

Zwischenbericht zum Forschungsprojekt

Identifikation, Prüfung und Anwendung stofflicher Nachhaltigkeitsindikatoren
in Waldökosystemen – konzeptionelle Auswertung und praktische
Umsetzung des Erkenntnisstandes

gefördert durch die



Aktenzeichen: DBU 17913
Projektleiter PD Dr. Michael Bredemeier
Verfasser: Dr. Schulte-Bisping
Projektbeginn: 15.02.2001
Laufzeit: 18 Monate

Göttingen, im Oktober 2001

Inhaltsübersicht

1	Zielsetzung	3
2.	Zusammenarbeit mit den DBU-Partnerprojekten	3
3.	Quantitative und qualitative Indikatoren	3
3.1	Testdatensätze	4
3.2	Erste Auswertungen zu den quantitativen Indikatoren	5
3.2.1	BZE-Niedersachsen	5
3.2.2	Daten Westharz	9
3.2.3	Daten der bundesweiten Bodenzustandserhebung (BZE 1)	11
4.	Diskussion und Folgerungen	14
	Literatur	18
	Anhang	18

1 Zielsetzung

Das Projekt widmet sich der Ermittlung aussagekräftiger und in der Praxis umsetzungsfähiger Indikatoren für die stofflichen Aspekte der multifunktionalen Waldnutzung [Beese, 1996], insbesondere der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und der Sicherstellung der Filter- und Schutzwirkungen des Waldbodens. Damit werden in erster Linie das Kriterium 2 (Erhaltung der Gesundheit und Vitalität von Forstökosystemen) und das Kriterium 5 (Erhaltung und Verbesserung der Schutzfunktionen bei der Waldbewirtschaftung) der Pan-Europäischen Waldzertifizierung [PEFC, 2000] angesprochen, die ihrerseits auf die Helsinki-Kriterien zurückgehen. Diese Kriterien und die darauf basierende Zertifizierung einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung nach dem PEFC-Standard bilden den inhaltlichen Schwerpunkt und die Anknüpfungsstelle für die Umsetzung in die forstliche Praxis.

2. Zusammenarbeit mit den DBU-Partnerprojekten

Das Projekt steht in enger Kooperation mit den Vorhaben "Biologische Vielfalt und nachhaltige Nutzungsmöglichkeiten durch multifunktionale Forstwirtschaft unterschiedlicher Intensität - ein Waldnutzungsvergleich" (Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen) und "Planung, Kontrolle und Vollzug in der Forstwirtschaft nach umfassenden Nachhaltigkeitskriterien" (Universität München), die unter Förderung der DBU und des EU-Life Programms waldwachstums- und biodiversitätsbezogene sowie forstwirtschaftliche Indikatoren im Rahmen der Helsinki-Kriterien erarbeiten.

3. Quantitative und qualitative Indikatoren

Unter Indikatoren werden im allgemeinen Kenngrößen verstanden, die Aussagen über den Zustand eines komplexen Systems ermöglichen, um damit eine bestimmte Bewertung, in diesem Fall des Zustands und der Entwicklung von Waldökosystemen, zu erleichtern. Dabei unterscheiden wir qualitative von quantitativen Indikatoren: *quantitative Indikatoren* sind messbare und/oder berechnete Größen, wie der organische Kohlenstoffgehalt (C_{org}), die Austauschkapazität des Bodens (AKe) oder die Basensättigung, die analytisch gewonnen werden und Auskunft geben über den Zustand und möglicherweise über die Entwicklung des jeweiligen Systems. *Qualitative Indikatoren* sind empirischer Natur und nicht skalar. Sie haben einen eher deskriptiven Charakter und basieren primär auf Erfahrungswissen. Dazu gehören beispielsweise einige morphologische Bodenmerkmale aus der Standortkartierung, wie die Humusform und der Bodentyp. Aber auch die Bodenart als Indikator für die Textur kann beim Vergleich von unterschiedlichen Böden als ein wichtiger Basisindikator gewertet

werden [Schoenholtz, Van Miegroet and Burger, 2000].

Um eine multifunktionelle Forstwirtschaft dauerhaft und wissenschaftlich fundiert zu etablieren, müssen aussagekräftige und in der Praxis umsetzungsfähige Indikatoren entwickelt werden, die den aktuellen Zustand des Systems und seine Veränderungen anzeigen [Beese, 1996]. Von besonderem Interesse sind dabei die stofflichen Aspekte der Waldnutzung, insbesondere die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und die Sicherstellung der Filter- und Schutzwirkungen des Waldbodens. Ein erster Entwurf eines Systems von quantitativen, stofflichen Nachhaltigkeitsindikatoren findet sich in Tabelle 1. Die Matrix weist Indikatoren aus, die für die Regelungsfunktion von Waldökosystemen "Kritikalität" anzeigen können. In Anlehnung an den OECD "driving force-state-response-Ansatz (DSR)" [OECD, 1996] wird dabei zwischen kritischen Einträgen und Eingriffen sowie kritischen Zuständen und kritischen Austrägen [Schulte-Bisping, Bredemeier, and Beese, 2001] differenziert.

Tab. 1: Stoffliche Indikatoren für die Regelungsfunktion von Waldökosystemen

	Einträge	Eingriffe	Zustände	Austräge
Aggregierter Indikator	Immission und Deposition von Nähr-/Schadstoffen	Biomasse-Nutzung /Befahrung /Baumartenwahl	Nährstoffbilanzen, Versauerungsäquivalente und Al-Stress	Austräge von Nähr-/Schadstoffen
Indikator (Messwert)	H, NO _x , NH ₄ , N _{total} , S, Mg, Ca Eingetragene Säuresumme / Jahrzehnt / Gaskonzentrationen: SO ₂ , NO _x , NH ₄ , O ₃ (baumartenspezifisch)	Zuwachs und tats. Nutzung / GPV, Lagerungsdichte, Wegedichte, Maschineneinsatz / Spezies / Melioration (Kalkung, Düngung, Kompost)	M _b -Vorräte, KAK-Entwicklung / Jahrzehnt, KAK-Sättigung, pH-Werte, N-Sättigung / Ca/Al _{inorg} C/N, C/P, C/S	C/N in org. Auflage Nitrat / Aluminium Schwermetalle im Sickerwasser Spurengase / Emteexporte
Einheit	kg/ha/Jahr, kmol _c ha ⁻¹ Jahr ⁻¹ , % Veränderung/Jahrzehnt	fm/ha/Jahr(zehnt) V%, g cm ⁻³ , % Fläche Artenanzahl ha ⁻¹ , Shannon- oder Clark & Evans-Index	kg, meq/100g soil, kmol _c ha ⁻¹ Jahr ⁻¹ , pH, % CEC-Sättigung/Jahrzehnt	g g ⁻¹ / mg l ⁻¹ / µg l ⁻¹ µg m ² h ⁻¹ kg ha ⁻¹
Grenzwert	> 15 kg N ha ⁻¹ a ⁻¹ > 30 kg S ha ⁻¹ a ⁻¹ (standortspezifisch)	Nutzung > Zuwachs Luftkapazität < 10%	K=400 kg ha ⁻¹ ; Ca=400 kg ha ⁻¹ Mg=100 kg ha ⁻¹ , P =750 kg ha ⁻¹ M _b <15%, Ca/Al < 0.2 Ca/H < 1 N-Output:N-Input >1	C/N < 20 g g ⁻¹ NO ₃ =50 mg l ⁻¹ Al=0,2 mg l ⁻¹ Cd=5,0 µg l ⁻¹ Pb=10 µg l ⁻¹
Datenquelle	UNECE: Critical Loads	BBodSchV BioAbfV Landesforsten, Forstämter	AK-Standortkartierung	TrinkwasserV DüngeV AK-Waldböden

3.1 Testdatensätze

Bei der Identifikation und Prüfung stofflicher Indikatoren wird mit flächenbasierten Testdatensätzen auf unterschiedlichen räumlichen Skalen gearbeitet (Tab. 2). Diese umfassen die Raumskalen der gesamten Bundesrepublik Deutschland, des Landes Niedersachsen und der intensiv untersuchten Forstämter des Westharzes.

Tab. 2: Datensätze und Skalenebenen

Testgebiet / Datensatz	Raumskala	Intensität / Qualität der erhobenen Daten
Westharz (Eberl, 1998)	Region, Waldfl. ca. 45.000 ha	sehr hoch (406 Bodenprofile)
Niedersächsische-BZE (Bartens und Büttner 1997)	Land, Waldfl. ca. 1,1 Mio. ha	mittel (192 Bodenprofile)
Bundesweite Bodenzustandserhebung: BZE 1 (BMELF 1997)	Staat, Waldfl. ca. 10,2 Mio. ha	mittel (ca 700 Bodenprofile)
Bodenprobenarchiv IBW	keine räumliche Systematik	hoch, Boden-Vollanalysen

3.2 Erste Auswertungen zu den quantitativen Indikatoren

3.2.1 BZE-Niedersachsen

Als ein erster Testdatensatz dienten die Niedersächsischen Daten der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Walde, die in elektronischer Form von der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt veröffentlicht wurden [Bartens und Büttner, 1997]. Die niedersächsische BZE umfasst 192 Bodenprofile als Teil der bundesweiten Erhebung von insgesamt etwa 1800 Profilen. Die Beprobungen erfolgten schematisch in einem über die Waldfläche gelegten 8 km x 8 km - Netz, das stellenweise auf 4 x 4 km verdichtet wurde.

Die beprobten Waldflächen befinden sich in Höhenlagen zwischen 5 und 870 m ü. NN, bei mittleren Jahresniederschlägen von 580 - 1400 mm (Gesamtmittel 770 mm) und Jahresmitteltemperaturen von 4,5 – 9,6°C (Gesamtmittel 8,0 °C). Charakteristisch ist ein hoher Anteil silikatarmer und pleistozäner Substrate. Die Hauptbaumarten der forstlichen Bestockung sind Kiefer und Fichte mit zusammen 60% Flächenanteil, sowie Buche und Eiche mit zusammen 40%.

An den BZE-Punkten wurden Profilgruben ausgehoben. Neben der morphologischen Profilansprache wurden Proben entnommen und folgende chemische Bodenanalysen durchgeführt: Sättigungsextrakt (GBL) und austauschbare Kationen (AKe), pH(H₂O) und pH(KCl), sowie C-, N- und P-Gehalte.

Eine zentrale Hypothese aus dem Projektantrag lautet: „ Der C-Gehalt bestimmt die AKe so stark, dass er (evtl. zusammen mit der Textur und dem Ausgangssubstrat) zu ihrer

qualifizierten Abschätzung hinreicht". Ließe sich diese Hypothese befriedigend quantifizieren, und könnte man weiterhin den C-Gehalt mit hinreichender Genauigkeit aus Inventurdaten schätzen, so wäre man dem Ziel der qualifizierten, flächenhaften Abschätzung quantitativer stofflicher Indikatoren sehr viel näher gekommen.

Die Bedeutung des C-Gehalts (Humus) für die variable Ladung des Austauschers ist bekannt, ebenso wie die Bedeutung des Humus für den Wasserhaushalt. Aber reicht die Bestimmtheit des Zusammenhanges für eine befriedigende Abschätzung der standörtlichen stofflichen Ausstattung?

Die lineare Regressionsbeziehung zwischen dem Kohlenstoffgehalt des Oberbodens (0-5 cm) und der aktuellen Kationenaustauschkapazität ist in Abb. 1 dargestellt. Zwar wird ein hochsignifikanter positiver Zusammenhang errechnet, dessen Bestimmtheit jedoch relativ gering ist. Das Bestimmtheitsmaß ("rsquare") zeigt an, dass nur 31% der Variation der AKe im Gesamtkollektiv durch Variation des C-Gehalts zu erklären sind.

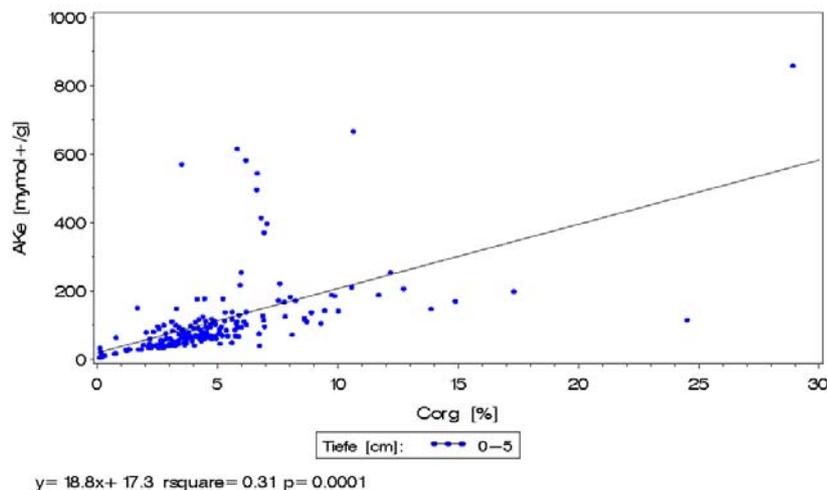


Abb. 1: Regressionsbeziehung zwischen AKe und C_{org} im Gesamtkollektiv der niedersächsischen BZE, Oberböden 0-5 cm Tiefe

Es wird allerdings auch deutlich, dass einige Standorte durch "Ausreißereigenschaften" die Korrelationsbeziehung verschlechtern. Das Kollektiv mit hohen Austauschkapazitäten weit oberhalb der Regressionsgeraden, aber noch im Bereich moderater C-Gehalte entspricht den Carbonatstandorten innerhalb der Niedersächsischen BZE. Die beiden Ausreißer mit sehr hohen C-Gehalten sind jeweils ein Hochmoorstandort (niedrige AKe) und ein Niedermoor (hohe AKe).

Eliminiert man diese besonderen Standorte aus der Regressionsbeziehung, was einem Ausschluss von carbonatischen und organischen Böden entspricht, so verbessert sich der korrelative Zusammenhang erheblich (Abb. 2). Das Bestimmtheitsmaß der Beziehung steigt auf 56 %.

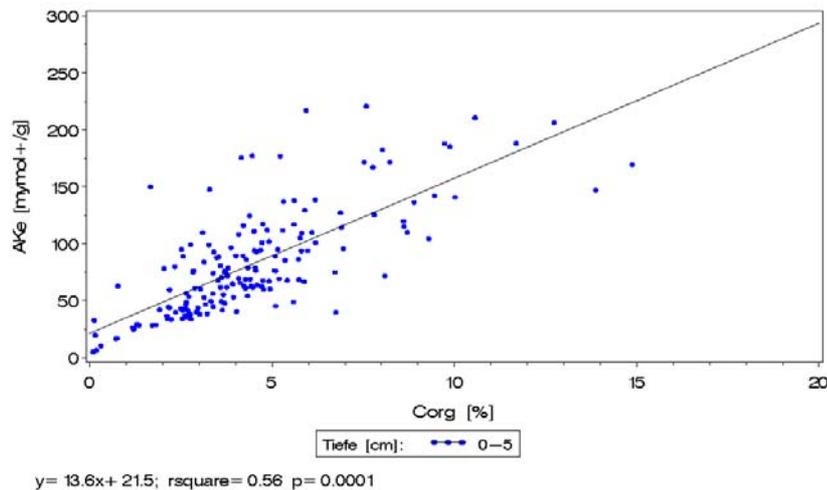


Abb. 2: Regressionsbeziehung zwischen AKe und C_{org} ohne Carbonatstandorte und Moore

Der Regressionskoeffizient zeigt nun einen mittleren Anstieg der AKe von etwa 14 [$\mu\text{mol}_e/\text{g}$ Feinboden] je % Corg an, ein Wert der durchaus plausibel erscheint. Auch das Interzept von etwa 25 $\mu\text{mol}_e/\text{g}$ Feinboden bei vollständiger Abwesenheit von Corg ist bei diesem Kollektiv silikatarmer Substrate nicht unplausibel. Für einen Einstieg in die Abschätzung der standörtlichen Nährstoffversorgung auf Basis der AKe ist das erreichte Bestimmtheitsmaß von 56 % allerdings noch unbefriedigend; dazu käme die Unsicherheit der Schätzung des C-Gehaltes im Boden aus Inventurdaten.

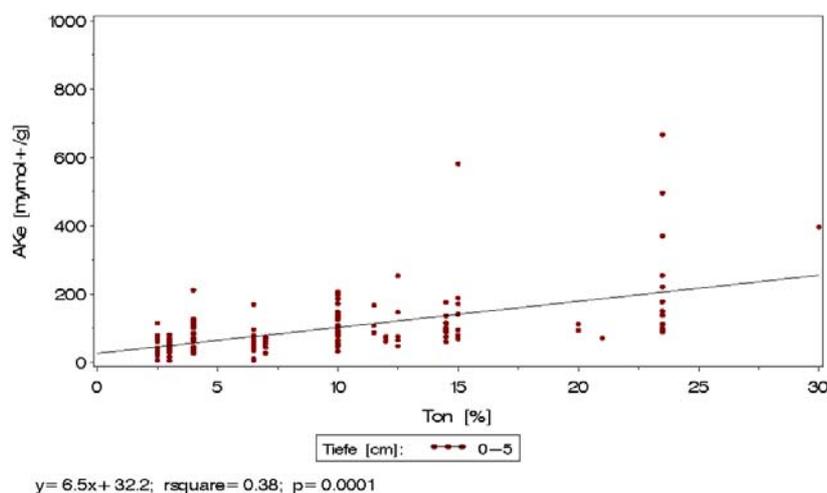


Abb. 3: Regressionsbeziehung zwischen AKe und Tongehalt

Der Regression der AKe auf den Tongehalt ist in Abb. 3 dargestellt. Um die Bodentextur (Tongehalt) als metrische Variable verrechnen zu können, wurde der Tongehalt der Böden, bezogen auf den obersten Mineralbodenhorizont, als Mittelwert aus den Texturangaben der Standortkartierung abgeleitet. Daher finden sich in der entsprechenden Abbildung keine stetigen Werte sondern Tongehaltsklassen.

Der Zusammenhang ist statistisch hochsignifikant, die Regressionsparameter erscheinen bodenkundlich plausibel (Anstieg um im Mittel 6,5 $\mu\text{mol}_e/\text{g}$ Feinboden je % Ton). Doch auch hier bleibt das Bestimmtheitsmaß mit 38 % relativ schwach, wozu sicherlich die diskreten Stufen der Zuordnung von Ton-% etwas beitragen.

Der Zusammenhang einzelner austauschbarer Kationen mit dem Kohlenstoff- oder Tongehalt ist allgemein weitaus schwächer als für die gesamte AKe. Zur Veranschaulichung ist in Abb. 4 die Regression der Gehalte an austauschbarem Mg auf den C-Gehalt dargestellt. Das Datenkollektiv ist hierbei dasselbe wie in Abb. 2, nach Ausschluß der carbonatischen Böden und der Moorböden. Die positive Korrelation ist statistisch nicht signifikant, das Bestimmtheitsmaß der Regressionsbeziehung liegt bei 9 %. Vorhersagen der standörtlichen Mg-Verfügbarkeit lassen sich auf der Basis derartiger Relationen nicht gründen.

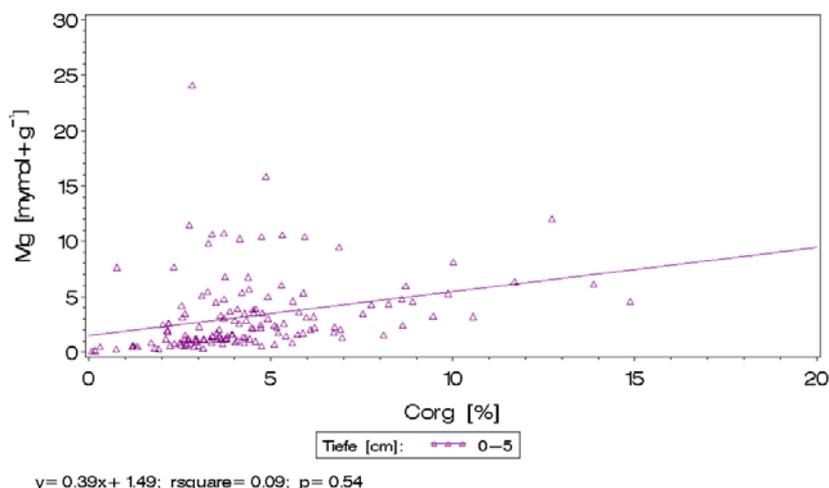


Abb. 4: Regressionsbeziehung von austauschbarem Magnesium (Mg) und C_{org}

Angesichts dieser Ergebnisse ist man auf weitergehende Bemühungen angewiesen, um die Vorhersagegenauigkeit zu verbessern. Eine naheliegende Methode dazu sind multiple, schrittweise Regressionen. Wir führten diese mit der AKe als abhängiger Variable durch und bezogen C- und Tongehalt sowie mehrere weitere Variablen des Datensatzes in das Modell ein. Letztere konnten jedoch wenig zur Erklärung der Varianz in der Variable AKe beitragen. Das Ergebnis zeigt die nachfolgende Abbildung 5:

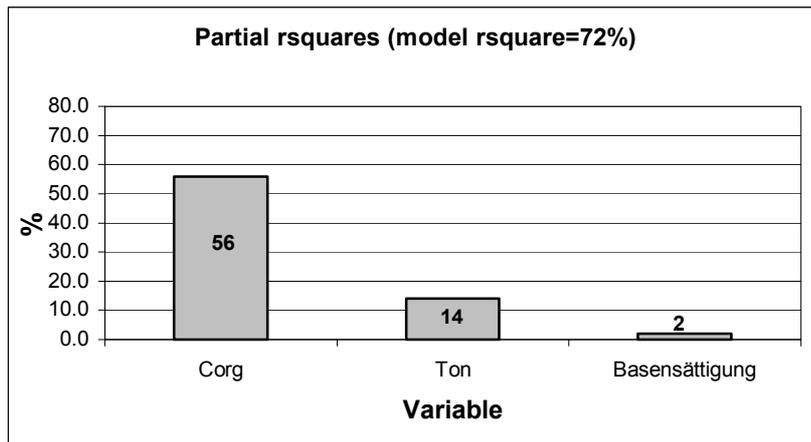


Abb. 5: Anteile verschiedener Variablen in einem multiplen, schrittweisen Regressionsmodell an der Erklärung der Varianz in der Variable AKe

Im schrittweisen multiplen Regressionsmodell können – wie in der Einzelregression – 56 % der Variabilität der AKe durch diejenige des Kohlenstoffgehaltes erklärt werden. Die Einbeziehung der Variable Tongehalt in das Modell verbessert die Vorhersagegenauigkeit um weitere 14 %, so dass ein Bestimmtheitsmaß von insgesamt 70 % auf Basis dieser beiden unabhängigen Variablen erreicht wird. Die Einbeziehung weiterer Größen in das Modell, wie in diesem Fall der Basensättigung als Maß für die Versauerung des Austauschers oder des pH-Wertes, trägt dann nur noch wenig zur weiteren Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit bei. Der geringe Einfluß des pH-Wertes läßt sich aus der reduzierten Variabilität der Testdaten erklären, da das Gros der Standorte im pH-Bereich unter 5 liegt.

3.2.2 Daten Westharz

Das Datenkollektiv Westharz [Eberl, 1998] enthält Analyseergebnisse von 406 Bodenprofilen der forstlichen Standortskartierung in Niedersachsen aus den Jahren 1986-1992. Nach der höhenzonalen Klimadifferenzierung im Harz reichen die untersuchten Standorte von der kollinen bis zur hochmontanen Stufe, wobei als Ausgangssubstrat die basenarmen Silikatgesteine mit einem Anteil von 75% überwiegen. Die Hauptbaumarten der forstlichen Bestockung sind Buchen, in der montanen und hochmontanen Höhenstufe überwiegen Fichten. Die chemische Analyse der Bodenproben erfolgte allerdings nicht nach BZE-Standard in festen Tiefenstufen sondern in diesem Fall horizontbezogen.

Dieser Datensatz wurde ebenfalls einer korrelations- und regressionsanalytischen Auswertung [SAS, 1996] unterzogen. Die Regressionsbeziehung zwischen den Kohlenstoffgehalten des Oberbodens (A-Horizonte) und der aktuellen Kationenaustauschkapazität zeigt Abbildung 6. Zwar wird auch hier ein hochsignifikanter positiver

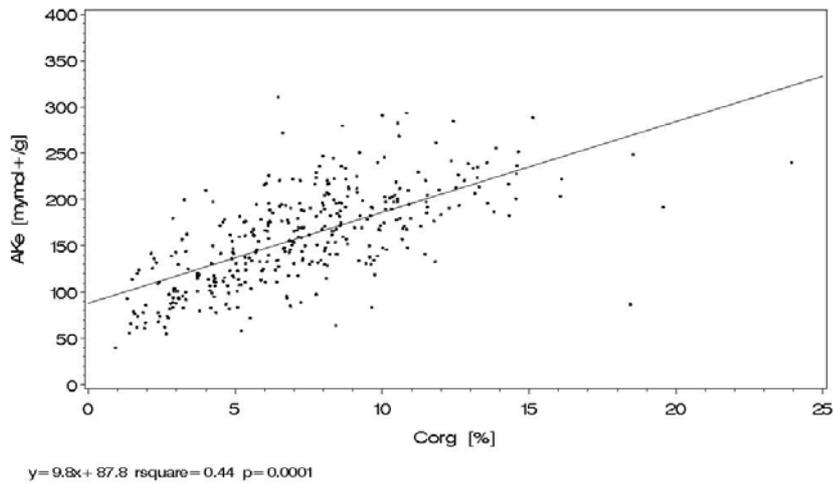


Abb. 6: Regression zwischen AKe und C_{org} im Datenkollektiv Westthar (Oberböden: A-Horizonte, n=357)

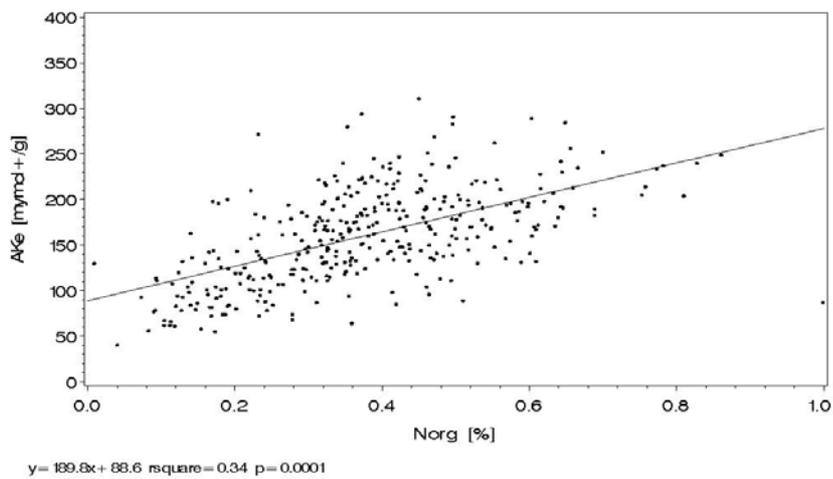


Abb. 7: Regression zwischen AKe und N_{org} im Datenkollektiv Westthar (Oberböden: A-Horizonte, n=357)

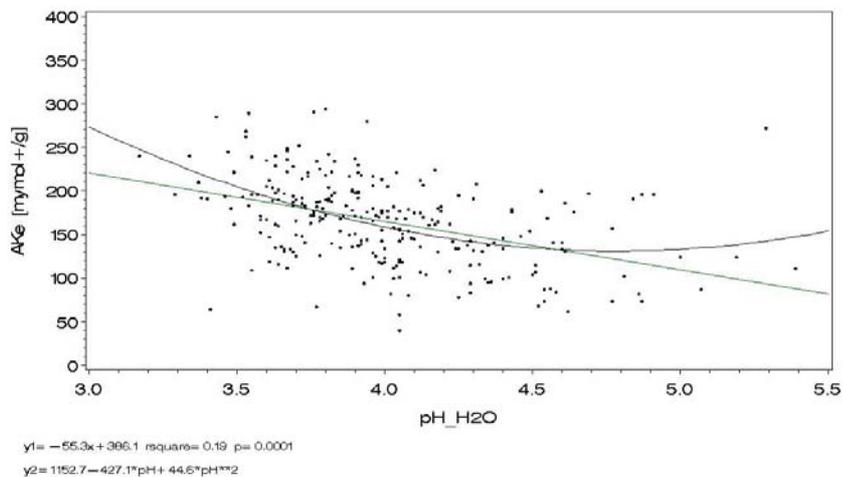


Abb. 8: Regression zwischen AKe und pH(H₂O) im Datenkollektiv Westthar (Oberböden: 0-5 cm, n=260)

Zusammenhang errechnet, das Bestimmtheitsmaß fällt jedoch mit 44% noch geringer aus als im ersten Testdatensatz und zeigt, dass nur 44% der Variation der AKe im Gesamtkollektiv Westtharz durch die Variation des C-Gehalts zu erklären sind. Noch geringer ist der korrelative Zusammenhang zwischen den Stickstoffgehalten (Norg) des Oberbodens und der aktuellen Kationenaustauschkapazität (Abb. 7). Das Bestimmtheitsmaß erreicht lediglich 34%. Die Beziehung von pH-Werten und AKe ist ebenso mit einer großen Varianz behaftet und verläuft offensichtlich nicht linear. In Abb. 8 nimmt die AKe zunächst mit dem pH ab, um bei pH 4,2 bis 4,3 ein Minimum zu erreichen, ein Phänomen, das durch die Blockierung von Tonmineral-Ladung durch polymere Al-Hydroxo-Komplexe erklärt werden kann. Im stark sauren Bereich (pH<4,0) wird diese Blockierung dann wieder aufgelöst.

3.2.3 Daten der bundesweiten Bodenzustandserhebung (BZE 1)

Von der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft in Eberswalde wurde uns freundlicherweise der Datensatz der bundesweiten Bodenzustandserhebung BZE 1 zur Verfügung gestellt [BMELF, 1997]. Die übermittelten Daten stammen zum überwiegenden Teil aus dem Staatswald und umfassen ca. 700 Standorte. Aus rechtlichen Gründen wurden außer den pH-Werten weitgehend nur extensive Größen, wie die Stoffvorräte in Humus und Mineralboden oder die prozentuale Belegung des Austauschers mit Kationen freigegeben. An dieser Stelle sei angemerkt, dass gerade für unser Projekt die Freigabe weiterer intensiver Größen, z.B. die Ake, sehr hilfreich gewesen wäre, besonders vor dem Hintergrund der Vergleichbarkeit der hier verwendeten Datensätze.

Um die Vielzahl der vorhandenen Parameter und deren gegenseitige Abhängigkeiten zu überprüfen und einzugrenzen, haben wir in einem ersten Schritt alle Variablen, Prädikatoren und abhängige Variablen, in einem einfachen Regressionsmodell gegeneinander getestet. Die folgende tabellarische Aufstellung (Tab. 3) gibt eine Übersicht über die erzielten Korrelationskoeffizienten (Spearman) zwischen unterschiedlichen Vorratsparametern einschließlich der Höhenlage der Standorte. Die jeweils höchste Korrelation zu den entsprechenden Prädikatoren wird in der zweiten Spalte der Tabelle (fett gedruckt) angezeigt. Man erkennt den an sich trivialen Befund, dass besonders zwischen den C- und N-Vorräten eine hohe Abhängigkeit (Abb. 9) besteht, ebenso wie zwischen der Basensättigung und dem Ca-Vorrat ($r=0,75$) und dem Ca-Vorrat und dem Mg-Vorrat ($r=0,84$). Wie nicht anders zu erwarten, ist auch die Korrelation zwischen den verschiedenen pH-Werten in Wasser und KCl ($r=0,88$) relativ hoch. Geringe Korrelationen treten dagegen zwischen dem Kohlenstoffvorrat und den Calcium-, Magnesium- und Kalium-Vorräten ($r \leq 0,47$) auf, darüberhinaus zwischen der Höhenlage der Standorte und den Vorräten an basischen Kationen ($r < 0,20$).

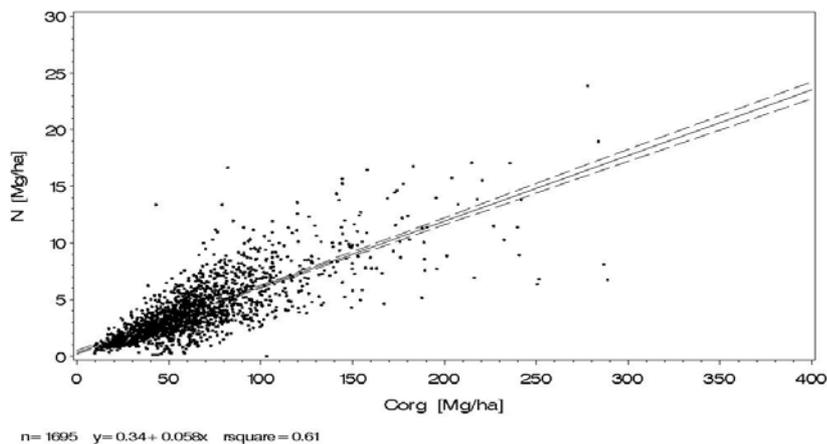


Abb. 9: Stickstoffvorrat (0-30 cm) in Abhängigkeit vom Kohlenstoffvorrat (---=95%-Konfidenzintervall)

Tab. 3: Matrix der Spearman Korrelations-Koeffizienten (BZE)

CORG	NV	HOEHE	MGV	CPMI	PHKCLHU	FEV	CAV	KV
	0,78	0,38	0,37	0,32	-0,32	0,27	0,25	0,23
NV	CORG	CNMI	MGV	KV	HSUM	PV	HOEHE	CAV
	0,78	-0,51	0,50	0,45	-0,39	0,38	0,38	0,36
PV	CPMI	CNMI	HSUM	CPHU	MGV	PHKCL	NV	KV
	-0,64	-0,46	-0,44	-0,43	0,40	0,40	0,38	0,36
KV	MGV	HSUM	CAV	CNMI	MNSUM	MNV	NV	PHKCL
	0,60	-0,56	0,51	-0,47	0,47	0,46	0,45	0,37
CAV	MGV	BAS	KV	PHKCL	HSUM	PHH2O	FESUM	ALSUM
	0,84	0,75	0,51	0,49	-0,46	0,44	-0,43	-0,43
MGV	CAV	KV	HSUM	BAS	NV	MNV	CNMI	PHKCL
	0,84	0,60	-0,56	0,54	0,50	0,47	-0,47	0,41
ALV	ALSUM	FEV	BAS	MNV	FESUM	HV	PHKCL	PHH2O
	0,62	0,51	-0,51	0,36	0,33	0,31	-0,30	-0,29
MNV	MNSUM	HSUM	MGV	KV	CNMI	HOEHE	ALV	CNHU
	0,87	-0,50	0,47	0,46	-0,46	0,36	0,36	-0,33
FEV	FESUM	PHKCL	HV	PHH2O	ALV	HSUM	PHKCLHU	CPMI
	0,88	-0,70	0,60	-0,53	0,51	0,51	-0,49	0,49
HV	HSUM	PHKCL	FEV	PHH2O	FESUM	CPMI	CNMI	PHKCLHU
	0,77	-0,74	0,60	-0,58	0,55	0,49	0,45	-0,41
HOEHE	NAV	NV	CORG	MNV	ALSUM	CNHU	CPHU	MNSUM
	-0,38	0,38	0,38	0,36	0,36	-0,34	-0,31	0,30
PHH2O	PHKCL	HSUM	HV	BAS	FESUM	PHH2OHU	FEV	PHKCLHU
	0,79	-0,61	-0,58	0,56	-0,56	0,53	-0,53	0,50
PHKCL	PHH2O	HV	HSUM	FEV	FESUM	PHKCLHU	BAS	PHH2OHU
	0,79	-0,74	-0,73	-0,70	-0,66	0,65	0,57	0,53
BAS	CAV	ALSUM	PHKCL	PHH2O	MGV	PHH2OHU	FESUM	ALV
	0,75	-0,72	0,57	0,56	0,54	0,51	-0,51	-0,51
CNMI	CPMI	HSUM	NV	PHKCL	MGV	KV	PV	MNV
	0,54	0,53	-0,51	-0,50	-0,47	-0,47	-0,46	-0,46
CPMI	PV	CNMI	PHKCL	FEV	HV	HSUM	FESUM	PHH2O
	-0,64	0,54	-0,49	0,49	0,49	0,43	0,42	-0,36
CNHU	CPHU	HSUM	CNMI	HOEHE	MNV	PV	MNSUM	CPMI
	0,62	0,41	0,38	-0,34	-0,33	-0,32	-0,30	0,29
CPHU	CNHU	PV	HSUM	PHKCLHU	MNV	HOEHE	KV	MGV
	0,62	-0,43	0,39	-0,35	-0,32	-0,31	-0,31	-0,30
PHH2OHU	PHKCLHU	PHKCL	PHH2O	BAS	HSUM	CAV	HV	MGV
	0,88	0,53	0,53	0,51	-0,42	0,35	-0,34	0,32
PHKCLHU	PHH2OHU	PHKCL	PHH2O	FEV	BAS	HV	HSUM	CPHU
	0,88	0,65	0,50	-0,49	0,48	-0,41	-0,40	-0,35

Da zu erwarten ist, dass mit zunehmender Höhe, verbunden mit niedrigeren Jahresdurchschnittstemperaturen und veränderter Streuqualität infolge einer Zunahme des Nadelholzanteils, die Zersetzung von organischem Material eingeschränkt ist, haben wir die Kohlenstoffvorräte der Bodenprofile in Beziehung zur Meereshöhe gesetzt. Abb. 10 läßt eine deutliche Clusterung der Daten im Bereich der planaren und submontanen Höhenstufe erkennen, wobei der mittlere Anstieg des C-Vorrats bei Höhenanstiegen von 100 Meter annähernd 5 Mg ha^{-1} beträgt.

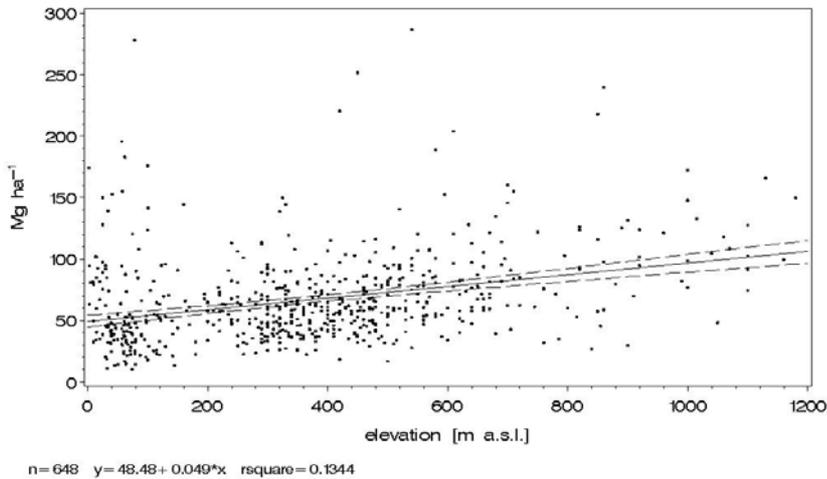


Abb. 10: Kohlenstoffvorrat (0-30 cm) in Abhängigkeit der Meereshöhe (---=95%-Konfidenzintervall)

Der korrelative Zusammenhang zwischen beiden Größen ist aber bei der großen Streuung der Einzelwerte relativ schwach ausgeprägt. Das Bestimmtheitsmaß erreicht nur 13%. Eine weitere Stratifizierung und ein Ausschluß möglicher Sonderstandorte würde in diesem Fall das Bestimmtheitsmaß höchst wahrscheinlich nur unwesentlich verbessern.

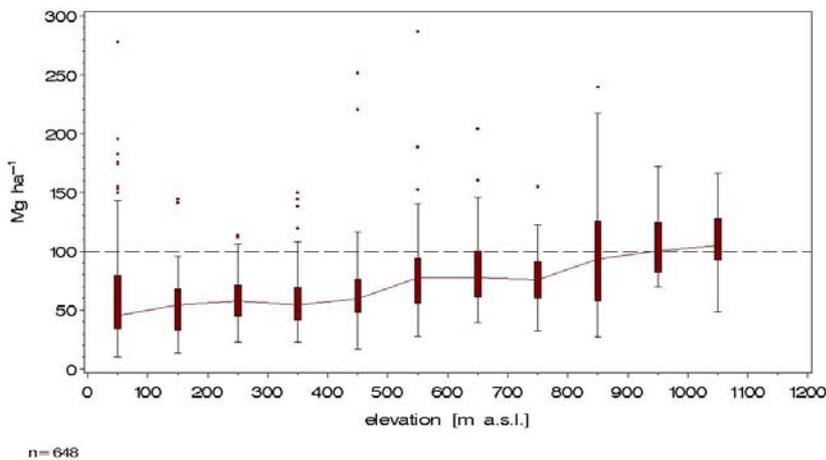
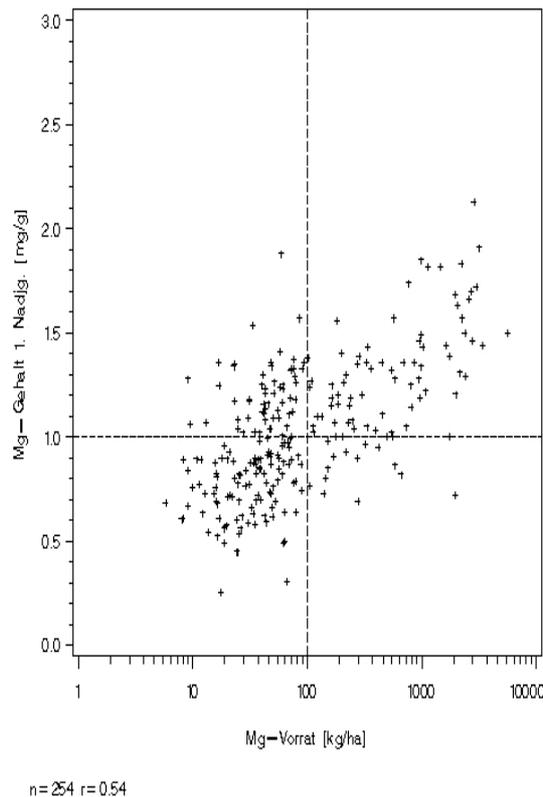


Abb. 11: Kohlenstoffvorrat (0-30 cm) in Abhängigkeit der Meereshöhe (Box-Plot)

Eine andere Darstellungsweise desselben Datensatzes in aggregierter Form als Box-Plot (Abb. 11) zeigt deutlicher, daß sich der Kohlenstoffvorrat (Median) zwar von ca 50 Mg ha⁻¹ in der kollinen Stufe auf über 100 Mg ha⁻¹ in der hochmontanen Stufe mehr als verdoppelt, an der Varianz der Werte ändert das jedoch natürlich nichts. Somit wird der Trend – mit zunehmender Höhe steigt der Vorrat an organischem Kohlenstoff – zwar eindeutig erkennbar und belegt, für den einzelnen Standort bleibt aber eine große Unsicherheit in Bezug auf die Vorhersagbarkeit.



Den relativ losen Zusammenhang stofflich-ökologischer Parameter soll die Abbildung 12 verdeutlichen. Zwischen dem Mg-Vorrat im Boden und dem Mg-Gehalt in 1-jährigen Fichtennadeln liegt der Korrelationskoeffizient mit 0,54 am höchsten, wenn der Hauptwurzelraum bis 30 cm Tiefe zugrundegelegt wird [Riek und Wolff, 2001]. Berücksichtigt man jedoch die Grenzwerte (unterbrochene Linien) bei deren Unterschreitung längerfristig mit Mg-Mangel zu rechnen ist, wird deutlich, dass bei austauschbaren Mg-Vorräten > 100 kg mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Mg-Ernährungsprobleme der Bestände zu erwarten sind: 95% aller Befunde liegen entweder bereits im Mangelbereich oder weisen auf eine ausreichende Versorgung¹.

Abb. 12: Beziehung zwischen den Mg-Gehalten in 1-jhg. Fichtennadeln und dem Mg-Vorrat im Mineralboden bis 30 cm Tiefe

Die vorgestellten Auswertungen belegen einerseits die hohe Variabilität der untersuchten Zusammenhänge, die aber für ökologische Parameter durchaus normal sind, andererseits zeigt gerade das letzte Beispiel, wie auch mit semiquantitativen Indikatoren eine Bewertung möglich wird.

4. Diskussion und Folgerungen

In unseren Testdatensätzen können wir durch multiple Regression eine Vorhersage-

¹ Zu berücksichtigen bleibt, dass die Versorgung der Nadeln nicht nur aus dem austauschbaren Pool im Boden, sondern auch aus deponierten Nährstoffen erfolgt.

genauigkeit von max. etwa 70 % für die AKe als einen Basisindikator der standörtlichen Bodenfruchtbarkeit erreichen (Testdatensatz 1). Diese Beziehung gilt unter Ausschluss von Sonderstandorten, wie Carbonat- und Moorböden, was jedoch kein sehr gravierendes Problem angesichts der Flächenanteile solcher Standorte in der betrachteten Region darstellt. Eine statistische Vorhersagegenauigkeit von 70 % mag für regionale Betrachtungen befriedigend erscheinen, sie bedeutet andererseits aber auch einen Fehler der Schätzung von im Mittel 30 %. Bezogen auf den individuellen forstlichen Standort kann ein solcher Fehler der Schätzung noch nicht zufriedenstellen. Gerade auf der Ebene der einzelnen forstlichen Bewirtschaftungseinheiten wären stoffliche Indikatoren zur Unterstützung von Entscheidungsfindungen im Ökosystemmanagement jedoch zu wünschen. Für die pauschale Ansprache stofflicher Zustände und Entwicklungstrends in größeren Waldlandschaften und Regionen mag die hier erreichte Schätzgenauigkeit eventuell ausreichen.

In einem europaweiten Datensatz von Intensiv-Monitoringflächen, bestehend aus 455 Waldstandorten in 18 Ländern, hat FIMCI (Forest Intensive Monitoring Coordinating Institute, Heerenveen) [de Zwart, 2001] physikalisch-chemische Parameter auf korrelative Zusammenhänge untersucht (Tab. 4). Es zeigte sich, dass zwischen den Variablen nur bedingt in einzelnen Straten hohe Korrelationen auftreten, z.B. bei C_{org} und N_{org} , zwischen der Basensättigung und pH-Werten sowie bei Chlorid und Natrium.

Für die speziell die Regelungsfunktion von Wäldern betreffenden *quantitativen*, stofflichen Indikatoren bedeutet dies jedoch, dass eine verlässliche Schätzung derartiger Indikatoren auf der Basis von einfachen, flächenhaft vorhandenen Inventurdaten, z.B. aus der forstlichen Standortkartierung, vorläufig ein ungelöstes Problem darstellt. Es scheint allerdings einige Schlüsselgrößen wie z.B. den Kohlenstoffgehalt, den pH-Wert und die Textur des Bodens zu geben, aufgrund derer weitere quantitative Indikatoren abschätzbar sind. Dies erfordert jedoch eine genaue Ermittlung der zur Schätzung herangezogenen Größen.

An der Verbesserung dieser Schätzverfahren arbeiten wir im aktuellen Stadium des Projekts weiter durch intensive statistische Auswertung. Es sollen Bereiche der Kritikalität für die Waldernährung und die Regelungsfunktion der Böden identifiziert werden, in ähnlicher Weise, wie es oben anhand der Abb. 12 beispielhaft demonstriert wurde. Ein solches Verfahren kann man als "Extremfallanalyse" bezeichnen. Gelingt es, systematische Faktorenkonstellationen in den kritischen Extremfällen aufzufinden, dann könnte man die Ursachen stofflicher Kritikalitäten erklären.

Tab. 4: Korrelationsmatrix aus FIMCI 2001 (n=455)

	ALTITUDE	SOILCOVER_REG	PH_CACL2_ORG	C_ORG_ORG	N_ORG	CA_ORG	MG_ORG	K_ORG	PH_CACL2_010	C_ORG_010	N_010	CEC_010	BASE_SAT_010	PH_CACL2_1020
ALTITUDE	1,000													
SOILCOVER_REG	-0,192	1,000												
PH_CACL2_ORG	0,394	-0,200	1,000											
C_ORG_ORG	0,005	-0,091	-0,005	1,000										
N_ORG	0,114	-0,142	0,050	0,778	1,000									
CA_ORG	0,146	-0,324	0,665	0,237	0,176	1,000								
MG_ORG	0,463	-0,187	0,643	-0,004	0,088	0,589	1,000							
K_ORG	0,373	-0,191	0,493	-0,012	0,025	0,218	0,487	1,000						
PH_CACL2_010	0,322	-0,109	0,793	-0,082	-0,112	0,383	0,514	0,451	1,000					
C_ORG_010	0,409	-0,098	0,203	0,323	0,447	0,108	0,291	0,140	0,136	1,000				
N_010	0,455	-0,115	0,298	0,242	0,424	0,163	0,355	0,245	0,246	0,584	1,000			
CEC_010	0,292	-0,109	0,212	0,227	0,224	0,117	0,349	0,205	0,287	0,461	0,459	1,000		
BASE_SAT_010	0,335	-0,205	0,738	-0,256	-0,189	0,505	0,469	0,372	0,042	0,042	0,164	0,088	1,000	
PH_CACL2_1020	0,250	-0,079	0,620	-0,057	-0,137	0,177	0,429	0,075	0,088	0,088	0,175	0,814	0,023	1,000
C_ORG_1020	0,355	-0,093	0,222	0,301	0,340	0,110	0,379	0,204	0,153	0,677	0,540	0,557	0,203	0,237
N_1020	0,451	-0,134	0,341	0,203	0,304	0,198	0,465	0,347	0,323	0,650	0,775	0,527	0,203	0,309
CEC_1020	0,285	-0,143	0,198	0,211	0,180	0,090	0,297	0,202	0,279	0,331	0,339	0,923	0,100	0,309
BASE_SAT_1020	0,288	-0,171	0,635	-0,215	-0,209	0,482	0,491	0,333	0,075	0,031	0,094	0,094	0,880	0,633
DEPO	0,459	-0,148	0,141	0,331	0,312	0,184	0,315	0,208	0,002	0,410	0,399	0,418	0,047	-0,072
TEMP	0,062	-0,211	0,451	-0,220	-0,037	0,141	0,256	0,304	0,300	-0,006	0,080	-0,068	0,300	0,189
GRID_AET	0,475	-0,279	0,236	-0,051	0,133	0,157	0,200	0,356	0,138	0,256	0,347	0,094	0,281	0,064
N_NH4_B_AVG	0,019	0,010	-0,123	-0,345	-0,134	-0,157	-0,107	-0,184	-0,186	-0,048	-0,015	-0,156	-0,064	-0,231
N_NO3_B_AVG	0,178	-0,107	-0,051	-0,079	0,158	0,008	-0,040	-0,064	-0,170	0,058	0,096	0,008	-0,020	-0,205
S_SO4_B_AVG	0,026	0,042	-0,090	-0,261	-0,083	-0,093	-0,063	-0,132	-0,179	-0,060	-0,028	-0,089	-0,057	-0,227
CA_B_AVG	-0,040	0,090	-0,058	-0,168	-0,149	-0,053	-0,077	-0,088	-0,055	-0,103	-0,090	-0,088	-0,018	-0,061
MG_B_AVG	0,044	0,021	0,021	-0,062	-0,066	0,013	0,064	-0,002	-0,030	-0,003	-0,005	-0,000	-0,052	-0,040
K_B_AVG	0,137	0,075	0,009	-0,179	-0,064	-0,116	-0,036	-0,124	-0,005	-0,010	0,007	-0,091	0,004	-0,038
NA_B_AVG	0,095	-0,012	0,170	0,151	0,120	0,053	0,291	0,010	-0,028	0,218	0,183	0,307	-0,046	-0,105
CL_B_AVG	0,025	-0,010	0,156	0,042	0,079	0,029	0,280	0,017	-0,041	0,097	0,095	0,227	-0,022	-0,133

	C_ORG_1020	N_1020	CEC_1020	BASE_SAT_1020	DEPO	TEMP	GRID_AET	N_NH4_B_AVG	N_NO3_B_AVG	S_SO4_B_AVG	CA_B_AVG	MG_B_AVG	K_B_AVG	NA_B_AVG
C_ORG_1020	1,000													
N_1020	0,663	1,000												
CEC_1020	0,518	0,490	1,000											
BASE_SAT_1020	-0,014	0,170	0,086	1,000										
DEPO	0,490	0,382	0,382	0,032	1,000									
TEMP	-0,028	0,067	-0,051	0,232	0,043	1,000								
GRID_AET	0,136	0,293	0,072	0,206	0,329	0,487	1,000							
N_NH4_B_AVG	-0,073	-0,054	-0,137	-0,070	0,044	0,388	0,273	1,000						
N_NO3_B_AVG	0,051	0,053	0,025	-0,043	0,299	0,162	0,297	0,366	1,000					
S_SO4_B_AVG	-0,055	-0,036	-0,085	-0,066	0,153	0,251	0,293	0,409	0,596	1,000				
CA_B_AVG	-0,114	-0,114	-0,085	-0,001	-0,090	0,059	0,102	-0,006	0,148	0,148	1,000			
MG_B_AVG	-0,013	-0,030	-0,044	-0,046	0,170	0,011	0,060	-0,039	0,186	0,186	0,427	1,000		
K_B_AVG	-0,081	-0,055	-0,103	-0,042	-0,075	0,214	0,158	0,296	0,246	0,246	0,237	0,246	1,000	
NA_B_AVG	0,363	0,283	0,247	-0,065	0,563	0,075	-0,057	0,062	0,159	0,296	0,131	0,449	0,109	1,000
CL_B_AVG	0,234	0,202	0,167	-0,026	0,553	0,130	-0,031	0,136	0,221	0,432	0,393	0,109	0,109	0,974

Die hier berichteten ersten Ergebnisse machen auch sehr deutlich, dass die statistische Vorhersagegenauigkeit stofflicher Indikatoren weiter erhöht werden sollte. Ein vielversprechender Prediktor hierzu wäre das Substrat der Bodenbildung, das allerdings nicht numerisch vorliegt. Hier werden wir mit einem Rangkorrelationsverfahren, angewandt auf die Residuen aus der besten numerischen multiplen Regression, versuchen weiterzukommen. Auch die Wachstumsparameter der aufstockenden Bestände (Ekl, Lkl, GWL) kommen als aussagekräftige Indikatoren der stofflichen Ausstattung in Frage. Leider liegen sie in keinem der uns zur Verfügung stehenden Testdatensätze vor. Wir werden uns bemühen, sie als Ergänzung zu unseren Datensätzen zu bekommen (Nieders. BZE) oder weitere Testdatensätze, in denen sie vorhanden sind, zu analysieren (evtl. die Waldflächendaten des NIBIS, Nds. Boden-Informationssystem). Ferner wollen wir prüfen, ob eine stratifizierte regressionsanalytische Untersuchung engere korrelative Zusammenhänge zeigt. Wichtige Straten in diesem Zusammenhang sind die Baumart, das Substrat und die Höhenstufe.

Im weiteren Verlauf des Projekts soll auch die Überprüfung *semiquantitativer* Indikatoren mit berücksichtigt werden. Für rein *qualitative* Indikatoren, wie die Humusform und den Bodentyp, hat sich hingegen in zahlreichen vergangenen Untersuchungen (BZE, Standortkartierungen) deutlich herausgestellt, dass deren Aussagekraft stark eingeschränkt und mit Vorsicht zu beurteilen ist. Auf der einen Seite lassen sich die angesprochenen Humusformen chemisch oft nur in ihren extremen Varianten Mull und Rohhumus statistisch signifikant unterscheiden, während andererseits der Bodentyp in der Regel durch chemische Einträge und historische Nutzung so überprägt ist, dass auch in diesem Fall eine Prognose der stofflichen Nachhaltigkeit von Waldökosystemen mit großer Unsicherheit behaftet ist. Die Unzulänglichkeit der bisher verwendeten qualitativen Indikatoren (s.o.) war die Ursache dafür, sich quantitativen Indikatoren zuzuwenden.

Eine aus den hier vorgestellten ersten Ergebnissen zu ziehende Folgerung ist, dass die Ermittlung zentraler quantitativer Basisgrößen für den stofflichen Zustand von Waldökosystemen dringend im Rahmen der forstlichen Standortinventurverfahren ergänzt werden muss. Die Kosten solcher zusätzlicher Erhebungen ließen sich durch den Einsatz neu entwickelter analytischer Methoden begrenzen (z.B. NIRS, Nahinfrarotspektroskopie zur kostengünstigen simultanen Multielementbestimmung in Bodenproben; Beese 2001, mdl. Mittlg.).

Neben weiteren Untersuchungen zur Verbesserung der quantitativen Schätzung von Indikatoren werden wir uns in der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit verstärkt der konzeptionellen Auswertung widmen und die Wertung und Selektion von Indikatoren vornehmen.

Literatur

1. Bartens, H. und Büttner, G. Bodenzustandserhebung in Niedersachsen 1990/91. (Reihe C Band 5), 1-476. 1997. Göttingen, Forschungszentrum Waldökosysteme. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme.
2. Beese, F. O., Indikatoren für eine multifunktionelle Waldnutzung, *Forstw.Cbl.*, 115, 65-79, 1996.
3. BMELF. Deutscher Waldbodenbericht 1996. Wolff, B. and Rieck, W. 1-144. 1997. Bonn, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
4. de Zwart, D., A statistical analysis relating the occurrence probability of specific ground vegetation species to environmental factors at Intensive Monitoring plots, *Pan European Programme for the Intensive Monitoring of Forest Ecosystems*, 2001.
5. Eberl, C. P. Quantifizierung und Bewertung von Merkmalen forstlicher Standortstypen durch ökochemische Parameter im Westharz. (Reihe A Band 151), 1-156. 1998. Göttingen, Forschungszentrum Waldökosysteme. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme.
6. OECD. Environmental Indicators. 3-129. 1998. Organisation for economic co-operation and development (OECD).
7. PEFC. Pan-Europäische Waldzertifizierung. 12-5-2000. Stuttgart, PEFC Deutschland e.V.
8. Riek, W. und B. Wolff, Integrierende Auswertung bundesweiter Waldzustandsdaten, BFH Hamburg. *Abschlußbericht Nr. 1999/2*, 1-141, 2001.
9. SAS, SAS User's Guide: Statistics SAS Inst. Cary, N.C., 1996.
10. Schoenholtz, S. H., H. Van Miegroet, and J. A. Burger, A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities, *Forest Ecology and Management*, 138, 335-356, 2000.
11. Schulte-Bisping, H., M. Bredemeier und F. O. Beese, Nachhaltigkeit der Regelungsfunktion von Waldökosystemen: Bodeneigenschaften und Stoffhaushalt, *Forst und Holz*, 15, 479-482, 2001.

Anhang

Verzeichnis der Variablen aus Tabelle 3

1	CORG	C _{org.} im Mineralboden [kg/ha]
2	NV	N-Vorrat der spez. Mineralbodentiefenstufe
3	PV	P-Vorrat der spez. Mineralbodentiefenstufe
4	KV	K-Vorrat der spez. Mineralbodentiefenstufe
5	CAV	Ca-Vorrat der spez. Mineralbodentiefenstufe
6	MGV	Mg-Vorrat der spez. Mineralbodentiefenstufe
7	ALV	Al-Vorrat der spez. Mineralbodentiefenstufe
8	MNV	Mn-Vorrat der spez. Mineralbodentiefenstufe
9	FEV	Fe-Vorrat der spez. Mineralbodentiefenstufe
10	HV	H-Vorrat der spez. Mineralbodentiefenstufe
11	HOEHE	Höhe über NN
12	PHH ₂ O	pH-Wert in H ₂ O der spez. Tiefenstufe
13	PHKCL	pH-Wert in KCl der spez. Tiefenstufe
14	BAS	Basensättigung der spez. Tiefenstufe
15	CNMI	C/N-Verhältnis (nur 0-5 cm, Standorte ohne Oh-Lage)
16	CPMI	C/P-Verhältnis (nur 0-5 cm, Standorte ohne Oh-Lage)
17	CNHU	C/N-Verhältnis der spez. Tiefenstufe
18	CPHU	C/P-Verhältnis der spez. Tiefenstufe
19	PHH ₂ OHU	pH(H ₂ O) der spez. Tiefenstufe vom Humus
20	PHKCLHU	pH(KCl) der spez. Tiefenstufe vom Humus