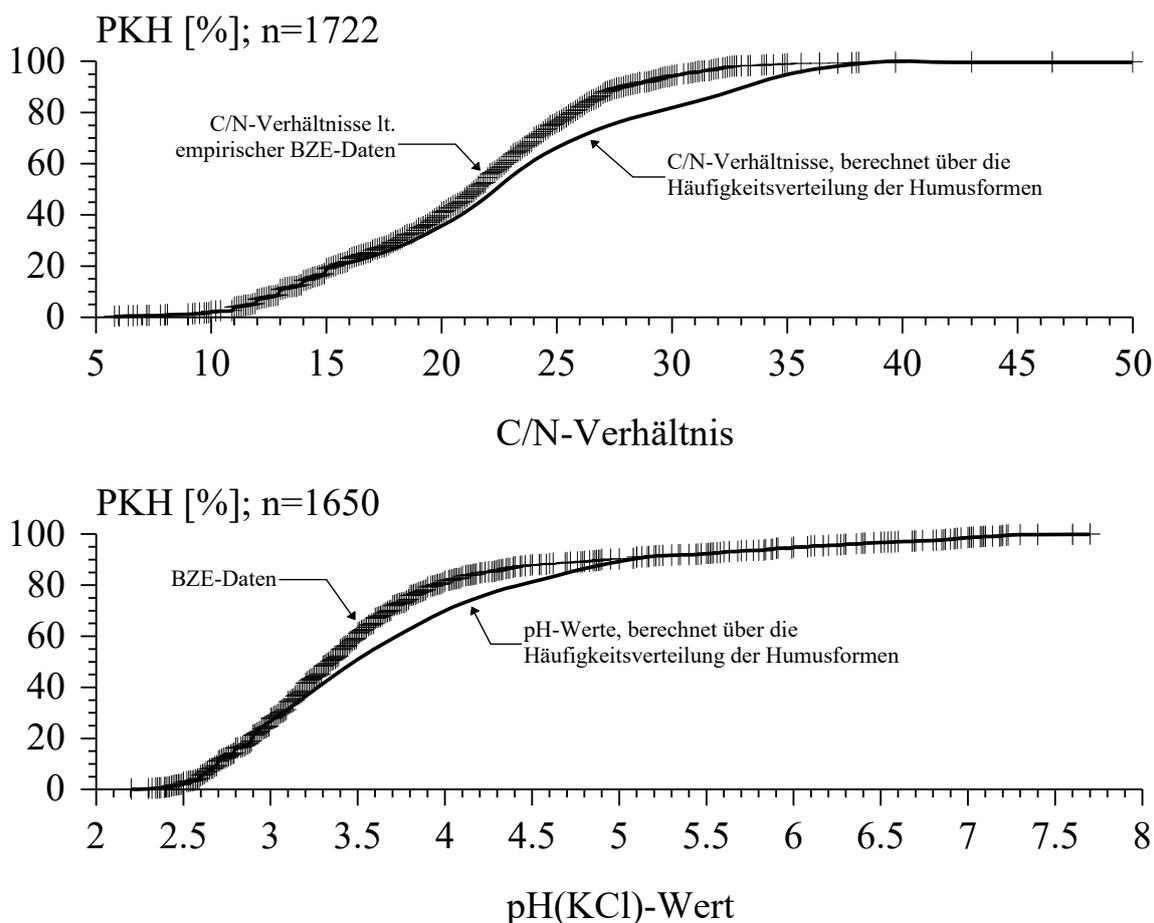


Abb.3: Prozentuale kumulative Häufigkeitsverteilungen von C/N-Verhältnissen und pH-Werten ("Soll"- und Ist-Werte; Erläuterungen im Text)

Der Vergleich der nach Humusformen stratifizierten C/N-Verhältnisse und pH-Werte der BZE-Stichprobe mit den Literaturwerten (Abb.4) verdeutlicht, daß vor allem bei den „ungünstigen“, biologisch inaktiveren Humusformen Rohhumus (Ro) und rohhumusartigem bzw. typischem Moder (Mor / Mot) engere C/N-Verhältnisse angetroffen werden als noch vor 20 Jahren. Eine Differenzierung dieser Auflagehumusformen zeichnet sich auch bei Hinzunahme des pH-Wertes nicht mehr ab. Für die Mineralbodenhumusformen Mull (Mu) und mullartiger Moder (Mou) ist vor allem die pH-Wert-Erniedrigung kennzeichnend. Insgesamt ergeben sich somit die in Abb.5 schematisch dargestellten Richtungen bodenchemischer Trends.

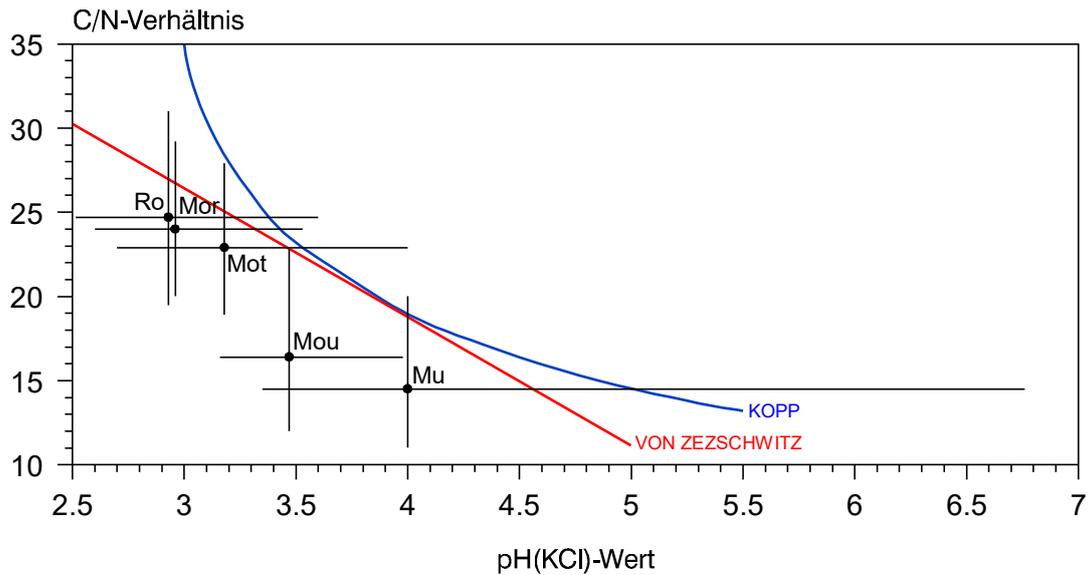


Abb.4: Beziehung zwischen pH-Wert und C/N-Verhältnis nach Kopp und v. Zezschwitz und in der BZE-Stichprobe (Mediane, 10-, 90-Perzentile nach Humusform stratifiziert)

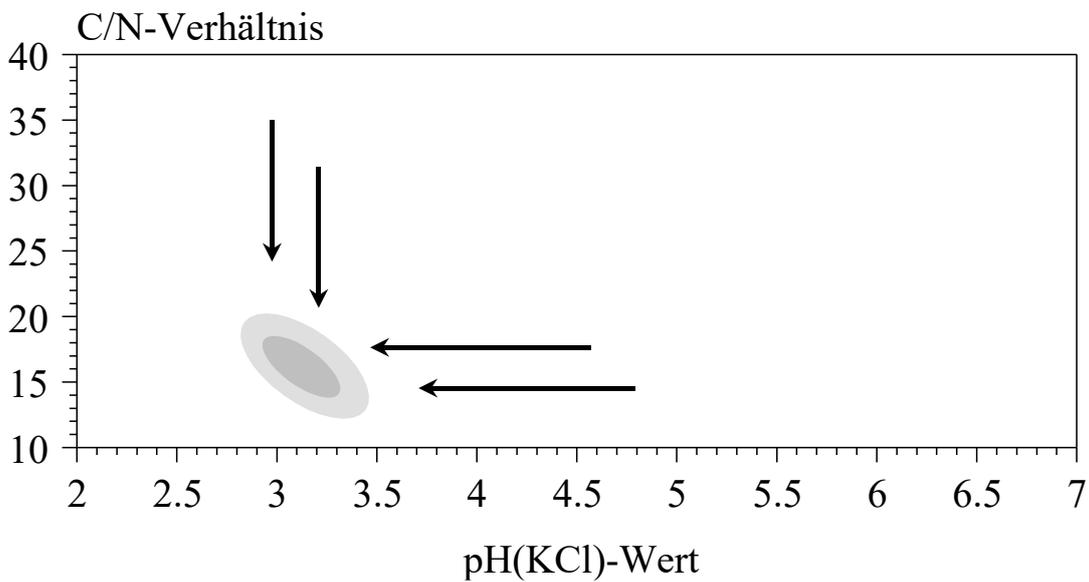


Abb.5: Richtung bodenchemischer Trends

3.2 Hauptgruppenbildung

Für die angestrebte Stratifizierung der BZE-Stichprobe erscheint der Wertebereich mit der größten Diskrepanz zwischen den in Abb.3, Kap.3.1 dargestellten Verteilungskurven besonders interessant. Der Bereich, innerhalb dessen demzufolge Bodenzustandsveränderungen stattfinden, liegt beim pH-Wert zwischen pH 3.1 und pH 5.0, beim C/N-Verhältnis zwischen ca. 17 und 38.

Den pH-Werten > 5.0 im Auflagehumus entsprechen fast ausschließlich Basensättigungen im oberen Mineralboden nahe 100 %. Es handelt sich hierbei um die gut gepufferten Carbonatstandorte, auf denen Veränderungen des Aciditätsgrades auszuschließen sind, solange der Oberboden nicht vollständig entkalkt ist. Bei der Differenzierung dieser Bodenzustandsgruppe wird im folgenden anstelle des pH-Wertes im Humus die Basensättigung in 0-10 cm Tiefe zugrundegelegt. Insgesamt ergeben sich dann die in Tab.1a dargestellten Gruppen, deren Häufigkeiten aus Tab.1b hervorgehen.

Es lassen sich somit vier Hauptgruppen hinsichtlich ihres Veränderungspotentials wie folgt differenzieren:

Veränderungspotential von Acidität und Stickstoffstatus:	Gruppenkennziffer (Tab.1a)	
1) Acidität hoch; N-Status hoch	A	(n = 663)
2) Acidität gering; N-Status hoch	B1, B2	(n = 605)
3) Acidität hoch; N-Status gering	C1, C2	(n = 267)
4) Acidität gering, N-Status gering	D1, D2, D3, D4	(n = 146)

Die regionale Verteilung dieser vier Hauptgruppen ist in Abb.6 kartographisch dargestellt. Es ist keine räumliche Abhängigkeit der Gruppenzugehörigkeit erkennbar.

Tab.1a: Kennzeichnung der Gruppen von BZE-Punkten nach pH-Wert (bzw. Basensättigung BS) und C/N-Verhältnissen im Humus

	pH < 3.1	pH ≥ 3.1 und BS ≤ 90 %	BS > 90 %
C/N < 17	D1	C1	D2
C/N 17-38	B1	A	B2
C/N > 38	D3	C2	D4

Tab.1b: Anzahl der Erhebungspunkte in den Gruppen

n	pH < 3.1	pH ≥ 3.1 und BS ≤ 90 %	BS > 90 %	Σ
C/N < 17	9	264	136	409
C/N 17-38	544	663	61	1268
C/N > 38	1	3	0	4
Σ	554	930	197	1681

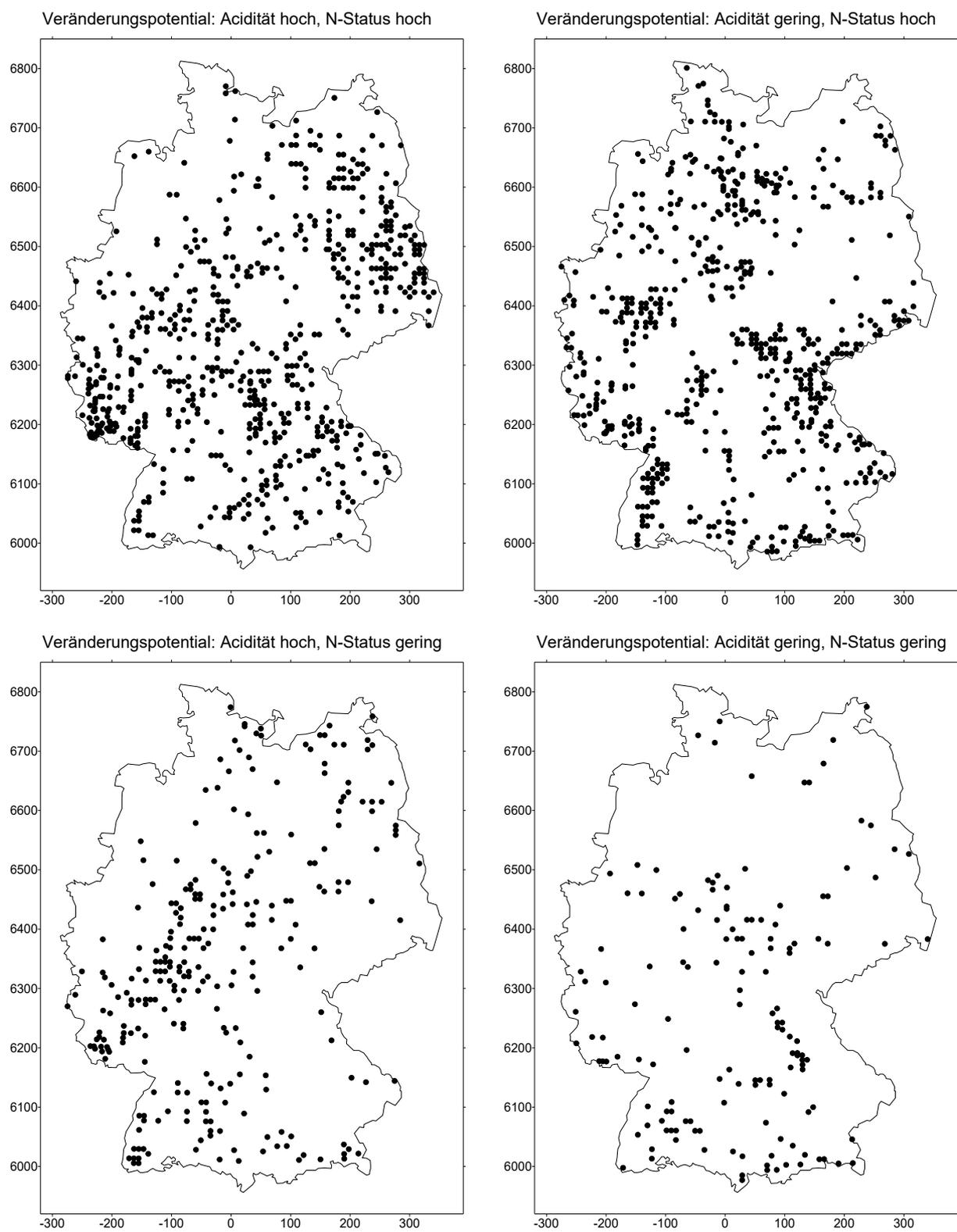


Abb.6: Regionale Verteilung der Veränderungspotentiale (Erläuterungen im Text)

Ein geringes Veränderungspotential bei der Bodenacidität betrifft zum einen die Carbonatstandorte (Bereich D2-B2-D4, Tab.1a), zum anderen Standorte mit stark fortgeschrittener Oberbodenversauerung (Bereich D1-B1-D3). In dem stark sauren Milieu mit pH-Werten unter 3.1 ist eine weitere meßbare Zunahme der Säurestärke - allein schon wegen des logarithmischen Charakters dieser Kenngröße - wenig wahrscheinlich. So zeigen die Verteilungskurven in Abb.3 deutlich, daß zwischen den "historischen" und aktuellen Häufigkeiten von pH-Werten < 3.1 kein Unterschied besteht.

Bei den C/N-Verhältnissen > 38 handelt es sich um wenige Ausreißer bzw. Sonderstandorte, die von weiträumigen Eutrophierungstendenzen offensichtlich unberührt sind, weil lokale Faktoren dominieren. Eine flächenmäßig wesentlich bedeutendere Gruppe sind indes die Standorte mit C/N-Verhältnissen < ca. 17. Eine depositionsbedingte Einengung des C/N-Verhältnisses ist bei diesen Punkten unwahrscheinlich. Die Häufigkeitsverteilungen der "historischen" und aktuellen C/N-Verhältnisse sind im Bereich C/N < 17 identisch (Abb.3). Es handelt es sich um Mullstandorte mit annähernder Stickstoffsättigung, auf denen anhaltender Stickstoffeintrag zunehmend Stickstoffaustrag aus dem System nach sich zieht.

3.3 Mindestdifferenzen und Stichprobenumfang

Wie in Kap.2.1 dargelegt, lassen sich für unterschiedliche Gruppen und Merkmale Mindestdifferenzen in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang berechnen, die notwendig sind um statistisch abgesicherte Aussagen zu Bodenzustandsveränderungen treffen zu können. Für die Basensättigungen im Mineralboden zeigt dies die Abb.7 wobei zwischen folgenden Gruppen differenziert wird:

Kurve 1 (Abb.7)	pH(KCl) < 3.1	Bereich D1, B1, D3 (Tab.1a)
Kurve 2 (Abb.7)	pH(KCl) ≥ 3.1 und Basensättigung ≤ 90 %	Bereich C1, A, C2 (Tab.1a)
Kurve 3 (Abb.7)	Basensättigung > 90 %	Bereich B2, D2, D4 (Tab.1a)

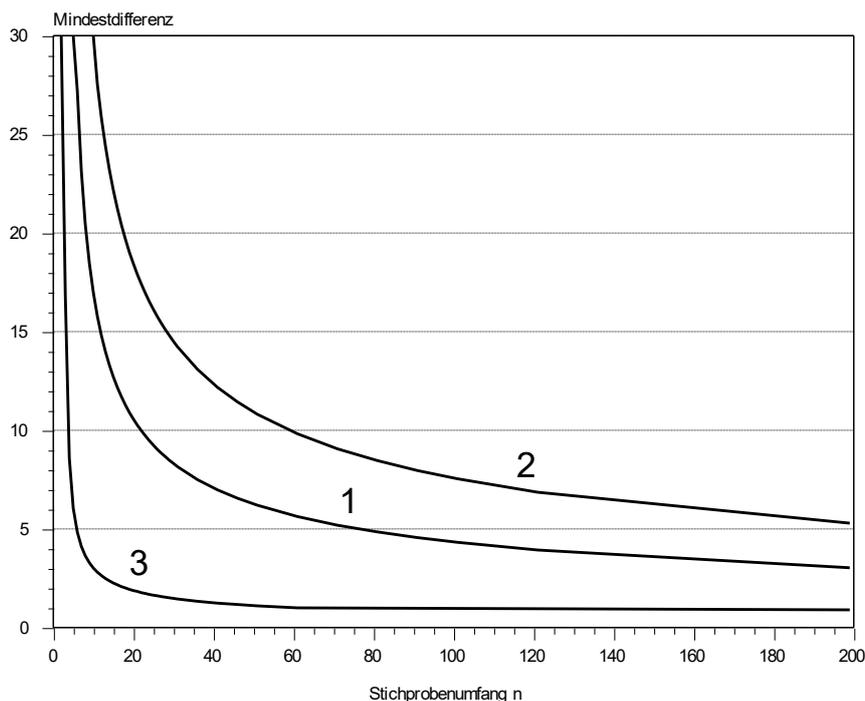


Abb.7: Berechnete Minstdifferenz für die Basensättigung in 0-10 cm Tiefe in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang

Der Darstellung in Abb.7 ist zu entnehmen, daß zur statistischen Absicherung einer Differenz der Basensättigung zwischen Erst- und Folgerhebung von beispielsweise 5 % ein Stichprobenumfang von 8 (Kurve 3), 78 (Kurve 1) bzw. 240 (Kurve 2) Erhebungspunkten notwendig ist, je nachdem um welches Teilkollektiv es sich handelt. Erwartungsgemäß ist der geringste Stichprobenumfang in der Gruppe mit Basensättigungen > 90 % notwendig. In dieser Gruppe ist die Variabilität minimal. Der aktuelle Mittelwert dieser Gruppe liegt bei 98.4 %. Würde nach einer Zweitbeprobung von 8 Erhebungspunkten ein Gruppenmittelwert von 93.4 % festgestellt, müßte dies als signifikante Zustandsänderung interpretiert werden. Wesentlich höher ist der notwendige Stichprobenumfang in der Gruppe mit pH-Werten < 3.1. Hier wird eine mittlere Basensättigung von 12.9 % für die aktuellen BZE-Daten ermittelt. Für den Nachweis, daß ein Folgeinventurwert von 7.9 % nicht zufällig sondern auf Bodenzustandsveränderungen zurückzuführen ist, wären mindesten 78 Neubeprobungen notwendig. Die größte Unsicherheit besteht bei den Standorten mit pH-Werten ≥ 3.1 und Basensättigungen ≤ 90 %. Hier sind für den Signifikanznachweis einer Absenkung der Basensättigung um 5 % - d.h. von gegenwärtig durchschnittlich 27.7 % auf einen hypothetischen Wert von 22.7 % -

Wiederholungsuntersuchungen auf mindestens 240 BZE-Erhebungspunkten notwendig. Die Ursache für die Notwendigkeit dieses großen Stichprobenumfangs besteht in der gegenüber den beiden anderen Gruppen weit höheren Variabilität innerhalb dieser Gruppe. Es wird daher in Kap.3.4 versucht diese Gruppe noch stärker zu stratifizieren, indem auch die Kennwerte des Unterbodens mit hinzugezogen werden.

In Abb.8 sind analog für die folgenden Gruppen die Minstdifferenzen von C/N-Verhältnissen dargestellt:

Kurve 4 (Abb.8)	$C/N < 17$	Bereich D1, C1, D2 (Tab.1a)
Kurve 5 (Abb.8)	$17 \leq C/N \leq 38$	Bereich B1, A, B2 (Tab.1a)

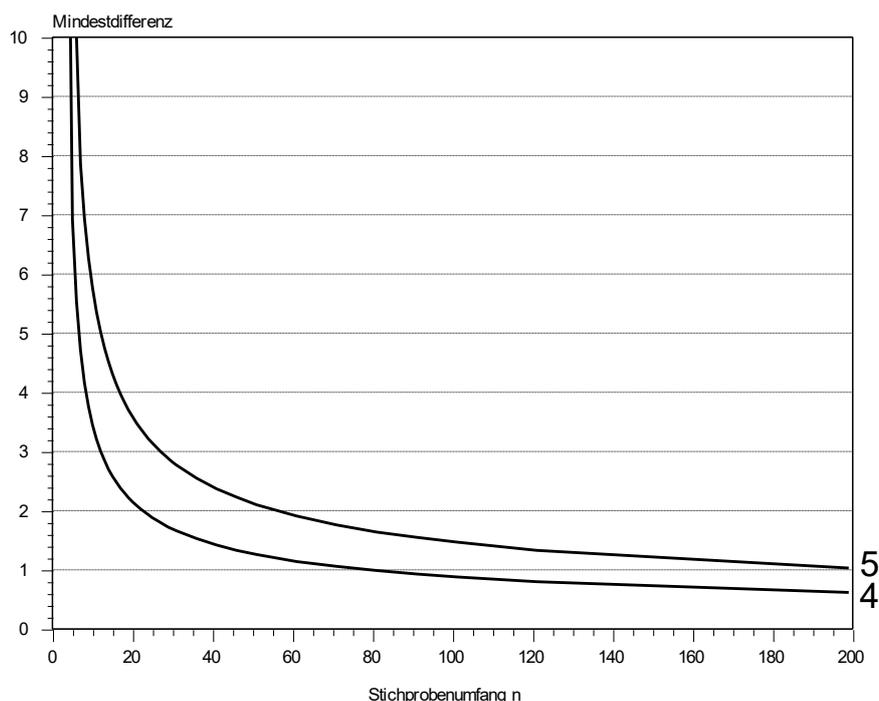


Abb.8: Berechnete Minstdifferenz von C/N-Verhältnissen in Abhängigkeit vom Stichprobenumfang

Bei großen Unterschieden der C/N-Verhältnisse ist der notwendige Stichprobenumfang in den beiden Teilkollektiven nahezu gleich. So sind für den Nachweis, daß ein signifikanter Bodenzustandswandel vorliegt, wenn das C/N-Verhältnis um beispielsweise 5 abgesunken ist, im einen Fall 7 (Kurve 4), im anderen

Fall 13 Erhebungspunkte (Kurve 5) wiederholt zu beproben. Die Darstellung zeigt auch, daß sich bei hohen Stichprobenumfängen von $n > 100$ (Kurve 4) bzw. $n > 200$ (Kurve 5) sehr kleine Unterschiede der mittleren C/N-Verhältnisse (Minstdifferenz < 1) als signifikant nachweisen lassen.

Bei diesen statistisch ermittelten Minstdifferenzen muß jedoch beachtet werden, daß es sich hier um *räumliche* Daten handelt, die einer kleinräumigen (zusätzlichen) Variabilität unterliegen. Bei einer Zweitinventur handelt es sich streng genommen nicht um Meßwiederholungen am selben Objekt (wovon das statistische Testverfahren jedoch ausgeht), da die Probenahme destruktiv ist und deshalb niemals exakt am selben Ort erfolgen kann. Es müßte also größenordnungsmäßig die standörtliche *Variabilität zwischen den Probenentnahmestellen* bekannt sein, um den Fehler abschätzen zu können, der daraus resultiert, daß die jeweiligen Untersuchungsobjekte der Erst- und Folgeinventuren nicht exakt identisch sind. Im Rahmen dieser Studie sind hierzu jedoch keine Angaben verfügbar, so daß die dargestellten Minstdifferenzen nur Orientierungswerte darstellen, die gegebenenfalls entscheidend nach oben korrigiert werden müssen (vgl. auch Jandl und Riedler 1998).

3.4 Stratifizierung nach dem Säurezustand

Für die weitere und feinere Klassifikation der BZE-Erhebungspunkte wurde das Verfahren quick cluster angewandt, bei dem die Clusteranzahl vom Anwender vorzugeben ist. Dabei wurde so vorgegangen, daß die Clusteranzahl schrittweise um 1 erhöht wurde. Die jeweiligen Ergebnisse sind tabellarisch im Anhang dargestellt. Die Clustersortierung (und Benennung) erfolgt in dieser Darstellung in aufsteigender Reihenfolge der Anzahl zugeordneter Stichprobenpunkte. Die maximale Clusteranzahl richtet sich nach dem minimalen Stichprobenumfang in den Clustern. Abgebrochen wurde nach der zwölften Clusteranalyse als der minimale Stichprobenumfang in einem der Cluster < 10 betrug (vgl. Anhang).

Der Vergleich der Ergebnisse aus den einzelnen Clusteranalysen gibt einen Einblick in die Ähnlichkeitstruktur der Erhebungspunkte bezüglich des Bodenversauerungsgrades. Die bedeutendste Auffälligkeit besteht darin, daß unabhängig von der gewählten Clusteranzahl stets eine Gruppe auftritt, welcher die bei weitem höchste

Anzahl an BZE-Punkten zugeordnet wird (Cluster 1). Es handelt sich dabei um die Böden mit dem schwächsten Tiefengradienten der Basensättigung bzw. den niedrigsten Sättigungsgraden im Unterboden (bis 90 cm Tiefe). Diese Hauptgruppe der am stärksten versauerten Böden variiert in sich kaum und bleibt auch bei Vorgabe hoher Clusteranzahlen stets erhalten. Die Mindestanzahl der zugeordneten Punkte beträgt für dieses Cluster $n = 428$ bei Vorgabe einer Clusteranzahl von 11 (vgl. Anhang).

Bereits ab der zweiten Clusteranalyse (Clusteranzahl $n = 3$) differenziert sich eine Gruppe aus, mit Basensättigungen im Unterboden nahe 100 %. Diese wird ab der vierten Clusteranalyse (Clusteranzahl $n = 5$) nochmals in zwei Gruppen getrennt und zwar zum einen in Böden mit hoher (Cluster 5) und zum anderen mit geringer Basensättigung im Oberboden (Cluster 4).

Eine interessante Differenzierung erfolgt nach der siebten Clusteranalyse, in der eine Gruppe mit stark erhöhter Basensättigung im Oberboden ausgewiesen wird (Cluster 8). Der Tiefengradient der Basensättigung ist bei dieser Gruppe umgekehrt, d.h. im Unterboden sind die geringsten Sättigungsgrade zu finden. Diese Gruppe bleibt auch in den folgenden Clusteranalysen erhalten (vgl. Anhang). Es dürfte sich hierbei im wesentlichen um gedüngte Flächen oder von basischen Staubeinträgen betroffene Erhebungspunkte handeln.

Bei allen folgenden Clusteranalysen werden mit steigender Clusteranzahl lediglich diejenigen Gruppen noch weiter aufgesplittet, deren Stichprobenumfang ohnehin schon gering ist. Die wesentlichen Typen erscheinen jedoch bereits nach der siebten Clusteranalyse, d.h. anhand von 8 Clustern hinreichend genau ausdifferenziert. Die folgenden Analysen führen lediglich zu Untergruppen, die hinsichtlich des Tiefengradienten und der absoluten Sättigungsgrade im Ober- bzw. Unterboden noch enger beieinander liegen. So werden bei der achten Clusteranalyse beispielsweise die Gruppen mit Basensättigungen im Unterboden nahe 100 % weiter in Gruppen mit unterschiedlich steilen Tiefengradienten unterteilt (Cluster 5, 6 und 9).

Es erscheint wichtig den Stichprobenumfang innerhalb der einzelnen Cluster möglichst groß zu halten, wenn dabei die wesentlichen Typen ausreichend detailscharf differenziert abgebildet werden können. Deshalb wird im folgenden mit dem Ergebnis der siebten Clusteranalyse, also mit 8 verschiedenen Gruppen weitergearbeitet (Tab.2). Hinzu kommt die Gruppe der Böden mit Basensättigungen

> 90 % im Oberboden, die von den Clusternanalysen ausgenommen waren (s.o.). Diese Gruppe wird im folgenden als Cluster 0 bezeichnet.

Tab.2: Kenndaten von 8 Clustern zur Charakterisierung des Versauerungsgrades

Cluster	Basensättigung [%]				n
	0-10 cm	10-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	
1	11,60	7,29	7,71	10,38	478
2	19,33	16,87	22,36	32,95	233
3	15,58	11,08	21,82	70,03	85
4	21,13	18,73	62,17	86,83	79
5	63,08	86,39	94,92	98,26	59
6	30,57	49,32	90,25	96,17	53
7	47,40	41,33	45,04	53,60	52
8	48,25	23,22	17,37	19,94	48

Abb.9 zeigt die regionale Verteilung der Cluster. Die kartographischen Darstellungen machen deutlich, daß nur geringfügige regionale Abhängigkeiten der Cluster bestehen. Jedes Cluster kann prinzipiell in ganz Deutschland vorkommen, wobei sich in einigen Großräumen allerdings bestimmte Cluster häufen. **Eine allein nach Regionen stratifizierte Beprobung der BZE-Punkte erscheint mithin aus Gründen der Repräsentativität unzulänglich.**

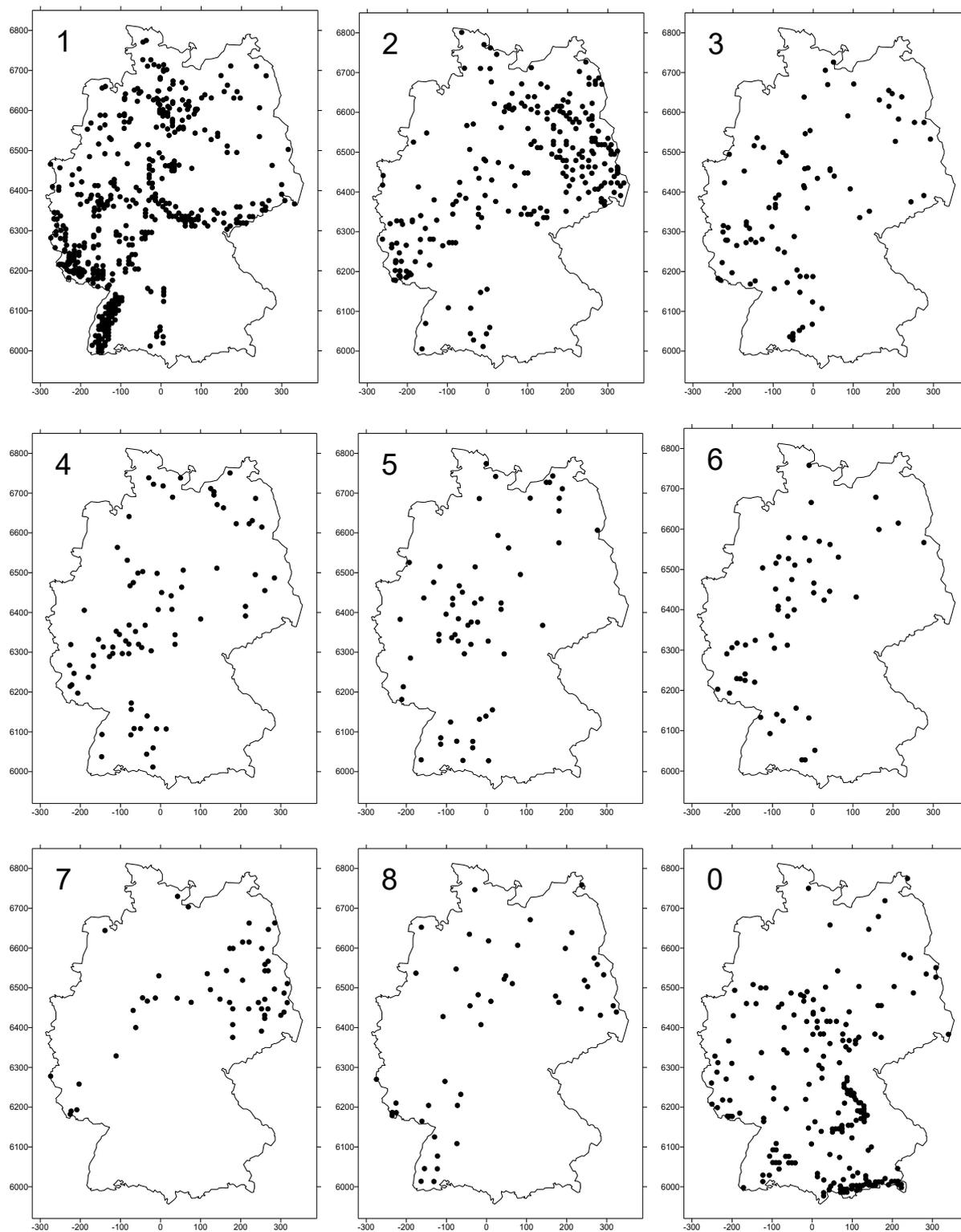


Abb.9: Regionale Verteilung der Cluster (1-8 ohne BY; 0 mit BY, aber nur Carbonatstandorte)

Im einzelnen lassen sich die Cluster insbesondere hinsichtlich ihrer Sensibilität gegenüber Veränderungen des Säure-Basen-Zustandes folgendermaßen beschreiben (vgl. Tab.2; Abb.9):

Cluster 0:

Die mittlere Basensättigung in 0-10 cm Tiefe beträgt in diesem Cluster 98.5 %. Es handelt sich um 201 Carbonatstandorte in ganz Deutschland, wobei die Verbreitungsschwerpunkte die Bayerischen Kalkalpen sowie die Schwäbisch-Fränkische Alb bilden. Die Sensibilität gegenüber Veränderungen durch atmosphärischen Säureeintrag ist bei diesen Standorten *gering* (Carbonatpuffersystem).

Cluster 1:

Es handelt sich um die mit $n = 478$ umfangreichste Gruppe der am stärksten versauerten Böden. Eine weitere Differenzierung dieser Gruppe ist zumindest innerhalb der obersten 90 cm Tiefe nicht möglich, da über das gesamte Profil hinweg minimale Basensättigungen vorliegen und die "Versauerungsfront" offensichtlich tiefer liegen muß. Die Möglichkeit meßbarer Bodenzustandsveränderungen ist hier *gering*, weil die Basensättigung sich in diesem niedrigen Bereich kaum mehr verändert und sich bei fortbestehendem Säureeintrag durch ökosystemare Regulationsmechanismen auf diesem Minimalniveau hält.

Cluster 2:

Hierbei handelt es sich um gegenüber Cluster 1 etwas weniger stark versauerte Böden, deren Hauptverbreitungsschwerpunkt in Ostdeutschland liegt. Diese Region wird dagegen von Cluster 1 weitgehend ausgespart. Es dürfte hierin die puffernde Wirkung basisch wirkender Staubeinträge zum Ausdruck kommen. Diese Staubdepositionen waren in großen Gebieten der ehemaligen DDR von wesentlicher Bedeutung. Somit ist die Sensibilität der zum Teil künstlich aufgebasten Standorte des Cluster 2 gegenüber durch atmosphärischen Säureeintrag bedingter Versauerung insbesondere durch die veränderte Eintragungssituation in Ostdeutschland *hoch*.

Cluster 3:

Dieses Cluster ist bezüglich des Ausmaßes der Oberbodenversauerung mit den Clustern 1 und 2 vergleichbar. Der Unterschied zu diesen besteht in der höheren Basensättigung in 60-90 cm Tiefe. Die Tiefenversauerung ist bei diesen Böden somit

weniger weit fortgeschritten. Bodenzustandsveränderungen durch atmosphärischen Säureeintrag müßten sich bei diesen Böden vor allem in einem Absinken der Basensättigung im Unterboden äußern. Die Sensibilität für entsprechende Bodenzustandsveränderungen ist als *hoch* einzustufen.

Cluster 4:

Auch dieses Cluster ist bezüglich der Oberbodenversauerung mit den beschriebenen Clustern vergleichbar. Der Unterschied zu diesen besteht darin, daß die Basensättigung bereits in 30-60 cm erhöht ist, die Tiefenversauerung somit schwächer ausgeprägt ist als bei Cluster 3. Das Potential, auf Säureeinträge mit meßbaren Veränderungen zu reagieren ist auch hier *hoch*.

Cluster 5:

Es handelt sich hierbei um die am besten gepufferten Böden, wobei nur der Oberboden mäßig versauert ist und ab 30 cm Tiefe Basensättigungen nahe 100 % auftreten. Bodenzustandsveränderungen durch Säureeinträge sind im Oberboden zu erwarten, wo sich die Basensättigung mit 63 % im mäßig hohen Bereich und damit in einem Bereich hoher Dynamik befindet (vgl. Wolff und Riek 1996). Auch hier kann die Sensibilität daher als *hoch* eingestuft werden.

Cluster 6:

Das Cluster ist bezüglich der Verhältnisse im Unterboden mit Cluster 5 vergleichbar, d.h. auch hier ist der Bereich ab 30 cm Tiefe noch nicht von der Versauerung betroffen. Hinsichtlich des Oberbodenzustandes ist Cluster 6 aber nicht so gut mit Basen ausgestattet wie Cluster 5. Es ist von einer *hohen* Sensibilität für Bodenzustandsveränderungen auszugehen.

Cluster 7:

Dabei handelt es sich vorwiegend um Standorte in Nordostdeutschland, die sich durch den geringsten Tiefengradienten der Basensättigung auszeichnen. Betroffen können Standorte sein, auf denen basische Staubeinträge zu einer Stabilisierung der Basensättigung auf mittlerem Niveau geführt haben. Die Sensibilität gegenüber atmosphärischen Säureeinträgen ist daher analog zu Cluster 2 als hoch zu bewerten. Ferner kann es sich um Altdüngungsflächen handeln, auf denen ebenfalls von einer *hohen* Dynamik auszugehen ist.

Cluster 8:

Dieses Cluster dürfte vor allem gedüngte Standorte beinhalten, was sich in einem umgekehrten Tiefengradienten der Basenausstattung in Ober- und Unterboden äußert. Ferner könnten im Bereich Ostdeutschlands wie in Cluster 7 einige Flächen von atmogenem Staubeintrag betroffen sein. In beiden Fällen kann von einer aktuell hohen Dynamik ausgegangen werden, so daß die Sensibilität auch hier als *hoch* eingestuft wird.

Um die Nachweisbarkeit von Bodenzustandsveränderungen innerhalb der ermittelten Cluster einschätzen zu können, ist die Berücksichtigung der gruppenspezifischen Variabilität notwendig. Diese wird durch die Darstellungen in Abb.10 veranschaulicht. Abgebildet sind hier die Mindestdifferenzen der Basensättigungen in 0-10 cm und 60-90 cm Tiefe, die auf dem Signifikanzniveau von 0.05 % statistisch gesicherte Bodenzustandsveränderungen signalisieren (vgl. Kap.2.1). Die jeweiligen Stichprobenumfänge entsprechen den Anzahlen der BZE-Erhebungspunkte in den Clustern.

Grundsätzlich ist festzustellen, daß die geringsten Mindestdifferenzen für diejenigen Straten konstatiert werden, die aus bodenkundlicher Sicht keine Veränderungen erwarten lassen. So machen die Darstellungen deutlich, daß für die Cluster 0 und 1 bereits sehr geringe Differenzen zwischen Erst- und Wiederholungsinventur nachweisbar wären. Wie oben dargelegt, zeichnen sich die Böden dieser Cluster aber durch sehr stabile chemische Zustände aus. Auffallend ist das Cluster 2, für welches zwar eine hohe Sensibilität für Bodenzustandsveränderungen konstatiert wurde (s.o.) aber aufgrund der sehr hohen Variabilität in dieser Gruppe Mindestdifferenzen der Basensättigung nahe 10 % notwendig wären.

Bei den anderen Clustern ist zwischen Veränderungen der Basensättigung im Ober- und Unterboden zu differenzieren. Von den Clustern, für die aus bodenkundlicher Sicht ein hohes Potential, auf Säureinträge mit meßbaren Veränderungen zu reagieren festgestellt worden ist, zeichnet sich **Cluster 3** durch vergleichsweise geringe Mindestdifferenzen sowohl im Ober- als auch im Unterboden aus. Cluster 3 repräsentiert mithin eine relativ homogene Stichprobe von stark versauerten Böden, die sich jedoch noch deutlich vom zunehmend statischen Endzustand der Entbasung entfernt befinden. **Dieses Cluster erscheint somit gut für die Auswahl einer**

begrenzten Anzahl an Erhebungspunkten geeignet, die beispielsweise im Rahmen einer Pilotstudie zur Überprüfung des tatsächlichen Ausmaßes der Versauerungsdynamik herangezogen werden könnten. Es ist jedoch zu beachten, daß einige Regionen durch die Beschränkung auf Cluster 3 völlig unberücksichtigt blieben (vgl. Abb.9). So werden z.B. fast alle Erhebungspunkte des Schwarzwaldes dem Cluster 1 zugeordnet, welchem aufgrund der weit fortgeschrittenen Versauerung ein sehr geringes Veränderungspotential zugeschrieben wurde. Dasselbe trifft auch für die stark versauerten Standorte in der Region des Erzgebirges zu, die ebenfalls komplett dem Cluster 1 zugeordnet werden. **Grundsätzlich erscheint es ferner zweckmäßig, bei der endgültigen Auswahl einer für eine Pilotinventur geeigneten Stichprobe, zusätzlich regional differenziert auch die Dynamik der Immissionssituation während der Zeit seit der BZE-Erstinventur mit zu berücksichtigen.**

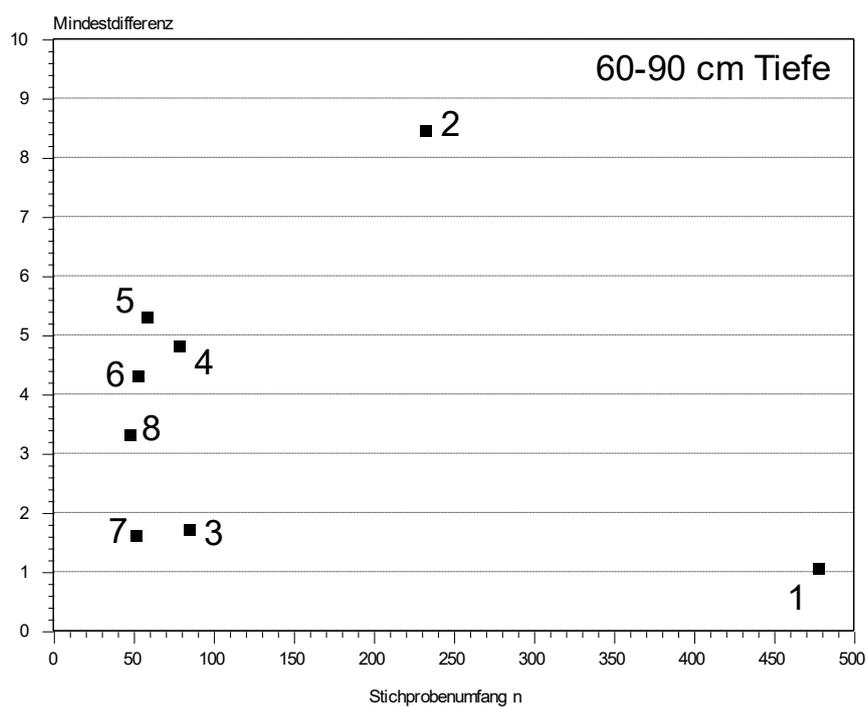
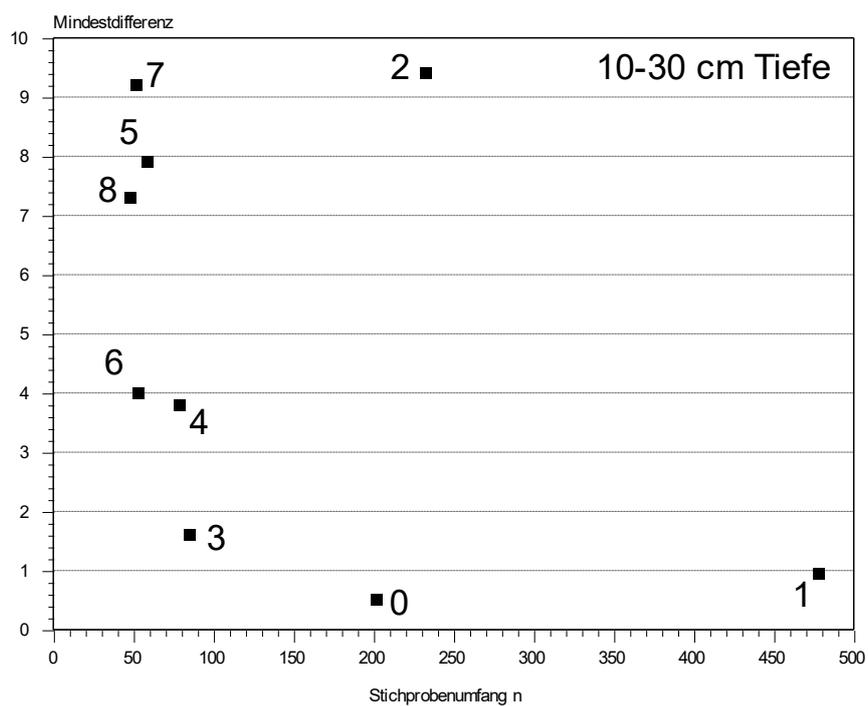


Abb.10: Berechnete Minstdifferenzen der Basensättigung in 10-30 cm bzw. 60-90 cm Tiefe für signifikante Bodenzustandsänderungen in den Clustern (Kennziffern = Cluster-Nummern lt. Tab.2)

3.5 Stratifizierung nach dem Stickstoffzustand

Wie in Kap. 3.2 dargelegt wurde, ist es vor allem die Gruppe der Böden mit C/N-Verhältnissen zwischen 17 und 38, die für Bodenzustandsveränderungen in Betracht kommen. In diesem Kapitel soll diese große Gruppe feiner differenziert werden. Hierzu sind in Abb.11 box-plots dargestellt, aus denen die Häufigkeitsverteilungen der C/N-Verhältnisse nach Humusformen stratifiziert hervorgehen. Um Verzerrungen bei den Häufigkeitsverteilungen insbesondere der Mulle und mullartigen Moder zu vermeiden, wurden hierbei *alle* Erhebungspunkte und nicht nur diejenigen mit $17 < C/N < 38$ berücksichtigt. Eine hohe Sensibilität der Böden, auf atmogene Eutrophierung zu reagieren besteht dann, wenn die humusformspezifischen C/N-Verhältnisse relativ *weit* sind (vgl. Kap.3.1).

Für die Einstufung der Sensibilität gegenüber N-eintragsbedingten Bodenzustandsveränderungen (Einengung des C/N-Verhältnisses) und darauf aufbauende Stratifizierung der Stichprobe werden die 33- und 66-Perzentile der C/N-Verhältnisse als Grenzwerte verwendet. In einem Relativmaßstab wird den Standorten *über* dem 66-Perzentil eine *hohe* Sensibilität zugeordnet. Bei den Standorten *zwischen* dem 33- und 66- Perzentil ist die Sensibilität *mittel*; bei denen *unter* dem 33 Perzentil ist sie *gering*. Außerdem wird allen Böden mit $C/N < 17$ - unabhängig von der Humusform - ebenfalls eine *geringe* Sensibilität zugewiesen. Die regionale Verteilung der nach Humusformen differenzierten Gruppen ist den Kartogrammen in Abb.12 zu entnehmen. Auffallend ist hierbei, daß praktisch keinerlei regionalen Bezüge der Gruppenzuordnung feststellbar sind, d.h. Standorte mit hohem und geringem Veränderungspotential unmittelbar benachbart auftreten.

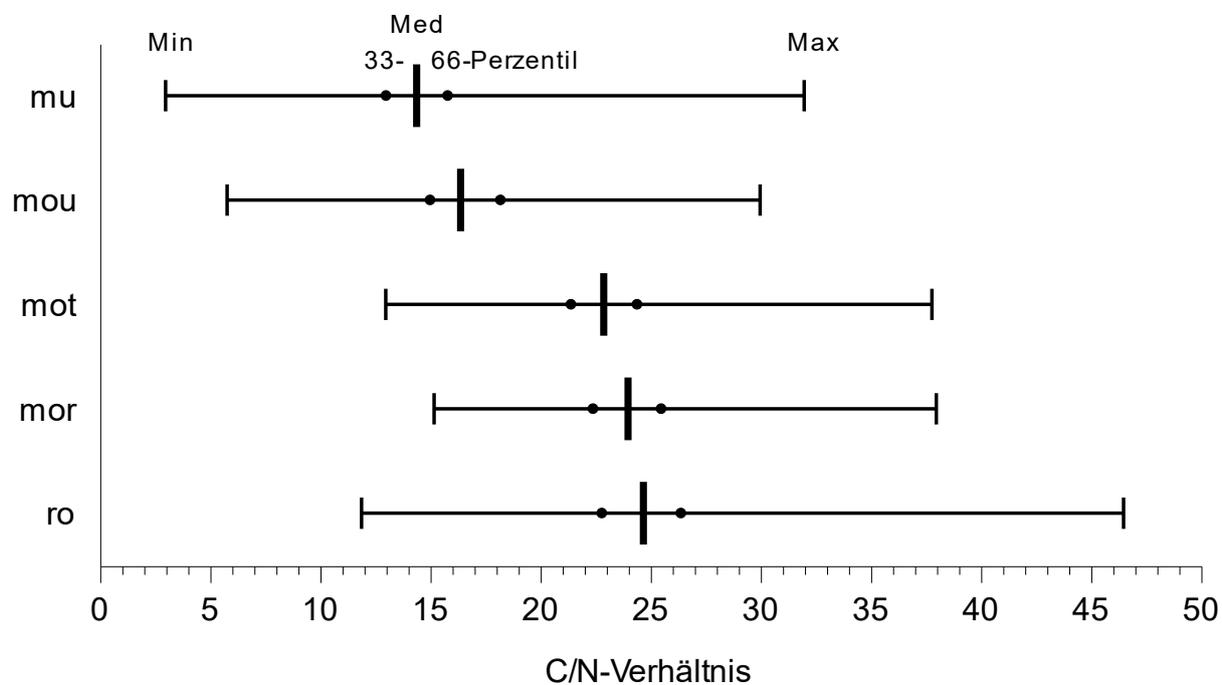
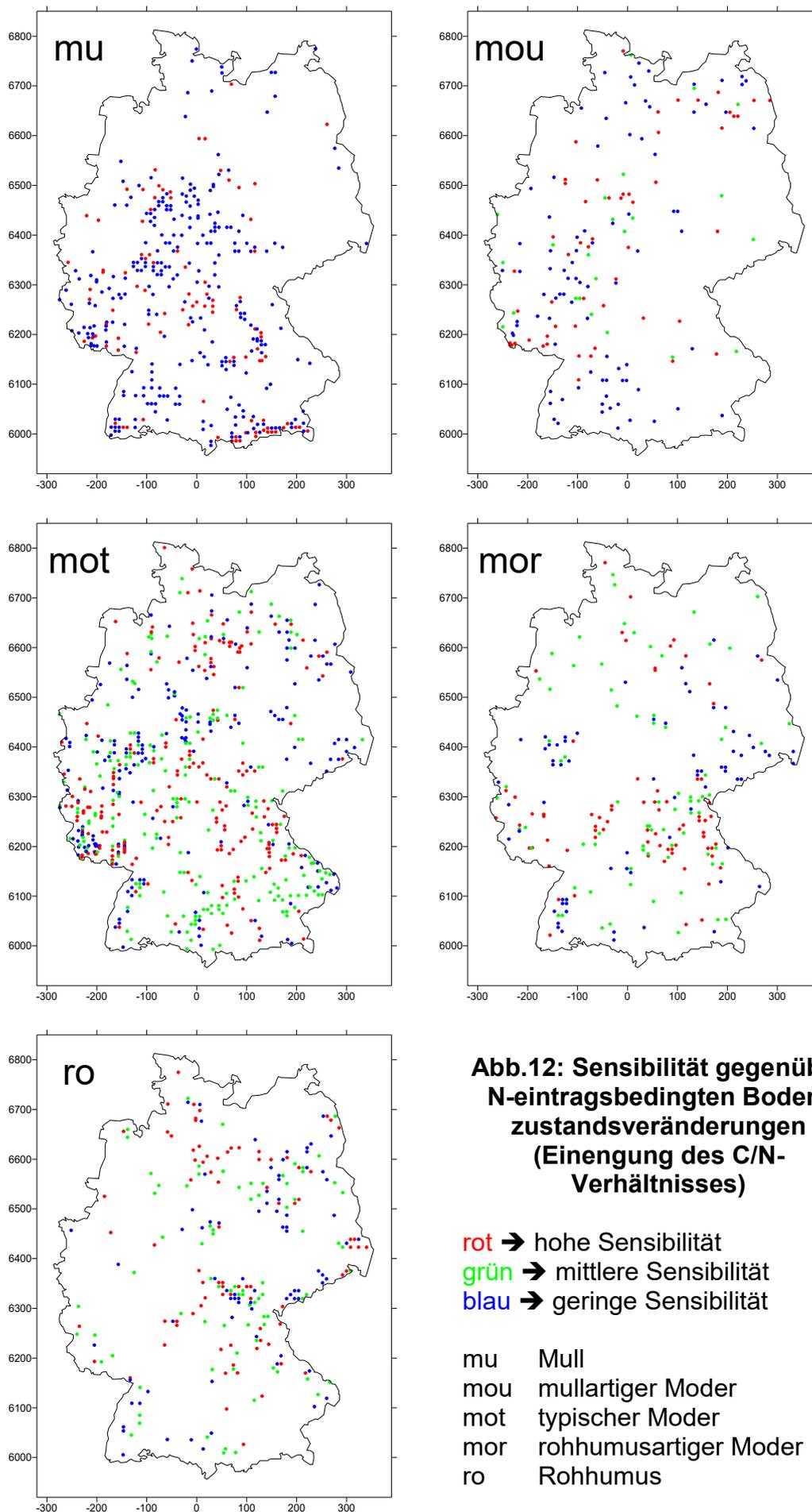


Abb.11: Mediane, Minimum- und Maximumwerte sowie 33- und 66-Perzentile der C/N-Verhältnisse in den einzelnen Humusformen (mu ...Mull, mou ...mullartiger Moder, mot ...typischer Moder, mor ...rohhumusartiger Moder, ro ...Rohhumus)



Für die Erhebungspunkte mit hoher Sensibilität gegenüber N-eintragsbedingten Bodenzustandsveränderungen wurden Mindestdifferenzen der C/N-Verhältnisse berechnet, die bei den jeweils gegebenen Stichprobenumfängen innerhalb der verschiedenen Humusformgruppen auf signifikante Bodenzustandsveränderungen hinweisen (vgl. Abb.13). Es zeigt sich, daß die Mindestdifferenzen zwischen den Humusformen nur geringfügig variieren. Sie liegen größenordnungsmäßig zwischen 1 und 2, wobei aufgrund der kleinräumigen Variabilität und der nicht exakt identischen Bodenproben von Erst- und Folgeinventuren eine Korrektur nach oben wahrscheinlich erscheint (vgl. Kap.3.3).

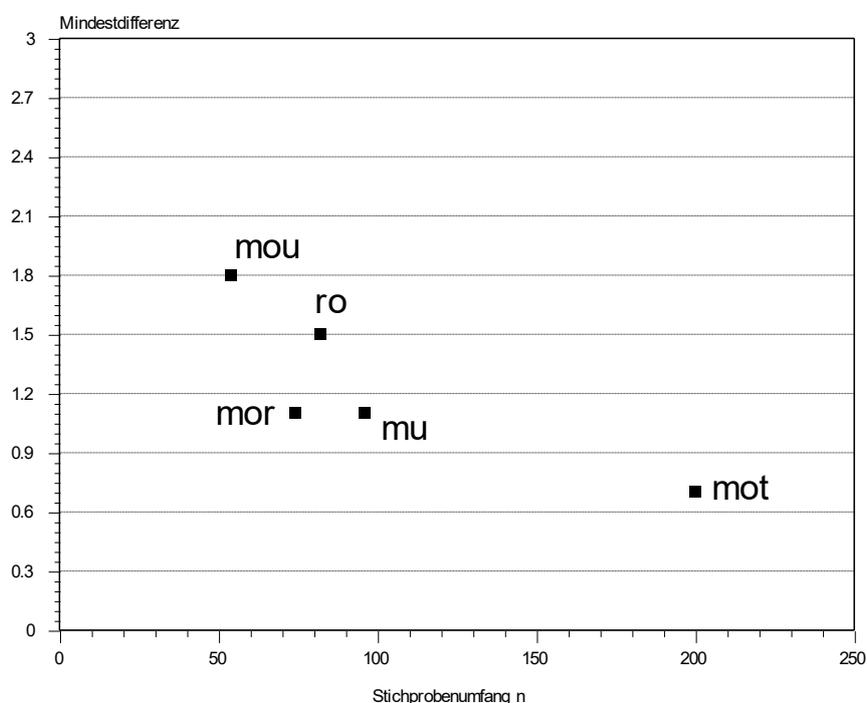


Abb.13: Berechnete Mindestdifferenzen der C/N-Verhältnisse für signifikante Bodenzustandsänderungen in den einzelnen Humusformen

Die endgültige Stratenbildung aufgrund des eintragsbedingten Veränderungspotentials der C/N-Verhältnisse erfolgt durch die Zusammenfassung der humusformspezifischen Einschätzungen in einem einzigen Kartogramm (Abb.14).

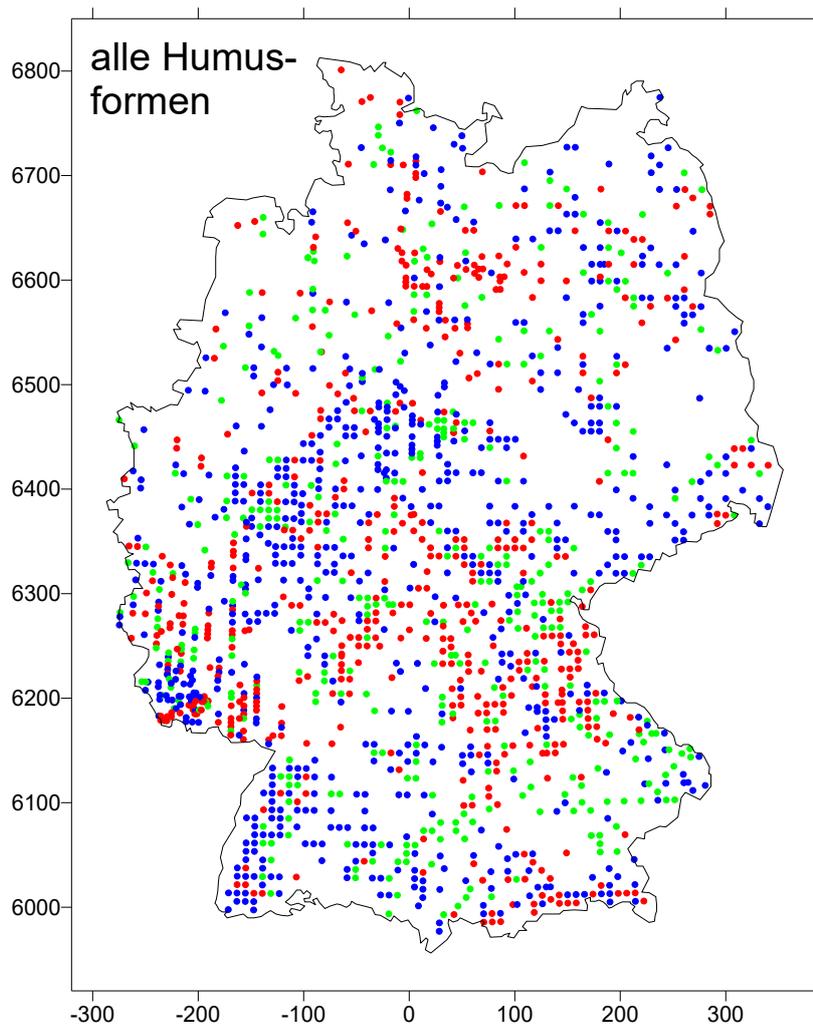


Abb.14: Sensibilität gegenüber N-eintragsbedingten Boden-zustandsveränderungen (Einengung des C/N-Verhältnisses) für alle Humusformen; rot → hohe, grün → mittlere, blau → geringe Sensibilität

3.6 Stratifizierung nach dem Säure- und Stickstoff-zustand

Ziel dieser Studie ist die Ermittlung von Straten auf der Basis des Potentials der BZE-Erhebungspunkte, auf versauernd bzw. N-eutrophierend wirkende Depositionen mit Veränderungen des Säure-Basenzustandes (Basensättigung) bzw. des C/N-Verhältnisses zu reagieren. Für diese Stratifizierung müssen die Ergebnisse der Kapitel 3.4 (Säurezustand) und Kap.3.5 (Stickstoffzustand) verknüpft werden. Die Verknüpfung erfolgt nach folgendem Algorithmus:

Veränderungspotential Basen- sättigung	C/N- Verhältnis		Einschätzung der Sensibilität für Bodenzu- standsveränderungen durch N-Eutrophierung oder atmogenen Säureeintrag
<i>gering</i>	<i>gering</i>	⇒	<i>gering</i>
<i>gering</i>	<i>mittel</i>	⇒	<i>mittel</i>
<i>gering</i>	<i>hoch</i>	⇒	<i>hoch</i>
<i>hoch</i>	<i>gering</i>	⇒	<i>hoch</i>
<i>hoch</i>	<i>mittel</i>	⇒	<i>hoch</i>
<i>hoch</i>	<i>hoch</i>	⇒	<i>hoch</i>

Das Ergebnis der Verknüpfung zeigt Abb.15. Insgesamt konnten bei dieser Analyse 1250 Erhebungspunkte berücksichtigt werden. Dies sind 68.4 % der BZE-Gesamtstichprobe. Im wesentlichen fehlen die Standorte in Bayern, für welche nur Daten bis in 30 cm Tiefe vorliegen, was eine Berücksichtigung in den Clusteranalysen zur Differenzierung verschiedener Unterbodenzustände unmöglich machte. Die in Bayern dennoch dargestellten Erhebungspunkte beschränken sich auf die Carbonatstandorte des Cluster 0 (vgl. Kap. 3.4). **Von den analysierten 1250 Erhebungspunkten wird für 814 Punkte (65.1 %) eine hohe, für 138 Punkte (11.0 %) eine mittlere und für 298 Punkte (23.8 %) eine geringe Sensibilität ermittelt.**

Die Stratifizierungsmöglichkeiten der BZE-Stichprobe nach Regionen sind kaum gegeben, da von einer hohen räumlichen Heterogenität des Potentials der Standorte für Bodenzustandsveränderungen auszugehen ist. Räumliche Muster lassen sich in dem Kartogramm der Abb.15 kaum erkennen. Es fällt lediglich auf, daß die Standorte im Bereich des Erzgebirges ausschließlich der Gruppe mit geringem Veränderungspotential zugewiesen werden, eine Folge der bereits weit fortgeschrittenen Bodenzustandsveränderungen durch die in dieser Region bedeutenden atmogenen Stoffeinträge. Auch der Schwarzwald und Teile des Rheinischen Schiefergebirges heben sich durch zahlreiche Punkte mit geringem Veränderungspotential ab, was ebenfalls mit bereits abgelaufenen Bodenzustandsveränderungen begründet werden kann. Im Nordostdeutschen Tiefland finden sich indes fast ausschließlich Böden mit hohem Veränderungspotential, was als Folge der atmogenen Aufbasung gedeutet werden kann, die nunmehr zu einer erhöhten Sensibilität für meßbare Versauerungseffekte geführt hat. Außerdem sind die meisten Carbonatstandorte der Schwäbisch-Fränkischen Alb nicht sensibel für Bodenzustandsveränderungen; die der Bayerischen Alpen weisen hingegen -

offensichtlich aufgrund verhältnismäßig weiter C/N-Verhältnisse - häufig ein hohes Potential für Veränderungen bei anhaltendem Stickstoffeintrag auf.

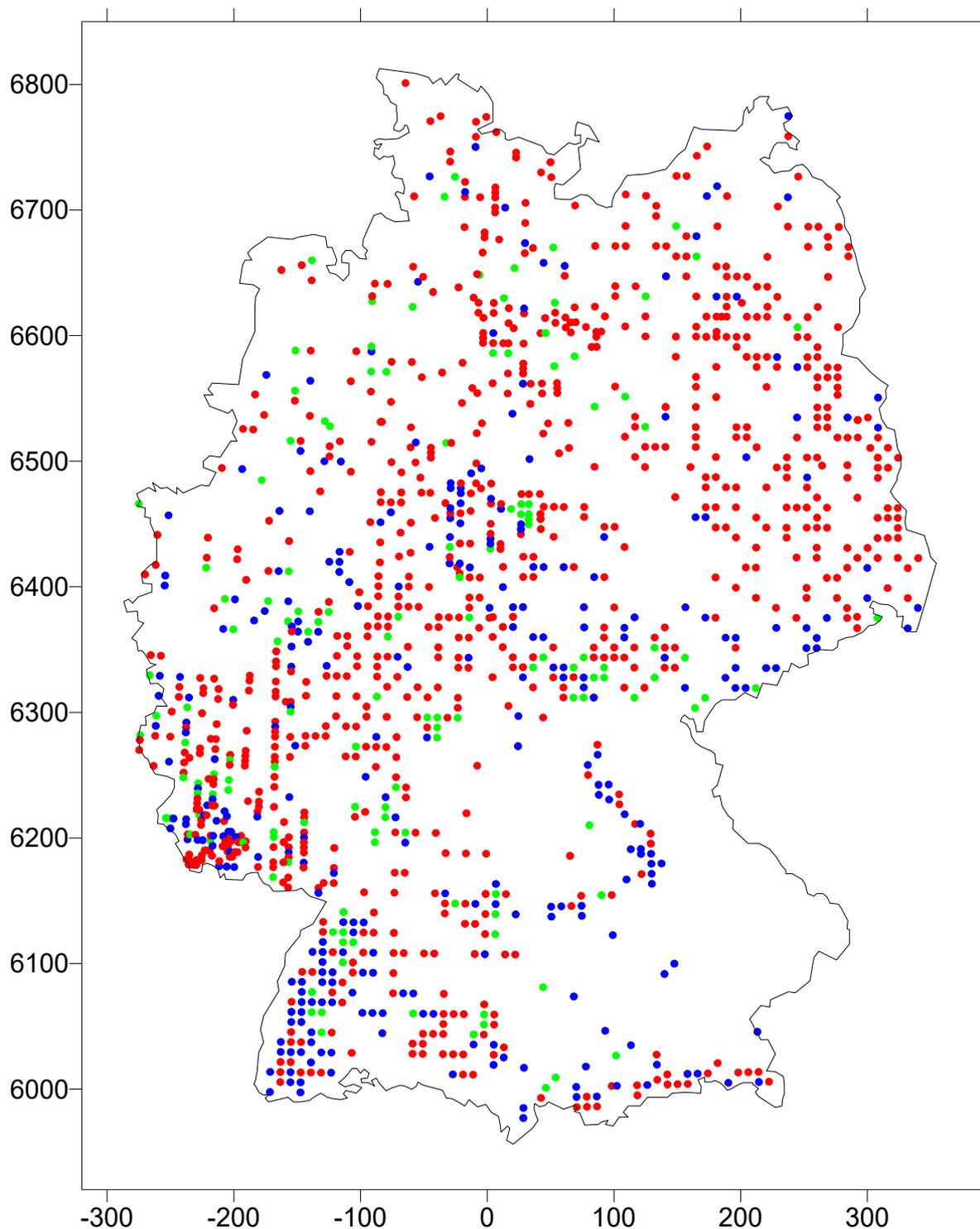


Abb.15: Sensibilität für Bodenzustandsveränderungen durch N-Eutrophierung (Einengung des C/N-Verhältnisses) oder atmosphärischen Säureeintrag (Reduktion der Basensättigung); rot → hohe, grün → mittlere, blau → geringe Sensibilität

In Kap.3.4 wurde ein Bodenzustandstyp (Cluster 3) ermittelt, der aufgrund seines Säurezustandes besonders zur Überprüfung des Ausmaßes der Versauerungsdynamik geeignet erscheint. Die Verschneidung der Erhebungspunkte dieses Typs mit der Stichprobe der BZE-Punkte, die sich bezüglich des Stickstoffzustandes durch ein *hohes* Veränderungspotential auszeichnen (Kap.3.5), führt zu einer Schnittmenge von insgesamt **71 Erhebungspunkten**, welche in Abb.16 kartographisch dargestellt sind. **Diese Punkte würden sich im Rahmen der BZE-Wiederholung besonders für Pilotstudien zur Überprüfung der Bodenzustandsdynamik eignen.** Eine für diesen Zweck noch engere Auswahl aus dieser Stichprobe sollte auch die regionalen Unterschiede der Eintragsituation seit der BZE-Erstbeprobung mit berücksichtigen.

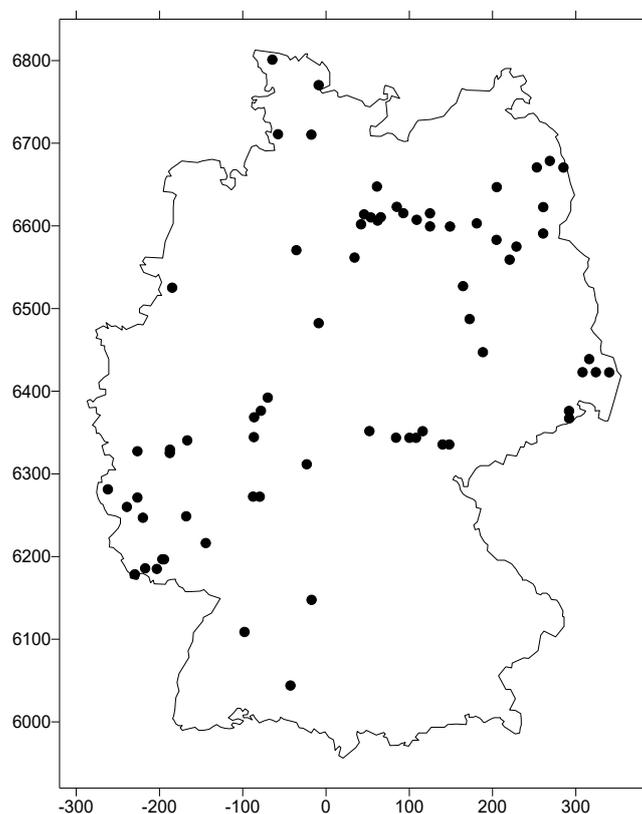


Abb.16: Erhebungspunkte mit einem besonders hohen Potential für Bodenzustandsveränderungen durch Säure- und Stickstoffeintrag

4 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Im Mittelpunkt dieser Studie steht die Frage, ob bei einer Wiederholung der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) *alle* Stichprobenpunkte der Erstaufnahme erneut zu beproben sind, oder ob sich der Erhebungs- und damit Kostenaufwand durch ein *stratifiziertes Erhebungsdesign* in Zukunft möglicherweise reduzieren läßt. Für alle Standorte der BZE wurde das Potential der Böden abgeschätzt, auf anhaltende Säureinträge mit einer Abnahme der Basensättigung sowie auf anhaltende Stickstoffinträge mit einer Einengung des C/N-Verhältnisses im Humus zu reagieren. Darauf aufbauend wurden Vorschläge für eine Stratifizierung der BZE-Stichprobe erarbeitet.

Es zeigt sich, daß bei 146 von 1681 berücksichtigten Erhebungspunkten Bodenzustandsveränderungen durch Säure- oder Stickstoffinträge derzeit sehr unwahrscheinlich sind (Kap.3.2). Das entspricht einem Anteil an der Gesamtstichprobe von ca. 9 %. Für die Reduktion des Erhebungsaufwandes könnten diese Punkte in einer Folgeinventur am ehesten ohne größeren Informationsverlust weggelassen werden.

Prinzipiell erscheint es möglich, in Zukunft durch eine gezielte exemplarische Beprobung bestimmter Bodenzustandstypen den Erhebungsaufwand einzuschränken. Hierzu wurden Stratifizierungsvorschläge erarbeitet, die notwendigerweise auch Merkmale des Unterbodens berücksichtigen. Da diese Merkmale jedoch nicht für alle BZE-Punkte vorliegen, genügen die Resultate nicht dem Anspruch auf Flächenrepräsentativität. Die primäre Empfehlung dieser Studie lautet daher: **Die Beprobung bei der nächsten BZE sollte für alle Länder so erfolgen, daß *komplette* Datensätze für Ober- und Unterböden *aller* BZE-Punkte vorliegen. Nur so kann ein bundesweit flächenrepräsentatives stratifiziertes Erhebungsdesign für die weiteren Folgeerhebungen entwickelt werde.** Hierfür liefert die vorliegende Studie methodische Ansätze (Kap. 3.4 - 3.6).

Anhand eines Relativmaßstabes konnten die BZE-Punkte in Gruppen mit (vergleichsweise) hohem, mittlerem und geringem Potential für Bodenzustandsveränderungen durch Säure- und Stickstoffinträge unterteilt werden. **Die kartographischen Darstellungen der ermittelten Gruppen verdeutlichen, daß eine allein nach Regionen stratifizierte Beprobung der BZE-Punkte aus Gründen der Repräsentativität unzulänglich ist,** weil Punkte mit hohem und

geringem Veränderungspotential unmittelbar benachbart auftreten können und keine klaren großräumigen Verteilungsmuster erkennbar sind. Ein multivariat-statistischer Ansatz bei der Stratifizierung erscheint mithin besser für die verfolgte Zielsetzung geeignet als eine Gruppierung nach regionalen Befundeinheiten.

Mit Hilfe des hier realisierten statistischen Ansatzes wurde eine Gruppe von insgesamt 71 Standorten ausgewiesen, für die von einem maximalen Potential für Bodenzustandsveränderungen durch Säure- oder Stickstoffdeposition ausgegangen werden kann (Kap.3.6). Diese Teilstichprobe wäre besonders zur **Überprüfung der tatsächlichen Bodenzustandsdynamik beispielsweise im Rahmen einer Pilotstudie** zur BZE-Folgeinventur geeignet. Unabhängig von einer solchen Studie, in der auch die Frage nach der kleinräumigen Variabilität der Bodenkennwerte bearbeitet werden sollte (vgl. Kap.3.3), erscheint es sinnvoll, **in der Folge-BZE alle bisherigen Erhebungspunkte zeitgleich zu beproben und die daraus resultierenden Bodenzustandsdaten stratifiziert auszuwerten.**

5 Literatur

BML (1997): Waldzustandsbericht der Bundesregierung 1997 - Ergebnisse der Waldschadenserhebung.

Buberl, H.G., K. v. Wilpert, E.E. Hildebrand (1994): Verteilung bodenchemischer Stabilitätskriterien. AFZ 4, 199-203.

Hildebrand, E.E. (1986): Zustand und Entwicklung der Austauschereigenschaften von Mineralböden aus Standorten mit erkrankten Waldbeständen. Forstw. Centralbl. 105, 60-76.

Jandl, R., C. Riedler (1998): Nachweisbarkeit der Veränderung des chemischen Waldbodenzustands. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 115, Heft 1, 11-24.

Konopatzki, A., G. Kirschner, R. Kallweit (1998): Bodenzustandswandel in den Wäldern des Nordostdeutschen Tieflandes. AFZ / Der Wald 9, 479-482.

Riek, W., B. Wolff (1998): Verbreitung von Nährstoffmangel bei Waldbäumen in Deutschland – Ergebnisse der Nadel-/ Blattanalysen im Rahmen der BZE. Allgem. Forstz. / Der Wald 53 (10), 507-510.

Riek, W., B. Wolff (1998): Integrierende Auswertung bundesweiter Waldzustandsdaten. Arbeitsbericht des Instituts für Forstökologie und Walderfassung 99 / 2.

Riek, W., B. Wolff (1999): Ansätze zur Ableitung von Waldzustandstypen auf der Grundlage nationaler Inventurdaten. Internationale biometrische Gesellschaft (im Druck).

Ulrich, B. (1981): Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand. Z. Pflanzenernähr. Bodenk. 144, 289-305.

Ulrich, B., Meyer, H., Jänich, K., Büttner, G. (1989): Basenverluste in den Böden von Hainsimsen-Buchenwäldern in Südniedersachsen zwischen 1954 und 1986. Forst und Holz 44, 251-253.

Veerhoff, M., Roscher, S., Brümmer, G.W. (1996): Ausmaß und ökologische Gefahren der Versauerung von Böden unter Wald. UBA (Hrsg.). Forschungsbericht 107 02 004/14. UBA Berichte 1/96.

V. Zezschwitz, E. (1985): Qualitätsänderungen des Waldhumus. Forstw. Centralbl. 104, 205-220.

Wittmann, O.; Fetzer, K. (1982): Aktuelle Bodenversauerung in Bayern. Material Bayer. Staatsmin. Landesentw. u. Umweltfragen 20.

Wolff, B., W. Riek (1997): Deutscher Waldbodenbericht 1996. Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald von 1987-1993 (BZE). Bd. 1 und 2. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), 1-144.

Anhang

Ergebnisse der Clusteranalysen (Clustersortierung nach Anzahl der zugeordneten Punkte; alle Analysen ohne bayerische Daten); Erläuterungen vgl. Kap.3.4

1. Clusteranalyse (Clusteranzahl lt. Vorgabe: 2)					
<i>Cluster</i>	<i>Basensättigung [%]</i>				<i>n</i>
	<i>0-10 cm</i>	<i>10-30 cm</i>	<i>30-60 cm</i>	<i>60-90 cm</i>	
<i>1</i>	16,67	11,68	13,82	22,02	840
<i>2</i>	37,10	44,54	71,30	87,43	247

2. Clusteranalyse (Clusteranzahl lt. Vorgabe: 3)					
<i>Cluster</i>	<i>Basensättigung [%]</i>				<i>n</i>
	<i>0-10 cm</i>	<i>10-30 cm</i>	<i>30-60 cm</i>	<i>60-90 cm</i>	
<i>1</i>	15,70	10,50	11,65	17,29	735
<i>2</i>	25,29	21,91	43,03	69,03	239
<i>3</i>	49,38	69,58	91,78	96,34	113

3. Clusteranalyse (Clusteranzahl lt. Vorgabe: 4)					
<i>Cluster</i>	<i>Basensättigung [%]</i>				<i>n</i>
	<i>0-10 cm</i>	<i>10-30 cm</i>	<i>30-60 cm</i>	<i>60-90 cm</i>	
<i>1</i>	13,00	8,16	8,89	12,53	573
<i>2</i>	27,24	21,45	25,93	39,98	264
<i>3</i>	21,59	20,18	53,60	84,86	149
<i>4</i>	52,54	73,92	91,99	96,18	101

4. Clusteranalyse (Clusteranzahl lt. Vorgabe: 5)					
<i>Cluster</i>	<i>Basensättigung [%]</i>				<i>n</i>
	<i>0-10 cm</i>	<i>10-30 cm</i>	<i>30-60 cm</i>	<i>60-90 cm</i>	
1	12,85	8,20	9,07	13,61	594
2	33,17	26,42	29,44	35,54	193
3	17,36	12,48	29,71	71,76	133
4	26,84	34,52	79,17	91,07	98
5	60,76	84,12	93,25	96,76	69

5. Clusteranalyse (Clusteranzahl lt. Vorgabe: 6)					
<i>Cluster</i>	<i>Basensättigung [%]</i>				<i>n</i>
	<i>0-10 cm</i>	<i>10-30 cm</i>	<i>30-60 cm</i>	<i>60-90 cm</i>	
1	12,86	8,17	8,89	12,48	569
2	33,81	27,00	29,90	34,74	184
3	15,08	10,39	19,20	59,84	122
4	22,43	20,03	59,35	84,88	95
5	64,28	86,54	93,86	96,81	59
6	32,11	50,36	88,59	95,19	58

6. Clusteranalyse (Clusteranzahl lt. Vorgabe: 7)					
<i>Cluster</i>	<i>Basensättigung [%]</i>				<i>n</i>
	<i>0-10 cm</i>	<i>10-30 cm</i>	<i>30-60 cm</i>	<i>60-90 cm</i>	
1	11,36	6,88	7,24	9,31	437
2	19,30	14,41	18,09	27,98	251
3	42,09	33,55	34,58	39,99	106
4	15,61	10,72	22,06	68,20	93
5	22,06	19,32	61,47	86,63	82
6	31,96	50,34	87,93	94,13	60
7	63,98	86,77	94,46	97,65	58

7. Clusteranalyse (Clusteranzahl lt. Vorgabe: 8)					
<i>Cluster</i>	<i>Basensättigung [%]</i>				<i>n</i>
	<i>0-10 cm</i>	<i>10-30 cm</i>	<i>30-60 cm</i>	<i>60-90 cm</i>	
1	11,60	7,29	7,71	10,38	478
2	19,33	16,87	22,36	32,95	233
3	15,58	11,08	21,82	70,03	85
4	21,13	18,73	62,17	86,83	79
5	63,08	86,39	94,92	98,26	59
6	30,57	49,32	90,25	96,17	53
7	47,40	41,33	45,04	53,60	52
8	48,25	23,22	17,37	19,94	48

8. Clusteranalyse (Clusteranzahl lt. Vorgabe: 9)					
<i>Cluster</i>	<i>Basensättigung [%]</i>				<i>n</i>
	<i>0-10 cm</i>	<i>10-30 cm</i>	<i>30-60 cm</i>	<i>60-90 cm</i>	
1	12,10	7,75	8,20	11,36	519
2	22,18	20,09	26,27	32,80	181
3	13,58	9,15	15,30	58,11	90
4	20,76	17,31	46,07	82,07	80
5	26,65	30,55	82,50	93,55	61
6	70,20	85,00	94,40	97,96	46
7	51,12	44,11	45,33	53,40	40
8	54,55	23,30	18,39	19,68	35
9	33,56	74,10	94,65	97,84	35

9. Clusteranalyse (Clusteranzahl lt. Vorgabe: 10)					
<i>Cluster</i>	<i>Basensättigung [%]</i>				<i>n</i>
	<i>0-10 cm</i>	<i>10-30 cm</i>	<i>30-60 cm</i>	<i>60-90 cm</i>	
1	12,02	7,71	8,19	10,92	504
2	22,59	23,26	28,59	31,61	139
3	14,73	8,97	15,04	43,41	116
4	21,43	18,25	55,28	82,06	75
5	25,98	40,12	86,65	94,82	62
6	59,28	87,54	97,44	98,96	57
7	18,21	12,33	22,72	81,35	44
8	52,13	39,33	39,86	47,11	42
9	50,87	18,69	14,07	17,64	32
10	65,03	63,59	73,51	85,05	16

10. Clusteranalyse (Clusteranzahl lt. Vorgabe: 11)					
<i>Cluster</i>	<i>Basensättigung [%]</i>				<i>n</i>
	<i>0-10 cm</i>	<i>10-30 cm</i>	<i>30-60 cm</i>	<i>60-90 cm</i>	
1	10,85	6,95	7,27	9,37	428
2	17,86	13,81	17,82	28,73	210
3	29,12	30,64	36,94	42,10	86
4	21,25	17,08	47,20	82,39	75
5	13,61	9,00	16,74	62,98	74
6	67,67	87,81	97,06	98,57	46
7	22,19	24,58	83,50	94,94	45
8	41,75	15,76	12,57	13,13	43
9	30,84	66,36	95,48	98,52	33
10	48,04	54,08	69,94	84,51	24
11	69,01	45,42	35,47	40,65	23

11. Clusteranalyse (Clusteranzahl lt. Vorgabe: 12)					
Cluster	Basensättigung [%]				n
	0-10 cm	10-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	
1	11,33	7,46	8,04	10,54	476
2	14,65	9,14	14,81	42,05	131
3	22,44	23,63	28,84	31,77	127
4	17,21	12,29	33,57	83,71	71
5	22,43	25,81	82,31	95,24	53
6	38,35	15,22	12,73	14,09	48
7	29,20	31,55	55,04	71,98	44
8	34,46	70,36	93,38	97,13	40
9	69,84	88,60	97,64	98,96	40
10	46,53	32,64	37,23	49,60	30
11	69,86	43,29	29,94	28,44	16
12	70,85	61,62	70,09	82,66	11

12. Clusteranalyse (Clusteranzahl lt. Vorgabe: 13)					
<i>Cluster</i>	<i>Basensättigung [%]</i>				<i>n</i>
	<i>0-10 cm</i>	<i>10-30 cm</i>	<i>30-60 cm</i>	<i>60-90 cm</i>	
<i>1</i>	11,15	7,27	7,76	10,03	457
<i>2</i>	15,19	10,23	14,91	36,63	150
<i>3</i>	22,96	24,77	30,32	32,52	112
<i>4</i>	16,52	11,34	26,38	78,45	68
<i>5</i>	18,04	20,02	75,60	94,05	52
<i>6</i>	37,66	15,33	12,84	14,46	51
<i>7</i>	28,53	28,52	53,26	72,58	48
<i>8</i>	70,25	87,11	96,66	98,23	42
<i>9</i>	41,97	49,62	84,44	93,61	32
<i>10</i>	46,65	32,49	37,57	50,30	29
<i>11</i>	31,80	77,76	97,11	99,12	27
<i>12</i>	69,86	43,29	29,94	28,44	16
<i>13</i>	81,00	78,96	50,24	69,17	3

