

SCHRIFTENREIHE  
FREIBURGER FORSTLICHE FORSCHUNG

BAND 19

Dietmar Zirlewagen

**Regionalisierung bodenchemischer  
Eigenschaften in topographisch stark  
gegliederten Waldlandschaften**

FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT  
BADEN-WÜRTTEMBERG

ABT. BODENKUNDE

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

**Zitiervorschlag:**

**Zirlewagen, Dietmar** (2003): Regionalisierung bodenchemischer Eigenschaften in topographisch stark gegliederten Waldlandschaften. Freiburg (Breisgau): Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung, Bd. 19) Zugl.: Freiburg (Breisgau), Univ., Diss., 2003

ISSN 1436-0586

ISBN 3-933548-19-5

**Die Herausgeber:**

Forstwissenschaftliche Fakultät der  
Universität Freiburg und  
Forstliche Versuchs- und  
Forschungsanstalt Baden-Württemberg

**Redaktionskomitee**

Prof. Dr. J. Huss Prof. Dr. W. Konold  
Prof. Dr. G. Kenk Dr. H. Volk

**Umschlaggestaltung:**

Bernhard Kunkler Design, Freiburg

**Druck:**

Eigenverlag der FVA, Freiburg

**Bestellung an:**

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
Baden-Württemberg  
Wonnhaldestr. 4  
79100 Freiburg  
Tel. 0761/4018-0 Fax 0761/4018-333  
e-mail: [poststelle@forst.bwl.de](mailto:poststelle@forst.bwl.de)

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

Gedruckt auf 100% chlorfrei  
gebleichtem Papier

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Veranlassung / Problemstellung	1
1.2	Arbeitshypothesen und Ziele	1
2	Datengrundlage	3
2.1	Untersuchungsgebiet	3
2.2	Geologie	3
2.3	Relief, Klima und Landnutzung	4
2.4	Thematische Daten	5
2.5	Flächenbezug	7
3	Methode / Methodenentwicklung	8
3.1	Beprobung	8
3.1.1	Stichprobenverfahren	8
3.1.2	Feldaufnahme	9
3.1.3	Probenaufbereitung und Analytik	10
3.2	Statistisches Verfahren zur Regionalisierung	10
3.2.1	Vorgehensweise bei der multiplen Modellbildung	12
3.2.2	Prüfung auf Verletzung der Modellprämissen	13
3.3	Räumliche Variablen	15
3.3.1	Digitales Reliefgliederungsverfahren	15
3.3.2	Ableitung topographischer Scheitelpunkte	16
3.3.3	Morphometrische Reliefattribute	17
3.3.4	Rechts- und Hochwerte	20
3.3.5	Kategorielle Merkmale	20
4	Ergebnisse der Modellentwicklungen	22
4.1	Basensättigung	22
4.1.1	Regressionsmodelle	22
4.1.2	Modellszenarien	29
4.2	Bodenazidität	36
4.2.1	Regionalisierung der pHH <sub>2</sub> O-Werte	36
4.2.2	pHKCl	43
4.2.3	Modellszenarien	45

4.3	Kohlenstoff (u. Stickstoff) -Gehalte / -Vorräte	49
4.3.1	Regressionsmodelle	49
4.3.2	Modellszenarien	55
4.4	Calcium- und Magnesium-Vorräte	60
4.4.1	Regressionsmodelle	60
4.4.2	Modellszenarien	63
5	Wertung: Methode u. Geomorphologie	68
5.1	Modellansatz	68
5.2	Repräsentanzmängel	73
5.2.1	Abgrenzung der Modellvarianten	73
5.2.2	Defizite bei der Erfassung der Waldbestandeszusammensetzung	75
5.3	Geomorphologische Effekte	76
6	Anwendungsbeispiel Baden-Baden	84
6.1	Zielsetzung	84
6.2	Ausgangssituation	85
6.2.1	Untersuchungsgebiet	85
6.2.2	Stichprobenverfahren u. Feldaufnahme	87
6.3	Definition der Modellparameter und -varianten	87
6.3.1	Morphologische Parameter	87
6.3.2	Geologische Parameter	88
6.3.3	Bestandesparameter	89
6.3.4	Variablen zu Meliorationsmaßnahmen	90
6.4	Ergebnis u. Diskussion der Modellanpassungen	91
7	Einfluss von Bestand und Kalkung im Landschaftsmaßstab	100
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	106
	Zusammenfassung	109
	Abstract	110
	Literaturverzeichnis	111
	Abbildungsverzeichnis	124
	Danksagung	129
	Anhang	130

# 1 Einleitung

## 1.1 VERANLASSUNG / PROBLEMSTELLUNG

Die Nachhaltigkeit ist eine der grundlegenden Randbedingungen einer geregelten Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Vielfach nachgewiesene, drastische Veränderungen bodenchemischer Schlüsselparameter in den letzten Jahrzehnten (z. B. BUBERL et al. 1994) begründen die Befürchtung, dass unter den heute wirkenden physikalischen und insbesondere chemischen Randbedingungen die nachhaltige Bereitstellung von Standortressourcen nicht mehr selbstverständlich ist. Berichte über Auswirkungen von Stoffeinträgen in Wäldern sowie Szenarien über tiefgreifende Klimaänderungen (HOUGHTON et al. 1996) haben den Informationsbedarf über Waldökosysteme stark ansteigen lassen. Mittlerweile liegen zahlreiche Ergebnisse von Waldökosystemfallstudien, aber auch von Inventurdaten der Bodenzustandserfassung (BZE) vor. Unstrittig ist der Beitrag dieser Forschungsergebnisse zum besseren Verständnis der Funktions- und Regulationsmechanismen von Waldökosystemen. Es mangelt jedoch weitgehend an validen Methoden, mit Hilfe dieser punktbezogenen ökochemischen Informationen flächenbezogene Auswirkungen auf Waldökosysteme abschätzen zu können. Hierbei geht es nicht nur darum, den Status quo einer in einer Stichprobe erfassten Grundgesamtheit auf die Fläche zu übertragen, sondern auch in einem dynamischen Ansatz "die Konsequenzen anthropogener Eingriffe in Landschaften problem-, raum- und zeitbezogen abzuschätzen" (WENKEL & SCHULZ 1999, S. 27).

Aus dem Bereich der Umweltwissenschaften liegen zahlreiche Arbeiten vor, die sich mit der räumlichen Modellierung umweltrelevanter Parameter befassen (z. B. SCHREIBER 1996, BARDOSSY & LEHMANN 1998, LEXER et al. 1999, SCHAFMEISTER 1999, MUES 2000). Bodenkundliche Arbeiten zum Themenbereich der Regionalisierung stammen hauptsächlich aus dem landwirtschaftlichen Umfeld (z. B. LASLETT et al. 1987, MOORE et al. 1993, BELL & v.KEULEN 1995, BOURENNANE et al. 1996, SCHEINOST et al. 1997, SZIBALSKI 2000, UTSET et al. 2000, TRIANTAFILIS et al. 2001). Gegenüber Landschaften mit landwirtschaftlicher Nutzung sind bei Waldlandschaften geomorphologische und ökologisch-strukturelle Einflussfaktoren auf Parameter des ökochemischen Bodenzustandes i. d. R. deutlich komplexer strukturiert. Landschaften mit extremen topographischen Verhältnisse bleiben häufig der Waldnutzung vorbehalten. Hier führen nicht nur unterschiedliche Standortverhältnisse, sondern auch Auswirkungen von Bestandeseingriffen, Unterschiede beim Bestandesalter und der Baumartenzusammensetzung sowie Effekte der Kronendachheterogenität dazu, dass bodenchemische Parameter in raum-zeitlicher Sicht hochvariabel auftreten (MANDERSCHIED & MATZNER 1995, SCHMIDT 1997, ZIRLEWAGEN & v. WILPERT 2001a).

## 1.2 ARBEITSHYPOTHESEN UND ZIELE

Anhand einer regionalen Bodeninventur sollten Modelle für die räumliche Verteilung bodenchemischer Eigenschaften auf Waldstandorten des Südschwarzwaldes auf mittlerer Maßstabsebene erstellt werden. Neben dem methodischen Aspekt, eine Regionalisierungsmethode für topographisch stark gegliederte Waldstandorte zu entwickeln, stand die wirkungsbezogene Landschaftsanalyse im Vordergrund. Auf der Basis statistisch abgesicherter räumlicher Muster bodenchemischer Kenngrößen sollte die relative Bedeutung einzelner ökologischer Prozesse in der Landschaft abgeschätzt, mithin das Modellverständnis für Versauerungsdynamiken und -prozesse im Untersuchungsgebiet verbessert werden. Hierbei interessierten u. a. von bestandesstrukturellen Effekten (Baumart) und geomorphologischen Strukturen abhängige Verteilungsmuster bodenchemischer Eigenschaften. Folgende Arbeitshypothesen wurden zugrunde gelegt:

1. Bei gleichem Ausgangssubstrat und gleichen Bestandesverhältnissen beeinflusst ein ausgeprägtes topographisches Relief die räumliche Verteilung bodenchemischer Eigenschaften.
2. Die Ursachen reliefbedingter Variabilität sind auf Abtrags- und Akkumulationsvorgänge, Deposition und/oder Klima zurückzuführen und hängen von der Landschaftsform, dem Ausgangsgestein, der Vegetations- bzw. Bewirtschaftungsform ab.
3. Bei der Bodenversauerung wirken sich topographische Effekte in Regionen, deren Ausgangsgesteine höhere Neutralkationenreserven aufweisen, intensiver aus als in schon (depositionsbedingt?) großflächig nivellierten Waldlandschaften.
4. Unterschiedliche Faktorenkombinationen bewirken unterschiedliche Versauerungsstadien, die als unechte Zeitreihen die Versauerungsdynamik in der Landschaft widerspiegeln.

Im Prinzip steht hinter diesen Hypothesen eine analoge Anwendung des Bodencatena-Konzeptes. Hier wie dort werden bei ähnlichem Ausgangsgestein und Klima Unterschiede in der Bodenentwicklung auf Wirkungen des Reliefs und Effekte von Stoffumlagerungen in der Landschaft zurückgeführt (MILNE 1936, JENNY 1961, JENNY 1980, HUDSON 1992).

Mit Hilfe der zu entwickelnden Regionalisierungsfunktionen sollte es so möglich sein, von bestimmten Rahmenbedingungen abhängige Szenarien, wie die Auswirkungen alternativer Baumartenwahl oder Kalkungseffekte (z. B. auf die Einbindung von Kohlenstoff im Boden) zu berechnen, in begrenztem Umfang also potentielle Konsequenzen und Risiken natürlicher und anthropogen induzierter Einflüsse in der Landschaft zu modellieren (WENKEL & SCHULZ 1999, STRICH 2002) und damit ein statistisch und sachlogisch begründetes bodenökologisches "Landschaftsbewertungsverfahren auf regionaler Ebene" zu entwickeln (VOLK & STEINHARDT 1999).

Da bei der Ökosystemmodellierung im allgemeinen bzw. der Regionalisierung im besonderen das Risiko falsch parametrisierter Prozesse überproportional mit der Anzahl der

Variablen ansteigt, sich also ab einem gewissen Grad der Modellkomplexität Präzision und Signifikanz ausschließen (ZADEH 1983, HAUHS 1991), war es nicht Ziel dieser Arbeit, nach skaleninvarianten, allgemeingültigen Regionalisierungsmodellen zu suchen. Vor dem Hintergrund der zahlreichen, auf unterschiedlicher Skalenebene tendenziell wirksamen Einflussfaktoren auf die räumliche Verteilung bodenchemischer Parameter in Waldlandschaften wurde vielmehr die Notwendigkeit gesehen, Abstraktionen und Vereinfachungen definieren zu müssen, um überhaupt zu relevanten Aussagen hinsichtlich der Ausgangshypothesen gelangen zu können (WENKEL & SCHULZ 1999).

## Zusammenfassung

Zur Regionalisierung bodenchemischer Daten im Gebiet Todtnau/Todtmoos wurden empirische multiple Regressionsmodelle auf Grundlage eines digitalen Reliefgliederungsverfahrens entwickelt. In den topographisch stark gegliederten Waldgebieten ließen sich unter standardisierten Modellannahmen und Probenahmeverfahren mit Hilfe weniger, quasi kontinuierlich in der Landschaft verfügbarer Prädiktoren, brauchbare, statistisch signifikante räumliche Schätzungen für pH, Basensättigung, C-, N-Gehalte und -Vorräte auf mittlerer Maßstabebene erstellen. Die Anpassungsgüten lagen bei den einzelnen Parametern bei rund 40 - 70 %, im Mittel bei 60 %. Es wurden Modelle für Fichtenrein- und Buchenmischbestände auf dunklem Paragneis, hellem Gneis/Granit sowie Höhenlehmen erstellt. Bestimmtheitsmaße von unter 40 % bei der Modellierung der Basensättigung ließen sich mit dem nivellierenden Einfluss einer weit fortgeschrittenen Bodenversauerung in Unterböden basenarmer Ausgangssubstrate (Granite und helle Gneise) in Verbindung bringen.

Bei der Regionalisierung stand die wirkungsbezogene Landschaftsanalyse im Vordergrund. Für unterschiedliche bodenchemische Parameter und Modellvarianten (Substrat- und Bestockungstypen) ergaben sich jeweils eigene Facetten an "optimalen" Regressorenkombinationen zur Erklärung der räumlichen Variabilität der Messwerte. Unterschiede im Erklärungspotential und der Zusammensetzung an Prädiktoren in den einzelnen Regressionsmodellen ließen sich hypothesenkonform auf Unterschiede im Ausgangsgestein und in der Bestandeszusammensetzung, auf Modifikationen des Standortklimas und Unterschiede im Akkumulations- bzw. Austragsverhalten für Nährstoffe an den jeweiligen Standorten zurückführen. Bei der Basensättigung stellt die relative Hangsituation, in den Modellen durch eine metrische Hangindex-Variable ausgedrückt, das höchste Erklärungspotential für die gemessene räumliche Varianz im Modellgebiet Südschwarzwald bereit. Andere wichtige topographische Parameter stellen u. a. die Geländehöhe sowie Reliefattribute dar, welche die Vertikalkrümmung des Hanges mit einbeziehen. Nur Kalkungsmaßnahmen, die maximal 7 Jahre zurückliegen, zeigen einen modellrelevanten Einfluss auf pH und Basensättigung in der Region Südschwarzwald. Unter Buche sind diese Kalkungseffekte bis maximal 30 cm Tiefe bei Höhenlehmen wie basenarmen Graniten und Gneisen signifikant, bei Fichte nur bei Höhenlehmen.

Die Modellergebnisse vermitteln ein plausibles und eindruckliches Bild vom räumlich heterogenen Fortschritt der Bodenversauerung. Das Ergebnis dieser Berechnungen zeigt das von bestandesstrukturellen (Baumart) und geomorphologischen Effekten und Meliorationsmaßnahmen abhängige Verteilungsmuster bodenchemischer Parameter. Mit der Regionalisierung bodenchemischer Daten in einer morphologisch bewegten und damit

heterogenen Mittelgebirgslandschaft ist es erstmals gelungen, eine statistisch begründete Basis für eine Bewertung verschiedener Auswirkungen der Art der Waldwirtschaft im Landschaftsmaßstab vorzulegen. Dabei können waldbauliche Szenarien oder technische Szenarien wie z. B. Bodenschutzkalkungen auf stärker versauerten Standorten in ihrer Wirkung auf den bodenchemischen Zustand von Waldböden berechnet werden. Der im Südschwarzwald mit einem stratifizierten Probenahmeschema entwickelte Modellansatz wurde entgegen den Ausgangsvorstellungen erfolgreich auch auf dem regelmäßigen Inventurraster der Betriebsinventur von Baden-Baden angewandt. Damit steht eine einfache und praxistaugliche Methode zur Verfügung, in den wichtigen Naturräumen Baden-Württembergs die bodenchemische Situation auf mittlerer Maßstabsebene prognostizieren und in Abhängigkeit von waldbaulichen und technischen Szenarien bodenökologische Auswirkungen bewerten zu können.

## Abstract

In the project region "Southern Black Forest", 150 soil profiles were investigated using a simplified method according to the guidelines of the German soil monitoring (BZE). A stratified sampling approach was implemented in the test area, the municipal districts of Todtnau and Todtnoos. Analytical soil parameters were compared with topographic site attributes using multiple linear regression analyses. The geometric parameters describing the topography were extracted from a digital elevation model. Despite the highly differentiated topography of the test area, the received models provide plausible and significant predictions of the soil chemical attributes (base saturation, pH, C-/N-contents and -stocks), both under mixed beech-fir-spruce stands and single-species spruce stands. In most models, the coefficient of determination  $R^2$  varied between 40 % and 70 % (60 % average). The cause for  $R^2$  lower than 40 %, could be expected from the leveling effect of soil acidification in the deeper soil horizons of sites with low "base content" in the bedrock. The purpose of this investigation was not only to regionalize soil chemical data in complex geomorphologic situations, but also to better understand important key processes of soil development and soil acidification in these forested landscapes. Modeling soil chemical data stratified according to parent material resulted in specific facets of "best" combinations of explanatory variables in the regression analyses. The results show that a differentiation of soil acidification is still existing in the project region, despite the leveling effect of acid deposition. According to the hypothesis of this study, differences in partial  $R^2$  and composition of independent variables can be related to bedrock and forest stand composition, climatic factors, and mesoscale soil moisture regime. Slope position, which was integrated into the regression models as a morphometric index variable, showed the closest relation to the spatial distribution of base saturation. Other important topographic parameters were elevation as well as relief attributes including effects of profile curvature of slopes in the regression models. Apart from the variables related to landscape morphology and stand structure, only liming in prophylactic and rehabilitative forest management appeared to effect the model results if the practice was not older than 7 years. The regionalization method developed in the Southern Black Forest with a stratified approach could also be incorporated into the regular sampling scheme of the local forest inventory in the district of Baden-Baden (Northern Black Forest). Therefore, a straightforward and practical method is now available to regionalize soil chemical data in dependence of technical aspects (e.g. liming) and forest development (stand composition, age) in the most important nature regions of Baden-Württemberg.