

Regionalisierung der bodenchemischen Drift in der Dübener Heide im Zeitraum 1995–2006

Upscaling of the soil-chemical drift in the Dübener Heide for period 1995 to 2006

Dietmar Zirlewagen

Abstract

Data about the soil-chemical status are an essential basis for the ecological assessment of forest management practices. The Dübener Heide is a region with a history of strong changes of environmental factors, including the soil-chemical status. Thus, there is a strong need for maps with landscape-related information about the recent ecological drift. The statistical methods used in this work for analyzing and upscaling the soil-chemical drift for period 1995 to 2006 included ordinary least square regression and validation techniques. Exemplarily for other parameters results for pH-H₂O and base saturation are shown. The regionalized soil-chemical data showed an extreme change of the soil-chemical status for the time horizon analyzed. Multiple linear regression models were able to explain 71–92% of the total variance of the measurements.

Keywords: Upscaling, regionalization, soil chemistry, base saturation

Zusammenfassung

Daten zum bodenchemischen Zustand bilden eine wesentlich Grundlage für eine ökologische Bewertung von Waldbewirtschaftungsmaßnahmen. Die Dübener Heide ist eine Region, in der in der jüngeren Vergangenheit besonders drastische Veränderungen von Umweltfaktoren stattfanden. Dies gilt in besonderem Maße für den bodenchemischen Zustand. Hier besteht ein großer Bedarf an Karten, die im Landschaftskontext Informationen zur ökologischen Drift wiedergeben. Um die bodenchemische Drift des Zeitraums 1995 bis 2006 zu analysieren und räumlich zu modellieren (regionalisieren), wurden Regressions- und Validierungstechniken eingesetzt. Beispielfür andere Parameter werden Ergebnisse für pH-H₂O und Basensättigung vorgestellt. Die regionalisierten bodenchemischen Daten zeigten auf der untersuchten Zeitskala eine extreme Änderung des bodenchemischen Zustandes. 71–92 % der Messwertvarianz ließen sich mithilfe multipler Regressionsmodelle erklären.

Schlüsselwörter: Upscaling, Regionalisierung, Bodenchemie, Basensättigung

1. Einleitung

Upscaling-Techniken auf der Basis statistischer Methoden, sogenannte Regionalisierungen oder Punkt-zu-Flächen-Übertragungen, erlauben die Einschätzung von Umwelteffekten forstlicher Bewirtschaftungsstrategien in Form landschaftsbezogener Szenarien (ZIRLEWAGEN & VON WILPERT 2004). Während sich seit Längerem zahlreiche Studien für landwirtschaftliche Nutzungsflächen finden, die sich mit der räumlichen Modellierung von Bodeneigenschaften beschäftigen (z. B. LASLETT et al. 1987, BELL & V.KEULEN 1995, BOURENANE et al. 1996, SZIBALSKI 2000, UTSET et al. 2000, TRIANTAFILIS et al. 2001, MUELLER & PIERCE 2003), fehlten noch bis zur Jahrtausendwende entsprechende Untersuchungen für Daten des forstlichen Umweltmonitorings fast völlig. Inzwischen liegen Ergebnisse zahlreicher Regionalisierungsprojekte forstlich genutzter Flächen vor (SABOROWSKI & JANSEN 2002, ZIRLEWAGEN 2003, ZIRLEWAGEN & VON WILPERT 2004, BARITZ et al. 2005, MELLERT et al. 2005, ZIRLEWAGEN et al. 2007). Sie erlauben, von einem insgesamt ausgereiften Methodenkonzept für die Regionalisierung von Parametern des forstlichen Umweltmonitorings auf unterschiedlichen Mess- und Modellskalen mithilfe statistischer Methoden sprechen zu können. In der Modellregion „Dübener Heide“ (Sachsen/Sachsen-Anhalt) konnte aufgrund der veränderten politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen verstärkt nach 1989 eine deutliche Abnahme der Immissionen und Reduktion basischer Einträge verzeichnet werden (NIEHUS 1996). Mit der Dynamik der Entwicklung Flugasche beeinflusster Böden entlang von Depositionsgradienten haben sich KOCH et al. (2002 a, b) und KLOSE & MAKESCHIN (2004) auseinandergesetzt. Eine modellhafte Erfassung und Bewertung der Veränderungen in der Industrieregion Bitterfeld auf der Fläche (Regionalisierung) fehlten aber bislang. Ein Problem bisheriger Modelle im forstlichen Umweltmonitoring ist, dass räumliche und zeitliche Aspekte meist getrennt modelliert werden. Sollen Veränderungen der Standortparameter mit Auswirkung auf die landschaftsbezogene Variation von Bodeneigenschaften modelliert werden, ist es unerlässlich, räumliche und zeitliche Eigenschaften zu verbinden. Ausschließlich räumliche Modelle versagen dann, wenn die Messwerte an den Raumpunkten Zeittrends unterworfen sind, die deren Relation zueinander auf der Zeitachse dynamisch verändern (ABRAHAM & RODDICK 1999). Vor dem Hintergrund der sich

rasch ändernden Umweltfaktoren in der Modellregion Dübener Heide sollten daher die vorhandenen statischen Konzepte zur Regionalisierung bodenchemischer Parameter um eine zeitlich-dynamische Dimension erweitert werden, um die bodenchemische Drift in dieser Region auf der Fläche erfassen und bewerten zu können. Dabei musste in Kauf genommen werden, dass nur für zwei Zeitpunkte (1995, 2006) genügend räumliche Daten zur Ableitung der bodenchemischen Zustandsänderung auf der Raum- und Zeitskala vorhanden waren. Zu den längerfristigen Einflüssen der Flugasche auf bodenchemische Eigenschaften sei auf Prozessstudien von KOCH et al. (2002 a, b), KLOSE & MAKESCHIN (2004) und FRITZ & MAKESCHIN. (2007) verwiesen.

2. Daten und Methoden

Bodenchemische Daten

Regionalisierungen wurden in dieser Arbeit auf der Basis der Daten der BZE I und der auf den Versuchsflächen des Projektverbundes ENFORCHANGE (2007) erhobenen Daten durchgeführt.

In den Jahren 1992–1997 wurde in Sachsen und Sachsen-Anhalt eine Bodenzustandserhebung im Wald (BZE I) durchgeführt (RABEN et al. 2000). Als Referenzjahr der BZE I im Gebiet der Dübener Heide wird in dieser Arbeit das Jahr 1995 angenommen. Die bei der BZE I angewandten Methoden der Geländeaufnahme und chemischen Analyse erfolgten streng nach der in den 80er Jahren von den Mitgliedern der Bund-/Länder-Arbeitsgruppe „BZE“ ausgearbeiteten Arbeitsanleitung (BML 1990), wodurch eine überregional vergleichbare und hochwertige Datenbasis erreicht werden sollte (RABEN et al. 2000). Im Rahmen des Projektverbundes ENFORCHANGE (2007) sind im Jahr 2006 in der Dübener Heide Bodenprofile an zwölf repräsentativ ausgewählten Versuchsflächen (Kriterien: Substrat, Bestockung, Immissionsgradient; FRITZ & MAKESCHIN 2007) bodenchemisch untersucht worden. Die Probenahme erfolgte tiefenstufenweise nach Arbeitsanleitung der BZE II (BMELV 2006), die bodenchemi-

sche Analyse nach den Vorgaben des Handbuchs Forstliche Analytik (BMELV 2005)

Auswahl des Datenkollektivs

Im Zuge der explorativen Datenanalyse wurden zunächst Korrelationsanalysen für den Gesamt-Datenbestand der BZE I der Dübener Heide erstellt (Kern- und Außenbereich = grüne und blaue Inventurpunkte in Abb. 1). So konnte eine relativ umfangreiche Datenbasis für statistische Analysen einbezogen werden. Ziel dieser Arbeit war aber, speziell Veränderungstendenzen im Kerngebiet der Dübener aufzuzeigen, und wenn möglich auch zu regionalisieren. Hierzu war es nötig, mit einer eingegrenzten Stichprobenauswahl (blaue Inventurpunkte in Abb. 1) aus dem engeren Umfeld der Enforchange-Kernflächen der Dübener Heide (rote Rechtecke in Abb. 1) zu arbeiten. Ein univariater Vergleich von bodenchemischen Zustandsgrößen der BZE I, geplottet gegen den (logarithmierten) Abstand der BZE-Inventurpunkte von den nordwestlich gelegenen Hauptemittenten in Zschornowitz und Bitterfeld, zeigte wesentlich straffere lineare Zusammenhänge für das Kerngebiet als für das erweiterte Gebiet der Dübener Heide (Abb. 2). Dies spiegelt die Bodenbelastung durch Luftschadstoffe in der Vergangenheit im Industrievier Halle-Leipzig-Bitterfeld wider, die bis in einer Entfernung von mindestens 25 km leewärts von Bitterfeld im Kerngebiet der Dübener Heide besonders hoch ausfällt (vgl. BARONIUS 1992, KOCH et al. 2002 b). Aus sachwissenschaftlichen Erwägungen macht es also Sinn, das BZE I Datenkollektiv auf den engeren Bereich der Dübener Heide zu begrenzen. Problematisch ist dabei der geringe Stichprobenumfang von 17 Beobachtungen, der zu gering zur Erstellung aussagekräftiger multipler Regressionsmodelle sein kann. Im Untersuchungsgebiet der Dübener Heide erwies er sich aber als noch vertretbar, d. h. ausreichend hoch, da in diesem Gebiet im Vergleich zu anderen Regionalisierungsstudien außergewöhnlich starke (hinsichtlich partiellem R^2 und Signifikanz) und klar interpretierbare Kovariablen (hinsichtlich möglicher Kausalität) gefunden werden konnten (siehe Kap. Ergebnisse).

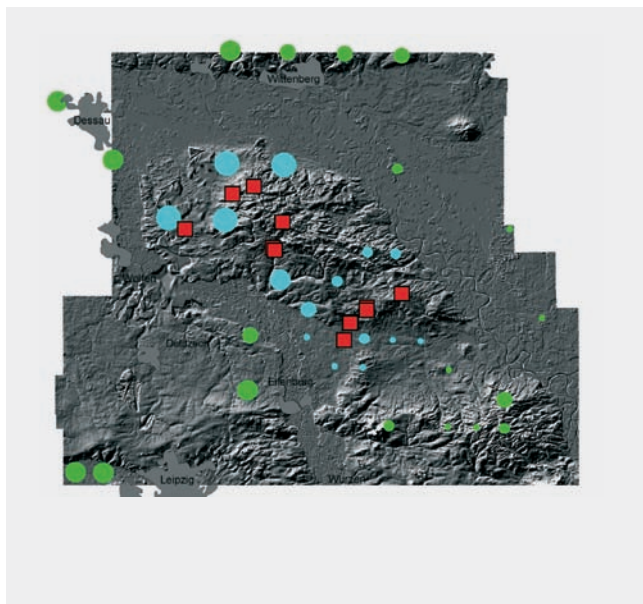
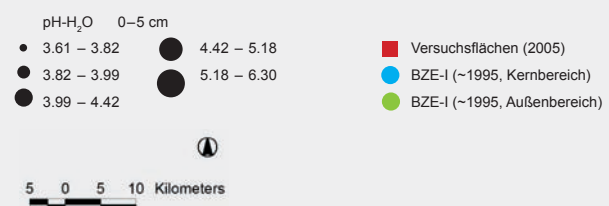
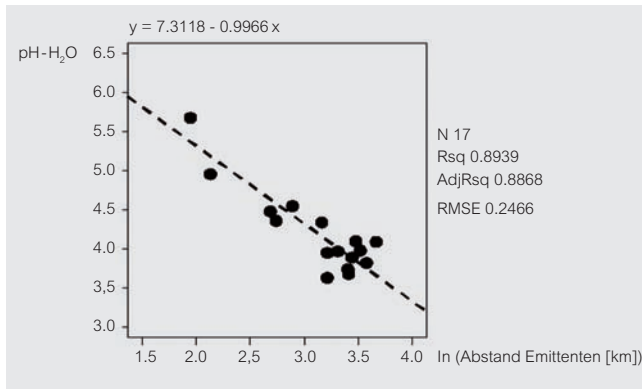


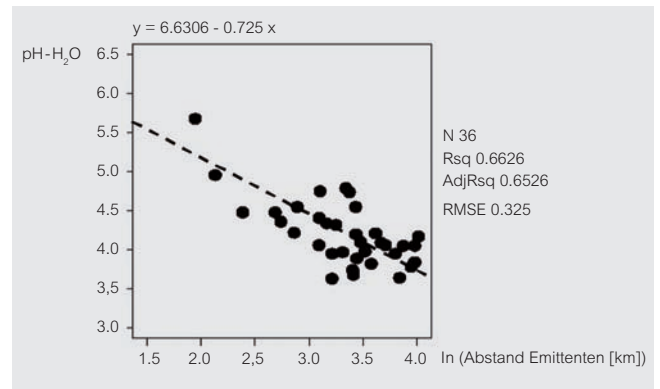
Abb. 1: Lage der Stichprobenpunkte in der Dübener Heide; rot: Beprobung in den ENFORCHANGE-Kernversuchsflächen im Jahr 2006; cyanblau: BZE I-Flächen (1995) im engeren Kern der Dübener Heide; grün: BZE I-Flächen (1995) im Außenbereich der Dübener Heide.

Fig. 1: Location of the test plots in the region Dübener Heide; red: soil samplings from the experimental plots of the ENFORCHANGE study in 2006; cyan blue: ICP Forest Level I-plots (BZE 1995) within the central area of the Dübener Heide; green: ICP Forest Level I-plots (BZE 1995) on the periphery of the Dübener Heide.





Kerngebiet, 5–10 cm Tiefe



Alle Daten, 5–10 cm Tiefe

Abb. 2: pH-H₂O-Werte der BZE I in 5–10 cm Tiefe im Verhältnis zum logarithmierten Abstand der BZE-Inventurpunkte von den Hauptemittenten in Zschornowitz und Bitterfeld für das engere Kerngebiet (links) und den erweiterten Einzugsbereich der Dübener Heide (rechts); zur Flächenabgrenzung („Kerngebiet“ vs. „alle Daten“) s. Abb. 1.

Fig. 2: pH-H₂O (BZE I-values) at 5–10 cm depth plotted against the distance from main sources of industrial emissions in Zschornowitz and Bitterfeld; left: only data from the central area; right: all data, including data from the periphery of the region Dübener Heide (cf. Fig. 1).

Regionalisierungsverfahren

Zentraler Kern einer Regionalisierung ist die Entwicklung sachlogisch begründeter Übertragungsregeln (um vom Punkt zur Fläche gelangen zu können). Die Übertragung von Messdaten auf die Landschaft ist dann möglich, wenn es in der explorativen Datenanalyse gelingt, signifikante standörtliche Einflussfaktoren auf der Plotebene zu identifizieren und diese Einflussfaktoren auf der Landschaftsebene flächendeckend digital vorhanden sind. Zur Beurteilung der Validität dieser Übertragungsregeln ist der Einsatz geeigneter statistischer Verfahren unabdingbar. Diese statistischen Verfahren stellen im Regionalisierungsprozess aber auch die wesentliche Hilfsgröße dar, um reale empirische Daten in wissenschaftliche Aussagen (wie Theorien oder Hypothesen) zu überführen (vgl. ZIRLEWAGEN & VON WILPERT 2004).

Regionalisierung der bodenchemischen Drift (1995–2006)

Die Modellierung räumlicher und zeitlicher Einflüsse auf bodenchemische Eigenschaften erfolgte in dieser Arbeit getrennt. In einem ersten Arbeitsschritt wurde die räumliche Variabilität von pH und Basensättigung der BZE I-Daten analysiert und modelliert (statistische Analyse und Modellbildung auf der Raumskala, Referenzzeitraum ~1995) und Prognosekarten im GIS berechnet. Diese Karten wurden dann mit den 12 Enforchange-Versuchsflächen verschnitten und Korrelationen zwischen den modellierten BZE I-Daten des Jahres 1995 und den bodenchemischen Messwerten des Jahres 2006 berechnet. In der explorativen Datenanalyse wurden die Abweichungen zwischen beiden Datensätzen kausalanalytisch und quantitativ analysiert. Im letzten Auswertungsschritt wurden die bei dieser Residuenanalyse abgeleiteten Algorithmen zur Regionalisierung bodenchemischer Daten in der Dübener Heide für das Jahr 2006 verwendet. Durch Gegenüberstellung der Upscaling-Ergebnisse der Jahre 1995 und 2006 ließ sich die bodenchemische Drift im Modellgebiet regionalisieren und visualisieren.

Regionalisierung bodenchemischer Daten der BZE I

Zur Regionalisierung bodenchemischer Zustandsgrößen der BZE I in der Dübener Heide wurden multiple lineare Regressionsmodelle erstellt, die möglichst weitgehend die räumliche Variation der Zielgröße (Basensättigung, pH) aufklären sollten. Konventionelle Methoden der Geostatistik (Vario-grammanalyse) dienen i.d.R. nur noch der Prüfung der Unabhängigkeit und Zufallsverteilung der Residuen (ZIRLEWAGEN 2003, ZIRLEWAGEN et al. 2006). Ziel war hierbei, nur Prädiktoren zuzulassen, die in einem bodenkundlich sinnvollen Zusammenhang zu der Zielgröße stehen. (ZIRLEWAGEN & VON WILPERT 2004). Zahl und Art der bei der Modellerstellung verwendeten Prädiktoren wurden an die in der zitierten Literatur verwendeten angelehnt, wurden jedoch im Modellgebiet individuell bestimmt. Die Optimierung der Geländemodelle und die Modellgüte wurden für jedes Regionalisierungsmodell anhand der statistischen Kenngrößen Kollinearitätsindex, Toleranzindex, RMSE, R², partielles R² der ins Modell einbezogenen Prädiktoren sowie anhand der Entwicklung der statistischen Kenngrößen während der schrittweisen Anpassung des Modells dokumentiert. Ebenso wurden anhand einschlägiger statistischer Tests für die verwendeten Prädiktoren und die Zielgröße (Basensättigung, pH) die Voraussetzungen für die Bildung multipler linearer Regressionsmodelle geprüft und ggf. eine entsprechende Transformation der Daten durchgeführt. Die Güte der Regionalisierungsmodelle wurde durch eingehende Fehleranalyse überprüft. Dabei wurde auch die Autokorrelation berücksichtigt. Die Einhaltung der Voraussetzungen für die Anwendung von Regressionsanalysen wurde über grafische Auswertungen zu den Verteilungscharakteristika und Residuen sowohl für die Prädiktoren als auch das Gesamtmodell geprüft und dokumentiert.

Bodenchemische Parameter weisen häufig nichtsymmetrische, schiefe Verteilungen auf. In den verschiedenen in dieser Studie angepassten Modellen konnten durch Log-Transformierungen schiefe Verteilungen reduziert und eine an die Normalverteilung besser angepasste Verteilung erzielt werden. Zur Überprüfung wurden deskriptive Statistiken, PP-, QQ- und Boxplots verwendet. Multikollinearität wurde mit der Korrelationsmatrix, den Toleranzwerten der Regressoren sowie dem Konditionsindex überprüft. Zur Vermeidung der Überparametrisierung wurde die Anzahl Regressoren in allen Modellen begrenzt. Hierzu diente auch der schrittweise Aufbau der multiplen Regressionsmodelle im sogenannten STEPWISE-Verfahren (= schrittweiser Aufbau der Regression mit Kovariablen, Prozedur REG; SAS INSTITUTE 1999). Die Gültigkeit von Linearität und Varianzgleichheit wurde durch Residuenanalyse überprüft. Diese half zudem, Ausreißer auszumachen, die zu verzerrten Regressionsmodellen führen können. Verfahren der konventionellen Statistik und Variogrammanalysen wurden mit dem Programmpaket SAS/STAT durchgeführt (SAS INSTITUTE 1990, Release 9.1.3).

Die mit SAS berechneten Regressionskoeffizienten wurden halb automatisch in ArcView-GIS 3.3 eingelesen und zur Berechnung der Prognosekarten mit Avenue-Skripten verwendet. Alle Prognosekarten wurden in Form von ArcView-Grids erzeugt. Dadurch, dass alle wesentlichen Schritte der Modellerstellung skriptgesteuert erfolgten, konnten alternative Modelle zur Plausibilitätskontrolle zeitnah im GIS getestet bzw. auch im Nachhinein leicht überprüft werden. Die Berechnung der Prognosekarten erfolgte im 20 m-Raster, der räumlichen Auflösung des zur Verfügung stehenden digitalen Geländemodells.

3. Ergebnisse und Diskussion

Regionalisierung auf Grundlage der BZE I (~1995)

Zur Beschreibung und Modellierung der räumlichen Heterogenität von Basensättigung und pH-Wert in der Dübener Heide (BZE I-Daten) wurden multiple lineare Regressionsanalysen im Stepwise-Auswahlverfahren berechnet. Als potenzielle Regressorvariablen wurden modellierte Depositionsdaten der 90er Jahre nach GAUGER et al. (2002), Ab-

standswerte zu den Hauptemittenten, Eigenschaften des Bodens (Substrat, Vernässung etc.) und des Waldbestandes (Bestandesalter, Baumart), Niederschlagsverteilungsmuster und zahlreiche digitale Reliefeigenschaften getestet. Im Kernbereich der Dübener Heide wies der logarithmierte Abstand zu den Hauptemittenten den mit Abstand höchsten Erklärungswert für die räumliche Verteilung von Basensättigung und pH auf. Mithilfe dieser Daten ließen sich 69% – 88% der räumlichen Variabilität der Basensättigung bis 60 cm Tiefe und 67% – 81% für pH-H₂O bis 90 cm Tiefe erklären (univariates, lognormales lineares Modell). Im multiplen linearen Regressionsmodell ließen sich mit meist nur 2–3 Hilfsvariablen deutlich über 70%, meist über 80% bis 94% der Messwertvarianz von pH-H₂O (mittleres R² = 0.84) und Basensättigung (mittleres R² = 0.89) erklären (Tab. 1 u. 2). Im Vergleich zu Modellen, die an den erweiterten Datensatz der Dübener Heide (Kernbereich + Randbereich, s. Abb. 1) angepasst worden waren, lag das Bestimmtheitsmaß der multiplen Regressionsmodelle um 12 bis 15% höher (vgl. ZIRLEWAGEN 2007). Abgesehen vom (logarithmierten) Abstand zu den Hauptemittenten wurden als Regressorvariablen Niederschlagsverteilungsmuster, Hangpositionsindizes und topografische Indizes verwendet (Stream-Power-Index und Slope-Length-Factor). Letztere codieren Vernässungscharakteristika und Nährstoffakkumulationslagen in den Regionalisierungsmodellen. Sie sind aus dem digitalen Geländemodell abgeleitet worden.

Die Karten der regionalisierten Boden-pH-Werte und Basensättigungen in der Dübener Heide zeigen ein konsistentes räumliches Muster, das die besondere Bodenbelastung durch Luftschadstoffe in der Vergangenheit im Industrieviertel Halle-Leipzig-Bitterfeld widerspiegelt (Abb. 3). Flächen stark erhöhter Basensättigungen und pH-Werte, in dieser Arbeit durch Regionalisierung von BZE I-Daten Mitte der 1990er Jahre berechnet, entsprechen den Schätzungen zur Flugweite der emittierten Stäube, die von einer Entfernung von mindestens 25 km leewärts von Bitterfeld ausgehen (BARONIUS 1992). Repräsentative Untersuchungen zur Dynamik des Boden-pH, an einem Immissionsgradienten bis in 25 km Entfernung östlich von Bitterfeld erhoben, zeigten eine vergleichbare, deutliche Differenzierung bodenchemischer Eigenschaften in Abhängigkeit von der Entfernung vom Hauptemittenten (KOCH et al. 2002).

Tab. 1: Statistische Kennziffern für die Regionalisierung des pH-H₂O im Kerngebiet der Dübener Heide. P Anzahl Parameter (inkl. Interzept), FG Fehler-Freiheitsgrade, adj.R² korrigiertes Bestimmtheitsmaß, RMSE Standardschätzfehler.

Table 1: Goodness-of-fit using upscaling models for estimation of pH-H₂O in the central area of the region Dübener Heide. P number of parameters (regressors + intercept); FG error degrees of freedom; adj.R² adjusted coefficient of determination, RMSE root mean square error.

Tiefenstufe	P	FG	R ²	adj.R ²	RMSE	STD
Humusauflage	4	12	0,92	0,90	0,28	0,90
0-5 cm	4	13	0,94	0,92	0,25	0,91
5-10 cm	4	13	0,87	0,85	0,29	0,73
10-30 cm	4	13	0,84	0,81	0,30	0,67
30-60 cm	3	13	0,75	0,71	0,18	0,33
60-90 cm	2	13	0,74	0,72	0,20	0,38

Tab. 2: Statistische Kennziffern für die Regionalisierung der Basensättigung im Kerngebiet der Dübener Heide. P Anzahl Parameter (inkl. Interzept), FG Fehler-Freiheitsgrade, adj.R² korrigiertes Bestimmtheitsmaß, RMSE Standardschätzfehler.

Table 2: Goodness-of-fit using upscaling models for estimation of base saturation in the central area of the region Dübener Heide. P number of parameters (regressors+intercept); FG error degrees of freedom; adj.R² adjusted coefficient of determination, RMSE root mean square error.

Tiefenstufe	P	FG	R ²	adj.R ²	RMSE	STD
0–5 cm	4	13	0,90	0,87	0,25	0,70
5–10 cm	4	13	0,93	0,92	0,21	0,72
10–30 cm	3	14	0,92	0,91	0,22	0,73
30–60 cm	4	13	0,88	0,85	0,25	0,64
60–90 cm	5	11	0,90	0,87	0,22	0,60

Tab. 3: Standardisierte Schätzwerte für die Regionalisierung der Basensättigung in den 5 BZE-Tiefenstufen im Kerngebiet der Dübener Heide. TPI = Positionsindex, der Nachbarschaftsbeziehungen im 500 m Umkreis auswertet.

Table 3: Standardized estimates using upscaling models for estimation of base saturation in the central area of the region Dübener Heide.

Regressorvariable	Tiefenstufe				
	0–5	5–10	10–30	30–60	60–90
ln (Abstand Emittent [km])	-0,93	-0,96	-0,96	-0,59	-0,34
Hangpositionsindex	-0,25	-0,20	-0,21	-0,27	-0,17
DGM, Niederschlagsverteilung	-0,21	-0,15			
Slope Length Factor SLF					0,21
Topographic Position Index TPI				-0,47	-0,63

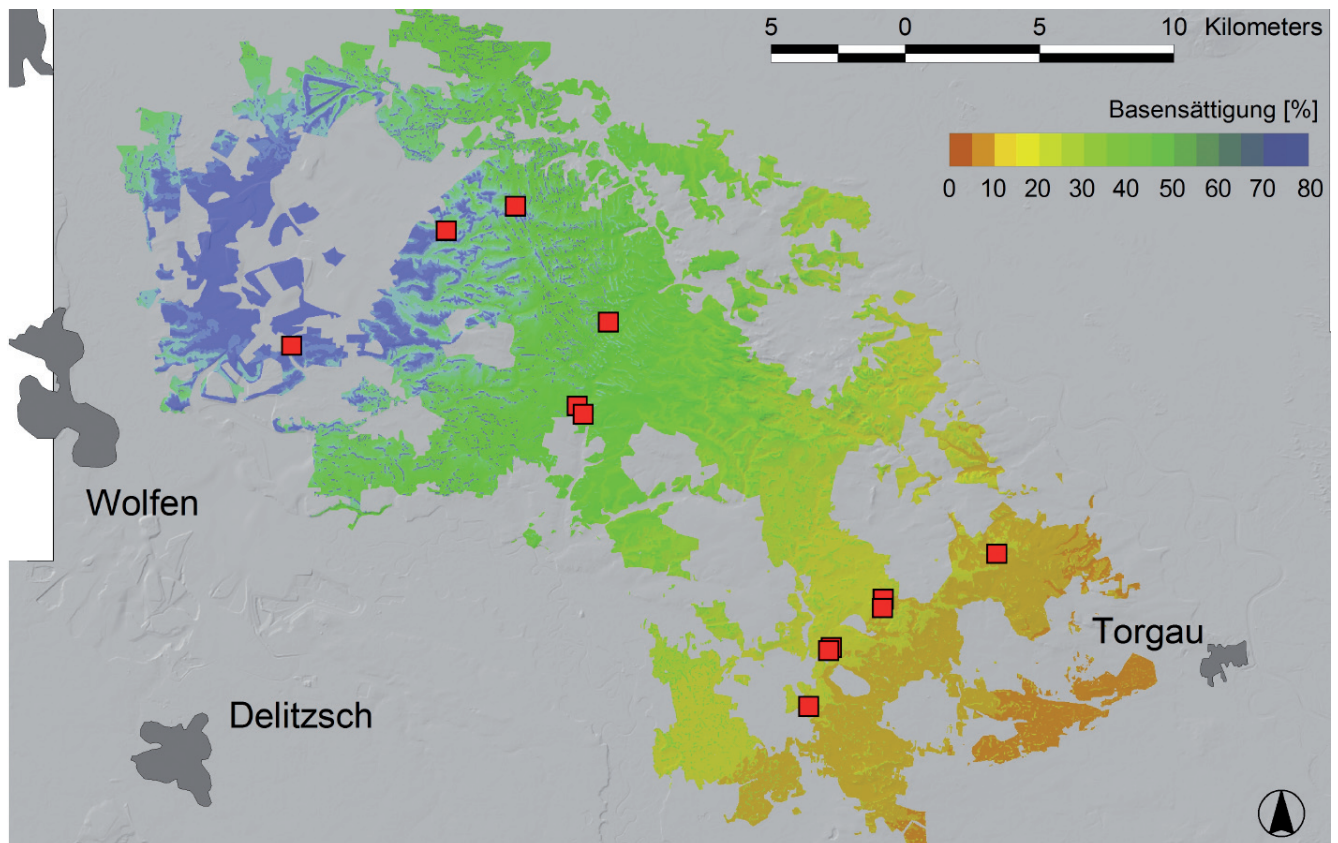


Abb. 3: Gesamtgebietsübersicht über die regionalisierte Basensättigung (Zeitbezug ~1995) im Gebiet der Dübener Heide in 10–30 cm Tiefe; rote Quadrate = Versuchsflächen.

Fig. 3: Base saturation in the Dübener Heide region spatially modelled (regionalized) at 10–30 cm depth and for the year 1995; red squares = experimental plots.

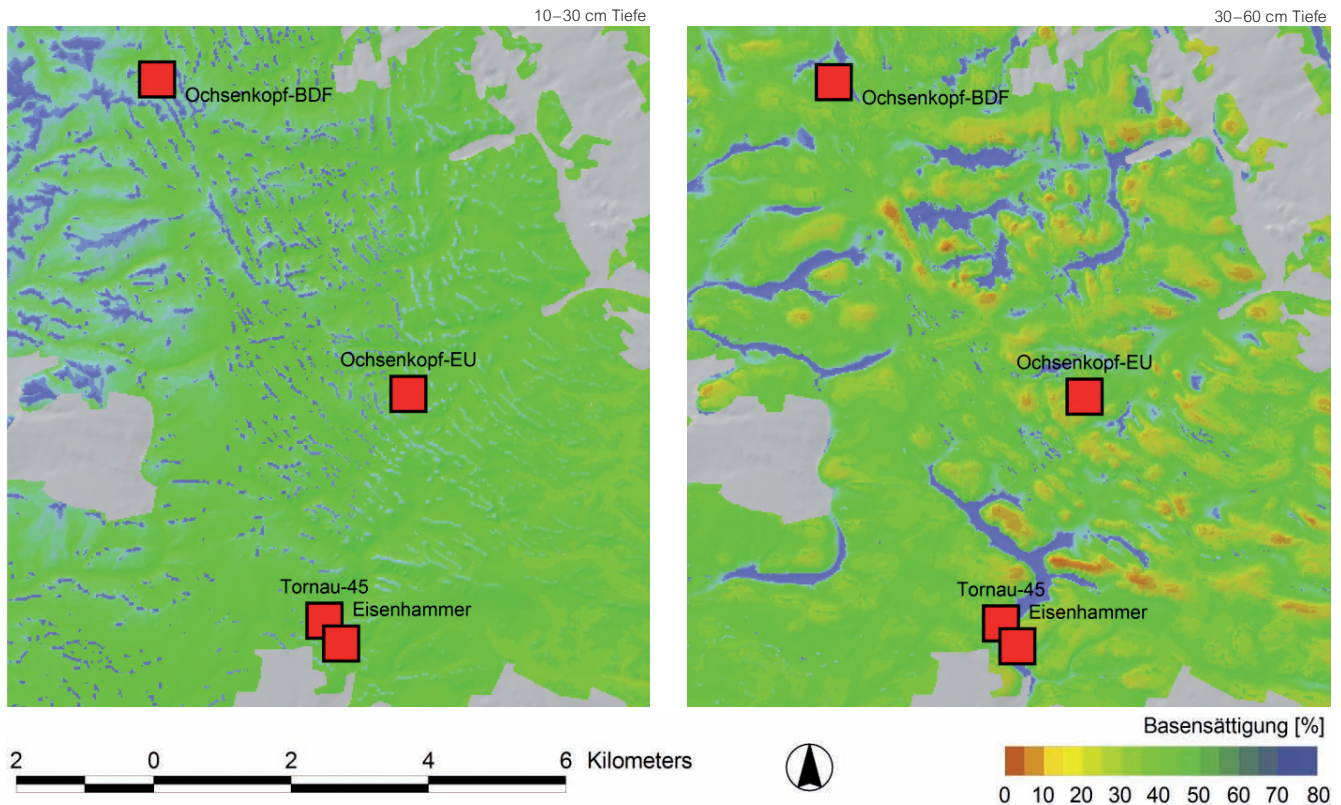


Abb. 4: Wie Abb. 3, aber andere Tiefenstufen und Gebietsausschnitt mit höherer räumlicher Auflösung zur Visualisierung topografischer Effekte der Regionalisierungsmodelle.

Fig. 4: Similar to Fig. 3, but with differing soil depths and higher spatial resolution for visualizing topographic effects of the regionalization models.

Die mathematische Grundlage der GIS-Karten in Abb. 3 und 4 wird in Tab. 3 wiedergegeben. Die standardisierten Regressionskoeffizienten in Tab. 3 geben die relativen Effektstärken der in den Regressionsgleichungen ausgewählten Regressorvariablen an. Die relative Effektstärke des Abstands zu den Hauptemittenten ist etwa um den Faktor 3 bis 6 größer als die der anderen Parameter, zumindest bis 30 cm Tiefe (standardisierte Koeffizienten $<-0,93$, Tab. 3). Für den unteren Mineralboden ab 30cm Tiefe gewinnen dagegen andere Regressorvariablen verstärkt an Bedeutung. Einen signifikant negativen Einfluss hat bis 10 cm Tiefe auch die Meereshöhe bzw. die Niederschlagsintensität (standardisierte Koeffizienten $-0,21, -0,15$).

Die großmaßstäblicheren Darstellungen der regionalisierten Karten zeigen, dass das Kleinrelief der Dübener Heide einen zusätzlichen, signifikanten Einfluss auf die räumliche Variabilität von Basensättigung und pH aufweist (Abb. 4). Diese kleinräumige Differenzierung wurde in den Regressionsmodellen durch Verwendung von Reliefeigenschaften erreicht, die auch das Abflussregime der Gewässer beinhalten. Es sind dies v. a. zwei topografische Lageindizes: ein relativer Hangpositionsindex und ein Topografischer Positionsindex TPI nach JENNESS (2006). Letzterer wertete in dieser Studie Nachbarschaftsbeziehungen im 500 m-Umkreis aus. Der Hangpositionsindex wurde bei allen Modelltiefen im schrittweisen Auswahlprozess der Regressionsanalysen ausgewählt (Tab. 3). Exponierte Standorte haben einen niedrigen, Muldenlagen einen hohen Index. Ein negativer standardisierter Regressionskoeffizient ($-0,17$ bis $-0,27$; Tab. 3) führt daher, bei gleichem Abstand zu den Hauptemittenten und sonst gleichem Depositionsregime (Niederschlagsverteilung), in

exponierten Lagen zu höheren Schätzwerten der Basensättigung als in Muldenlagen. Diese statistischen Zusammenhänge lassen sich auf unterschiedliche Immissionsverhältnisse in Abhängigkeit von der topografischen Exponiertheit zurückführen. Sie gelten aber nur für den Oberboden bis 30 cm Tiefe (Abb. 4, links). Unterhalb von 30 cm Tiefe kehrt sich das Bild um (Abb. 4, rechts). Im Unterboden weisen nun Akkumulationslagen bzw. zur Vernässung neigende Standorte eine höhere Aufbasung als exponiert gelegene Standorte auf. Dieses Verteilungsmuster ergibt sich durch die Verwendung des Topografischen Positionsindex TPI, der nun zusätzlich in den Modellen auftritt. Er weist eine hohe Effektstärke auf, in 60–90 cm Tiefe sogar die höchste – und ist um Faktor 2 größer als der Abstandswert zu den Emittenten (Tab. 3). Bei dieser Hilfsvariablen haben Muldenlagen, anders als beim Hangpositionsindex, einen niedrigen Index. Negative Regressionskoeffizienten ($-0,47$ und $-0,63$, Tab. 3) führen bei dieser Regressorvariable also tendenziell zu einer Erhöhung der Schätzwerte in Akkumulationslagen im Vergleich zu exponierten Lagen. Da die relative Effektstärke des TPI ab 30 cm Tiefe größer ist als die des Hangpositionsindex (Tab. 3), ergibt sich folgendes Bild der kleinräumigen Verteilung der Basensättigung (Abb. 4): Während bis 30 cm Tiefe generell Gebiete mit erhöhter Immissionseinwirkung (Abstandswirkung zu Emittenten/Einflüsse der topografischen Exponiertheit) signifikant höhere Basensättigungen aufweisen, lässt sich im unteren Mineralboden, insbesondere ab 60 cm Tiefe, die räumliche Variabilität des Versauerungszustandes vorrangig auf Parameter zurückführen, die mit Wirkungen des Reliefs und damit verbundenen Effekten von Stoffumlagerungen in der Landschaft zusammenhängen dürften.

Regionalisierung der bodenchemischen Drift

Im nächsten Auswertungsschritt wurden die digitalen Karten der hier vorgestellten Regionalisierungsmodelle (Zeitbezug ~1995) mit den Kernflächen des Projektverbundes in der Dübener Heide verschnitten (rote Quadrate in Abb. 1 u. 3–4) und mit den aktuellen bodenchemischen Zustandsdaten dieser Flächen (Aufnahmejahr 2006) verglichen. Abb. 5 zeigt als Ergebnis, dass innerhalb einer Dekade eine extreme Abnahme der Basensättigung im Untersuchungsgebiet zu verzeichnen ist. An allen 12 Stichprobenpunkten liegt die (gemessene) Basensättigung im Jahr 2006 meist deutlich unter den geschätzten (räumlich modellierten) BZE-Daten des Jahres 1995 (1:1-Linie in Abb. 5).

Möchte man eine Erklärung für die auffallenden Unterschiede zwischen Modelldaten 1995 und Messdaten 2006 finden, ist es hilfreich, die Residuen der beiden Datensätze (also die Abweichungen von der 1:1-Linie in Abb. 5) in einer Regressionsanalyse näher zu untersuchen. Trägt man die Veränderung der Basensättigung über dem Abstand zu den Hauptemittenten im Gebiet auf, zeigt sich ein hochsignifikanter linearer Trend (Abb. 6a). Besonders starke Abnahmen der Basensättigung von über 20% im Hauptwurzelraum sind v. a. in Gebieten bis 20 km Entfernung zu den Emittenten erfolgt. Dort war in der Vergangenheit auch die intensivste Immissionseinwirkung zu verzeichnen. Dass infolge des Wegfalls früherer Flugascheeinträge und anhaltender anthropogener Säureeinträge die Prozesse der Wiederversauerung in den Gebieten, die ehemals besonders intensiv durch Immissionen geprägt worden waren, nun auch besonders stark ablaufen, war zu erwarten. Überraschend sind die Intensität der Änderungsraten im letzten Jahrzehnt und die Straffheit der Zusammenhänge, die sich in der in Abb. 5 dargestellten Art quantifizieren lassen.

Die in Abb. 5 und 6 dargestellten Modellalgorithmen lassen sich in einem letzten Schritt zu einer Validierung der Regionalisierungsergebnisse zusammenfassen. „Bereinigt“ man die Abweichungen beider Datensätze (Abb. 5) um den linearen, (und wahrscheinlich) immissions- und zeitabhängigen Versauerungstrend (Abb. 6a), stimmen die beiden Datenquellen zu 95% überein (Abb. 6b: $R^2 = 0.95$) und liegen exakt auf der 1:1-Linie. Im Vergleich zum starken Effekt der Entfernung zu den Emittenten konnten andere Hilfsvariablen (z. B. Reliefattribute) als erklärende Variablen für die beobachtete bodenchemische Drift zwischen 1995 und 2006 vernachlässigt werden. Damit ließen sich die bodenchemischen Standortveränderungen im Oberboden der Dübener Heide zum überwiegenden Teil auf Prozesse zurückführen, die in Abhängigkeit zur Emittentenentfernung der ehemaligen Schwerindustrie in der Modellregion räumlich variieren. Die hier beispielhaft für 10–30 cm Tiefe dargestellten Zusammenhänge bestehen für alle BZE-Tiefenstufen bis 30 cm Tiefe. Sie schwächen sich erst ab 30 cm Tiefe zunehmend ab. Die starken immissionsgeprägten Umweltveränderungen in der Modellregion Dübener Heide spielen sich in „Reinform“ offensichtlich vorwiegend im Oberboden ab. Im Unterboden dürften andere Standortfaktoren (wie z. B. Vernässungseigenschaften der Böden) zunehmend an Einfluss für die räumliche und zeitliche Variabilität bodenchemischer Eigen-

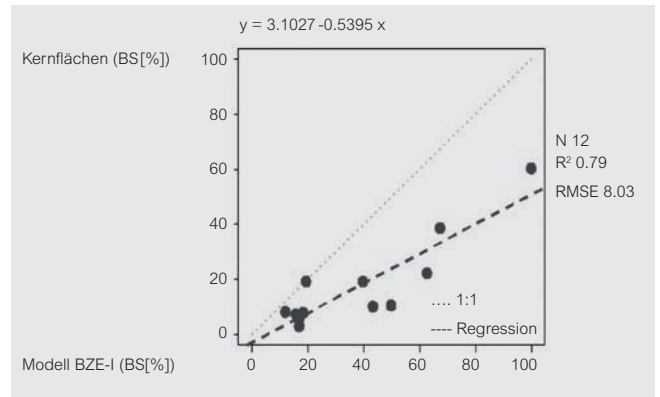


Abb. 5: Basensättigung in 10–30 cm Tiefe auf den Versuchsflächen des Projektverbundes Enforchange im Jahr 2006 im Vergleich zu BZE I-Daten von 1995 (Regressionsmodell); Abweichung von der 1:1-Linie = „Drift“ zwischen 1995 und 2006.

Fig. 5: Base saturation from samples of the ENFORCHANGE plots at 10–30 cm depth in 2006 in comparison with the BZE I-data in 1995 (regression model); deviations from the 1:1-line = “drift” between 1995 and 2006.

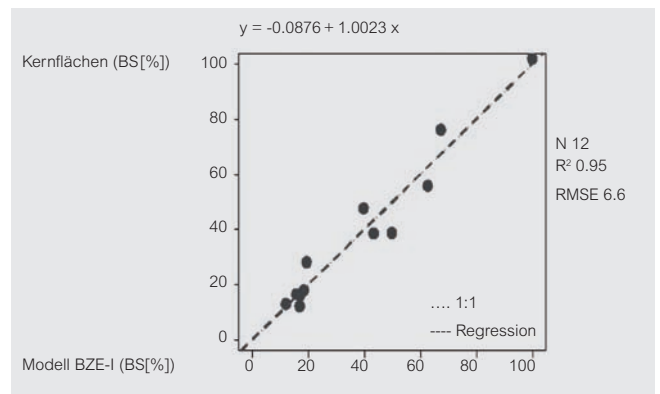
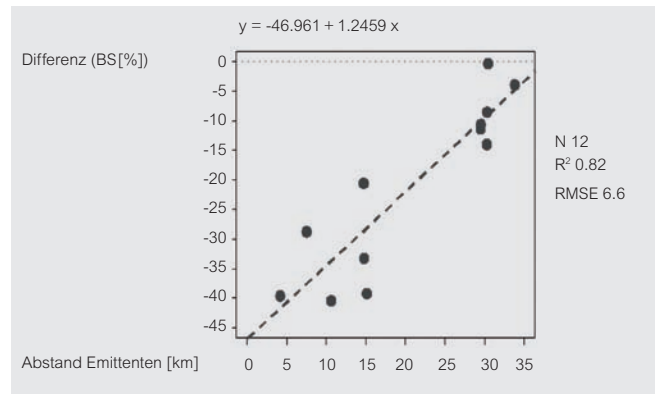


Abb. 6: Oben (Abb. 6a): Abweichungen der Basensättigung im Jahr 2006 von Werten des Jahres 1995 (= Abweichungen von der 1:1-Linie der Abb. 5), aufgetragen gegen den Abstand zu den Hauptemittenten. Unten (Abb. 6b): Validierung der Regionalisierungsergebnisse: Korrektur der Regressionsbeziehung von Abb. 5 mit der in Abb. 6a dargestellten Regression; Erläuterung s. Text.

Fig. 6: Above (Fig. 6a): Deviation of base saturation values in 2006 from those of 1995 (=deviations from the 1:1-line in Fig. 5), plotted against the distance from main sources of industrial emissions. Below (Fig. 6a): Validation of the regionalization results: correction of the regression of Fig. 5 using the regression of Figure 6a.

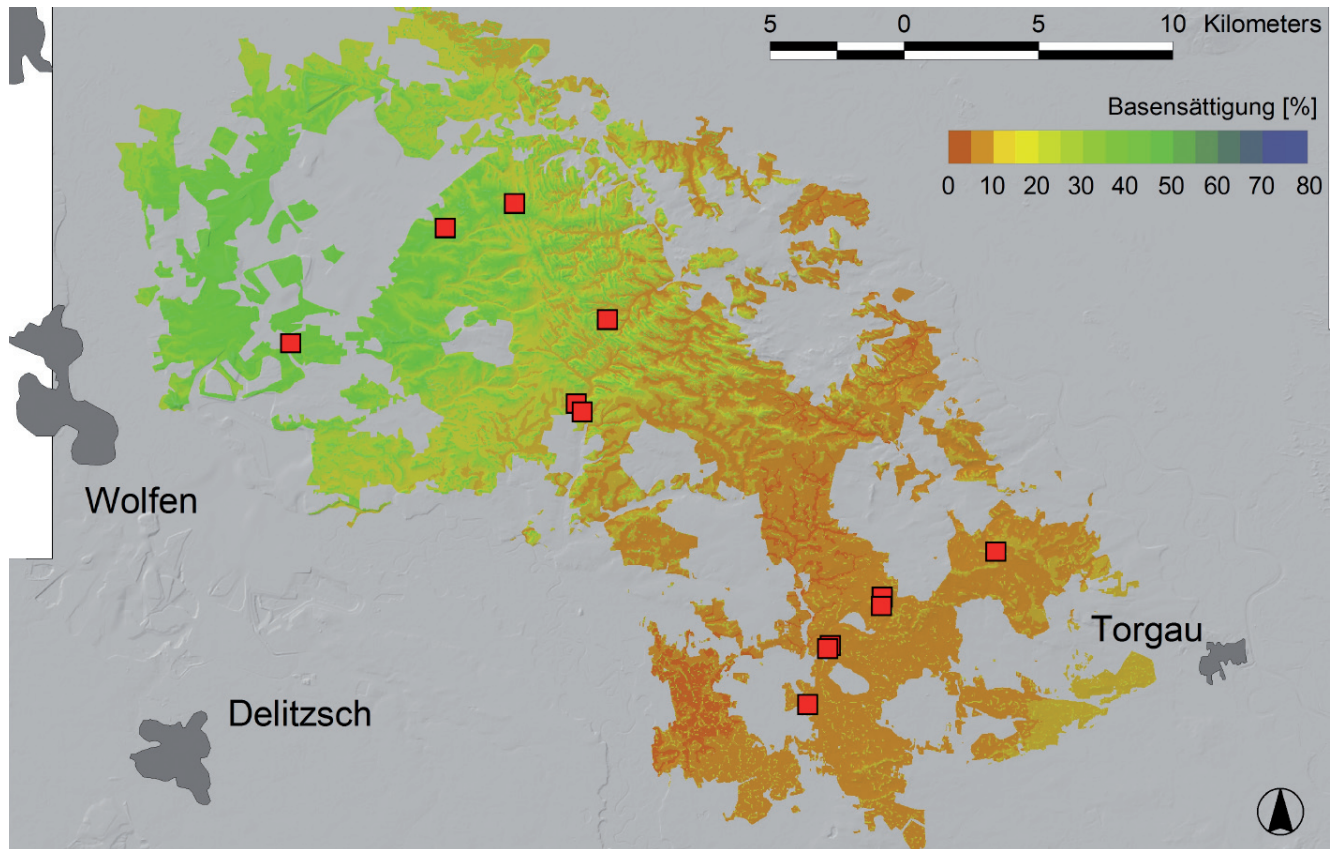


Abb. 7: Gesamtgebietsübersicht über die regionalisierte Basensättigung (Zeitbezug 2006) im Gebiet der Dübener Heide in 10–30 cm Tiefe; rote Quadrate = Versuchsflächen

Fig. 7: Base saturation in the Dübener Heide region spatially modelled (regionalized) at 10–30 cm depth and for the year 2006; red squares = experimental plots.

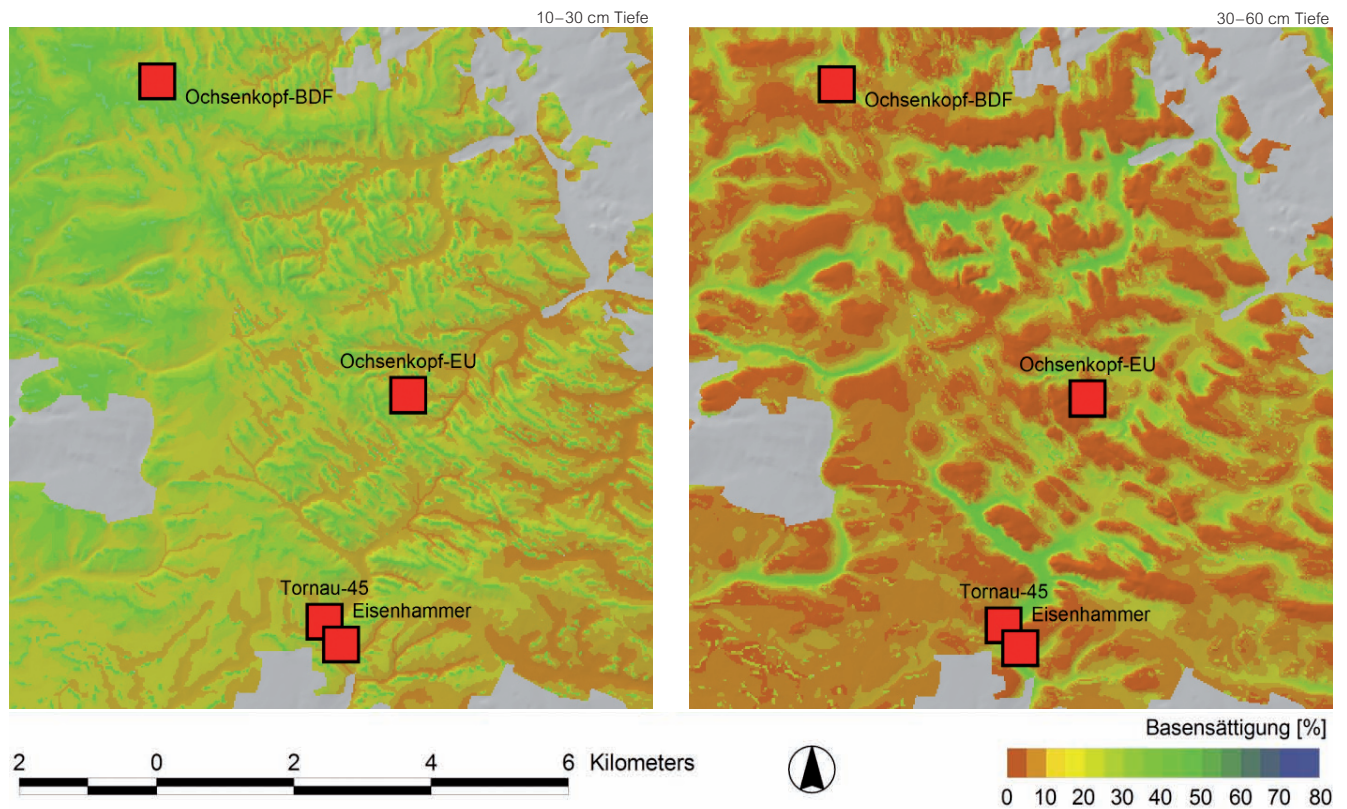


Abb. 8: Wie Abb. 6, aber andere Tiefenstufen und Gebietsausschnitt mit höherer räumlicher Auflösung zur Visualisierung topografischer Effekte der Regionalisierungsmodelle.

Fig. 8: Similar to Figure 7, but with differing soil depths and higher spatial resolution for visualizing topographic effects of the regionalization models.

schaften gewinnen. Die hier am Beispiel der Basensättigung aufgezeigten gerichteten bodenchemischen Veränderungen gelten für den Boden-pH analog.

Wie gezeigt worden ist, lassen sich Veränderungen in der bodenchemischen Ausstattung (pH, Basensättigung) zwischen 1995 und 2006 fast vollständig auf (nur) einen räumlichen Effekt zurückführen, nämlich auf die Abhängigkeit der Wiederversauerungsintensität vom Emittentenabstand. Dies gilt zumindest für die gewählten Modellskalen. Aufgrund der Straffheit der dargestellten Zusammenhänge (Abb. 5 und 6) und der anzunehmenden Kausalität ist es möglich, diese Beziehungen (bzw. die Regressionsgleichungen) zur räumlichen Schätzung des Bodenzustandes im Jahr 2006 zu verwenden: Auf Grundlage (1) der räumlichen Modelle von 1995 (Kap. 3.1) und (2) der Regressionsanalysen zur bodenchemischen Drift zwischen 1995 und 2006 in Abhängigkeit zum Emittentenabstand lassen sich durch einfache mathematische Umformungen räumliche Schätzungen von pH und Basensättigung im Jahr 2006 erstellen. Unter der Annahme der regionalen Gültigkeit der an den 12 Inventurpunkten gewonnenen Informationen zur bodenchemischen Drift (Abb. 6) zeigt Abb. 7–8 ein Beispiel für die regionalisierten bodenchemischen Zustandsmodelle im Jahr 2006. Der Vergleich von Abb. 7–8 mit Abb. 3–4 zeigt, wie stark die Wiederversauerung im Modellgebiet auf der Fläche vorangeschritten ist. Es stellt die regionalisierte Drift, d. h. die Abnahme der Neutralisation an den Kationenaustauschern in Abhängigkeit zur Emittententfernung der ehemaligen Schwerindustrie dar.

4. Schlussfolgerungen und methodischer Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt einen Forschungsansatz, mit dem bislang ausschließlich punktbezogen verfügbare bodenchemische Ausgangsbedingungen und Veränderungen großräumig auf der Fläche verfügbar gemacht werden können. Aufgrund der stark eingeschränkten Messdichte auf der Raum- und Zeitskala war es nicht möglich, im Modellgebiet die räumliche und zeitliche Entwicklung bodenchemischer Daten simultan auf der Grundlage statistischer Modelle zu betrachten. MUSIO et al. (2006) und AUGUSTIN et al. (2007) zeigen anhand von Daten der terrestrischen Waldzustandserfassung statistische Ansätze, bei denen bei genügender zeitlicher und räumlicher Wiederholung der Messdaten räumliche und zeitliche Eigenschaften verbunden und gemeinsam modelliert werden können. Diese anspruchsvollen Methoden dürften aber kaum auf andere Parameter des forstlichen Umweltmonitorings übertragen werden können, insbesondere (noch) nicht auf bodenchemische Daten der BZE. Die BZE wird zwar räumlich repräsentativ mit ausreichendem Stichprobenumfang, aber (noch) zu geringer zeitlicher Wiederholung erhoben, um derzeit raum-zeitlich gemischte statistische Modelle sinnvoll anwenden zu können. Trotz dieser methodischen Einschränkungen ist es mit kreativen Individuallösungen gelungen, die bodenchemische Drift in der Dübener Heide der letzten 10–15 Jahre mit statistischen Modellen zu regionalisieren. Dabei wurden anhand sachwissenschaftlich begründeter Hypothesen zum Kausalhintergrund räumlicher Messwertvarianz Inventurdaten mit vorausgewählten Informationen (unabhängigen Hilfsvariablen) korreliert. Neben den in dieser Arbeit dargestellten Vali-

dierungsansätzen ergeben sich weitere Validierungsmöglichkeiten, sobald die bodenchemischen Analysen der BZE II vorliegen. Dann ist eine Validierung der regionalisierten Drift mit einem unabhängigen Datenkollektiv möglich.

Diese Arbeit gibt ein Beispiel dafür, dass sich auch mit einfachen Modellen räumlich und zeitlich komplexe Systeme adäquat darstellen lassen (STRAYER et al. 2003). Auf den alternativ möglichen Einsatz prozessorientierter Bodenmodelle wurde zugunsten statistischer Methoden bewusst verzichtet, da bei den prozessorientierten Bodenmodellen vor dem Hintergrund der dort erreichten Modellkomplexität das Risiko falsch parametrisierter Prozesse als nicht unerheblich zu bewerten ist (WENKEL & SCHULZ 1999).

Literatur

- ABRAHAM, T.; RODDICK, J.F. (1999): Survey of Spatio-Temporal Databases. *Geoinformatica* 3: 61–69.
- AUGUSTIN, N.; LANG, S.; MUISO, M.; VON WILPERT, K. (2007): A spatial model for the needle losses of pine trees in the forests of Baden-Württemberg: An application of Bayesian structured additive regression. *Applied Statistics (Journal of the Royal Statistical Society, Series C)* 56: 29–50.
- BARITZ, R.; ROVIRA, P.; ROMANYA, J.; ERLANDSSON, M.; VAN RANST, E.; ZIRLEWAGEN, D. (2005): Validated, representative soil carbon profiles under forest vegetation. Part I Final Report for Deliverable 3.1, Multi-source inventory methods for quantifying carbon stocks and stock changes in European forests (CarboInvent), 44 S.
- BARONIUS, G. (1992): Zur Ausbildung und Dynamik von Ernährungs- und Chlorosezuständen der Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) im Immissionsgebiet Dübener Heide. TU Dresden.
- BELL, M.A.; VAN KEULEN, H. (1995): Soil Pedotransfer Functions for Four Mexican Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 865–871.
- BMELVBUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2005): Handbuch Forstliche Analytik (HFA) – eine Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich.
- BMELVBUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2006): Arbeitsanleitung für die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II).
- BML BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1990): Bund-/Länderarbeitsgruppe BZE: Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE, Arbeitsanleitung).
- BOURENNANE, H.; KING, D.; CHÉRY, P.; BRUAND, A. (1996): Improving the kriging of a soil variable using slope gradient as external drift. *Eur. J. Soil Sci.* 47: 473–483.
- ENFORCHANGE (Hrsg., 2007): Enforchange – Wälder von heute für eine Umwelt von morgen. Statusbericht 2007.
- FRITZ, H.; MAKESCHIN, F. (2007): Bodenprozesse. In: Enforchange (ed.): Enforchange – Wälder von heute für eine Umwelt von morgen. Statusbericht 2007, 25–36.
- GAUGER, TH.; ANSHELM, F.; SCHUSTER, H.; DRAAIJERS, G.P.J.; BLEEKER, A.; ERISMAN, J.W.; VERMEULEN, A.T.; NAGEL, H.-D.

- (2002): Kartierung ökosystembezogener Langzeittrends atmosphärischer Stoffeinträge und Luftschadstoffkonzentrationen in Deutschland und deren Vergleich mit Critical Loads und Critical Levels. Forschungsvorhaben im Auftrag des BMU/UBA, FE-Nr. 29942210. Institut für Navigation, Universität Stuttgart.
- JENNESS, J. (2006): Topographic Position Index (tpi_jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.3a. Jenness Enterprises (<http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>.)
- KOCH, J.; KLOSE, S.; MAKESCHIN, F. (2002a): Long-term effect of fly ash accumulation on soil chemical properties, 3rd International Conference on Water Resources and Environment Research, TU Dresden.
- KOCH, J.; KLOSE, S.; MAKESCHIN, F. (2002b): Stratigraphic and Spatial Differentiation of Chemical Properties in Long-term Fly Ash Influenced Forest Soils in the Dübener Heide Region, NE-Germany. *Forstw. Cbl.* 121: 157–170.
- KLOSE, S., MAKESCHIN, F. (2004): Chemical properties of forest soils along a fly-ash deposition gradient in eastern Germany. *Eur. J. Forest Res.* 123: 3–11.
- LASLETT, G.M.; McBRATNEY, A.B.; PAHL, P.J.; HUTCHINSON, M.F. (1987): Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *Journal of Soil Science* 38: 325–341.
- MELLERT K.H., GENSIO, A., GÖTTLEIN, A., KÖLLING, C. (2005): Risiko erhöhter Nitratkonzentrationen unter Wald in Bayern – Regionalisierung von Inventurergebnissen aus dem Raster der BZE I. *Waldoekologie online* 2: 4–24.
- MUELLER, T.G.; PIERCE, F.J. (2003): Soil Carbon Maps: Enhancing Spatial Estimates with Simple Terrain Attributes at Multiple Scales. *Soil Sci. soc. Am. J.* 67: 258–267.
- MUSIO, M.; VON WILPERT, K.; AUGUSTIN, N. (2006): Crown condition as a function of soil, site and tree characteristics. *Eur. J. Forest Res.* 126: 91–100.
- NIEHUS, B. (1996): Untersuchungen zur Deposition luftgetragener Stoffe in der Dübener Heide, Regeneration hochbelasteter Ökosysteme (Landschaften) für eine nachhaltige Landnutzung – der Ballungsraum Leipzig-Halle-Bitterfeld als Modellregion. Abschlussbericht REGNAL, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle.
- RABEN, G.; ANDREAE, H.; KARST, H.; SYMOSSEK, F.; LEUBE, F. (2000): Bodenzustandserhebung (BZE) in den sächsischen Wäldern (1992-1997). Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten 20.
- SABOROWSKI, J.; JANSEN, M. (2002) Statistical methods for regionalization of ecological state variables. In: JANSEN, M.; JUDAS, M.; SABOROWSKI, J. (eds.) *Spatial modelling in Forest Ecology and Management*. Springer, 19–26.
- SAS INSTITUTE INC. (1990): SAS/STAT User's Guide. Volume 2, Version 6, fourth edition. Cary, North Carolina.
- SAS INSTITUTE INC. (1999): SAS/OnlineDoc: Version eight. Cary, North Carolina.
- STRAYER, D.L.; EWING, H.A., BIGELOW, S. (2003): What kind of spatial and temporal details are required in models of heterogeneous systems? *Oikos* 102: 654–662.
- SZIBALSKI, M. (2000): Großmaßstäbliche Regionalisierung labiler Bodenkennwerte in standörtlich hochdiversen Kulturlandschaften. Diss. Univ. Gießen.
- UTSET, A.; LÓPEZ, T.; DÍAZ, M. (2000): A comparison of soil maps, kriging and a combined method for spatially predicting bulk density and field capacity of ferralsols in the Havana-Matanzas Plain. *Geoderma* 96: 199–213.
- TRIANAFILIS, J.; ODEH, I.O.A.; McBRATNEY, A.B. (2001): Five Geostatistical Models to Predict Soil Salinity from Electromagnetic Induction Data Across Irrigated Cotton. *Soil Sci. soc. Am. J.* 65: 869–878.
- WENKEL, K.-O.; SCHULZ, A. (1999): Vom Punkt zur Fläche - das Skalierungs- bzw. Regionalisierungsproblem aus der Sicht der Landschaftsmodellierung. In: STEINHARDT, U.; VOLK, M. (eds.) *Regionalisierung in der Landschaftsökologie. Forschung - Planung - Praxis*. Teubner, 19–40.
- ZIRLEWAGEN, D. (2003): Regionalisierung bodenchemischer Eigenschaften in topographisch stark gegliederten Waldlandschaften. Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung 19, Diss. Univ. Freiburg i. Br.
- ZIRLEWAGEN, D. (2007): Regionalisierung. In: Enforchange (ed.): *Enforchange – Wälder von heute für eine Umwelt von morgen*. Statusbericht 2007, 63–74.
- ZIRLEWAGEN, D.; VON WILPERT, K. (2004): Using model scenarios to predict and evaluate forest management impacts on soil base saturation at landscape level. *Eur. J. Forest Res.* 123: 269–282.
- ZIRLEWAGEN, D.; RABEN, G.; WEISE, M. (2007): Zoning of forest health conditions based on a set of soil, topographic and vegetation parameters. *For. Ecol. Manage.* 248: 43–55.

Autorenanschriften

Dietmar Zirlewagen

Interra, Büro für Umweltmonitoring

St.-Peter-Straße 30, D-79341 Kenzingen

Telefon +49 7644-930539

Email d.zirlewagen@interra.bizwww.interra.biz