

# DBG



DEUTSCHE

BODENKUNDLICHE

GESELLSCHAFT

# MITTEILUNGEN

DBG · Band 106 · 2005 · ISSN - 0343-1071

*Schriftleitung:* P. Hugenroth, Oldenburg

# **MITTEILUNGEN**

**der**

**DEUTSCHEN BODENKUNDLICHEN  
GESELLSCHAFT**

**Band 106**

**2005**

**ISSN – 0343-1071**

**Schriftleitung: P. Hugenroth, Oldenburg**

**MITTEILUNGEN  
DER  
DEUTSCHEN BODENKUNDLICHEN  
GESELLSCHAFT**

**Referate der gemeinsamen Sitzung der Kommissionen I und II  
18. und 19. Februar 2005, Schloß Wulkow, Müncheberg**

---

**REFERATE  
des gemeinsamen Workshops des  
Instituts für Geographie der Friedrich-Schiller-Universität Jena  
und der AG  
Informationssysteme in der Bodenkunde der DBG  
„Methoden zur Datenaggregation und –regionalisierung  
in der Bodenkunde, der Bodengeographie und in Nachbardisziplinen“  
15. und 16. März 2005, Jena**

---

## INHALT Band 106

### Referate der gemeinsamen Sitzung der Kommissionen I und II 18. und 19. Februar 2005, Schloß Wulkow, Müncheberg

BUCZKO, U.; H.H. GERKE	Möglichkeiten und Grenzen der Abschätzung der pF-Kurve in kohlearmen und kohlehaltigen Kippenböden mit dem Arya-Paris-Modell	3-4
DEC, D.; R. HORN; B. MARLÄNDER	Auswirkung verschiedener Bearbeitungsvarianten auf die thermische Diffusität und Berechnungsmöglichkeiten	5-6
EINECKE, M.; H.H. GERKE; R.F. HÜTTL	Untersuchungen zur Mehrregionalität und Entwicklung einer Pedotransferfunktion hydraulischer Eigenschaften kohlehaltiger Kippböden	7-8
DÖRNER, J.; R. HORN	Anisotropie von Porenfunktionen und ihre Auswirkung auf die Wasserbewegung in einer Jungmoränenlandschaft Schleswig-Holstein	9-10
EULENSTEIN, F.; M. WILLMS; J. OLEJNIK; K.W. BECKER; B. MEYER; A. WERNER FAZEKAS, O.; R. HORN	Steigende Sulfatgehalte im Sickerwasser eines Trinkwassereinzugsgebietes durch autotrophe Denitrifikation	11-12
GEBHARDT, S.; H. FLEIGE; R. HORN	Auswirkung schwerer landwirtschaftlicher Maschinen auf die mechanische Stabilität	13-14
	Veränderung von Porenfunktionen unterschiedlicher Böden nach Überschreitung ihrer mechanischen Stabilität	15-16
GRONWALD, N.; I. ANDRÁ; S. IDEN; W. DURNER	Abschätzung mobilisierbarer Schadstoffvorräte und des Schadstoffverteilungsverhaltens aus multiplen Schüttelversuchen	17-18
HARRACH, T.; T. VORDERBRÜGGE	Offene Fragen zur nFK von natürlichen und anthropogenen Böden	19-20
HAUBOLD-ROSAR, M.; R. SCHNEIDER	Entwicklung bodenphysikalischer Eigenschaften junger Kippböden im Lausitzer Braunkohlenrevier in Abhängigkeit von Substrat und Melioration	21-22
HERBST, R.; J. LAMP	Effiziente Geosondierung zur tiefendifferenzierten Bodeninventur	23-24
HOEPFNER, U.; M.D. FREDLUND	The $\theta(\psi)$ -function of Waste Rock: Measurements and Pedotransfer Functions	25-26
HORNSCHUCH, F.; W. RIEK	Bodenheterogenität: Indikator für Biodiversität und Naturnähe? – Problemstellung, Ziele, Methodik -	27-28
IDEN, S.; W. DURNER	Abschätzung mobilisierbarer Schadstoffvorräte und des Schadstoffverteilungsverhaltens aus multiplen Schüttelversuchen	29-30
JANßEN, I.; J. KRÜMMELBEIN; E. JASINSKA; R. HORN	Bedeutung von Textur und Bodenstruktur für die Sorptivitäten unterschiedlicher Böden	31-32
JANSSEN, M.; A. MUTH; B. LENNARTZ	Bodenhydrologische Eigenschaften von Paddy-Reisfeldern in SE-China	33-34
KÖHNE, J.M.; B.P. MOHANTY	Wasserströmung in einer gepackten Bodensäule mit präferentiellem Fliessweg: Experiment und Hierarchische Modellierung	35-36
KÖHNE, S.; B. LENNARTZ; J.M. KÖHNE; J. ŠIMŮNEK	Bromidtransportexperiment an einem Dränstandort: Ein- und zweidimensionale numerische Modellierung von physikalischen Ungleichgewichtsprozessen	37-38

KRÜMMELBEIN, J.; S. PETH; R. HORN	Einfluss unterschiedlicher Beweidungsintensitäten auf Bodenstabilität, Bodenstruktur und Wasserhaushalt in der Inneren Mongolei, V.R. China	39-40
LIPSIUS, K.; W. DURNER	Auswirkungen anthropogen verursachter Hydrophobizität im Oberboden auf Wasserbewegung und Stofftransport im Untergrund	41-42
MARKGRAF, W.; R. HORN; S. PETH	Einführung der Rheometrie in die Bodenmechanik: (Mikro-)Strukturelles Verhalten von Böden in Abhängigkeit von Salzkonzentration und Wassergehalt	43-44
MÜLLER, L.; S. WIRTH; J. AUGUSTIN; M. TAUSCHKE; U. SCHINDLER; A. BEHRENDT; F. EULENSTEIN; R. MEIßNER	Verlagerung von Agrochemikalien und Enzymen durch Dränsysteme (Lysimeterexperimente)	45-46
ROGASIK, H.; I. ONASCH; O. TOMANOVA; H.-J. KOCH; H.H. GERKE	Morphologische Gefügedifferenzierung bei "natürlichen" und gestörten Lößböden auf der Grundlage röntgencomputertomographischer Untersuchungen	47-48
SCHAAF, W.; B. WECKER; H.H. GERKE; R.F. HÜTTL	Säulenversuche zum Einfluss der kleinräumigen Verteilung kohligter Substanz auf den Stofftransport in Kippenböden	49-50
SCHINDLER, U.; L. MÜLLER	Sickerwasserabschätzung aus bodenhydrologischen Messungen im Vergleich mit Lysimeterergebnissen	51-52
SCHNEIDER, R.; D. SCHRÖDER	Beziehungen zwischen Gefügeentwicklung und bodenphysikalischen sowie -mechanischen Eigenschaften schluffiger Neulandböden im rheinischen Braunkohlenrevier	53-54
SCHRÖDER, D.; R. SCHNEIDER TIEMEYER, B.; P. KAHLE; B. LENNARTZ	Prävention gegen Bodenschadverdichtungen Wasser- und Stoffflüsse in künstlich entwässerten kleinen Einzugsgebieten – experimentelle Untersuchungen und Modellansätze	55-56 57-58
TRESSEL, E.; R. SCHNEIDER	Bodenwasserhaushalt und Sickerwasserbildung in der Trier-Bitburger Mulde	59-60
WILLMS, M.; F. EULENSTEIN; J. OLEJNIK; K.W. BECKER; B. MEYER; A. WERNER	Bilanzierung und Modellierung des Schwefelhaushaltes eines landwirtschaftlich genutzten Trinkwasser-einzugsgebietes mit hoher Sulfatkonzentration im Sickerwasser	61-62
WÖLLECKE, B.; U. BUCZKO; O. BENS; R.F. HÜTTL	Ausprägung von physikalischen Unterschieden in der Bodenmatrix durch bodenkonservierende und konventionelle Landbewirtschaftung	63-64

**Referate des gemeinsamen Workshops des Instituts für Geographie der Friedrich-Schiller-Universität Jena und der AG Informationssysteme in der Bodenkunde der DBG „Methoden zur Datenaggregation und -regionalisierung in der Bodenkunde, der Bodengeographie und in Nachbardisziplinen“**

**15. und 16. März 2005, Jena**

DOBERS, S.E.	Verbesserung und Erweiterung digitaler Bodenkarten unter Verwendung des <i>Transferable Belief Models</i>	67-68
DOBER, L.	Anwendung geostatistischer Methoden – Wichtige Aspekte im Vorfeld	69-70
FÖRSTER, H.; T. BEHRENS; T. SCHOLTEN	Übertragbarkeit von Bodenformgesellschaften des Pfälzer Waldes in das Mittlere Saaletal mit Künstlichen Neuronalen Netzen	71-72

HANNEMANN, J.	Ableitung von Bodenkarten unter Berücksichtigung unscharfer Grenzen auf der Grundlage der Fuzzy-Jet-Theorie	73-74
HARTMANN, K.-J.; T. BEHRENS; T. SCHOLTEN	Synthetische Konzeptbodenkarte für das Schwarzerdegebiet in Sachsen-Anhalte	75-76
HEINRICH, M.; M. MÖLLER	Strukturierung von kontinuierlichen Rasterdaten mithilfe eines regionenbasierten Segmentierungsalgorithmus	77-78
HERRMANN, L.; M. SOMMER; B. SCHUTTE; M. WEHRHAHN; S. GRAEFF; M. ZIPPRICH KAINZ, W.	Nutzung von Fern- und Naherkundungsverfahren insbesondere EM38 zur Ableitung räumlich kontinuierlicher Bodendaten auf der Feldskala Substrat-Horizont-Gruppen – Bausteine für Bodeneinheiten	79-80 81-82
KIESEL, J.; D. DEUMLICH; J. THIERS; G. LUTZE	Ableitung einer flächendeckenden Bodenkarte des Landes Brandenburg im mittelmaßstäbigen Bereich	83-84
KLINGE, M.; J. BOHNER; T. SELIGE; R. KÖTHE	Parametrisierung Spät-Quartärer Hangentwicklungen als Grundlage für die Regionalisierung von Deck-schichtverbreiterungen und –mächtigkeiten	85-86
LEMMNITZ, C.; M. KUHNERT; S. HAUBROCK; O. BENS; R.F. HÜTTL	Trockenheitsinduzierte Veränderungen hydrologischer Eigenschaften von Oberböden eines gestörten Standorts in der Bergbaufolgelandschaft	87-88
MEER, U.; T. MOSIMANN	Heterogenitätsmaße zur Beurteilung diskreter Kartiereinheiten sowie deren Anwendung bei der Disaggregation von Bodenarealen mittlerer Maßstäbe	89-90
MÖLLER, M.	Automatisierte Refliegliedierung auf der Grundlage multihierarchischer Objektstrukturen	91-92
NEUMANN, T.	Geoelektrik zur Unterstützung der Standortkartierung von Rekultivierungsflächen – Erfahrungen aus der Praxis	93-94
SCHMIDT, K.; T. BEHRENS; T. SCHOLTEN; F. REINHARDT; W. BRANDTNER	Räumliche Zuweisung und Extrapolation von Attributen der MMK in der BGK Thüringens	95-96
STEINRÜCKEN, U.; T. BEHRENS; T. SCHOLTEN; M. GOLDSCHMITT	Die räumliche Prognose von Einheiten der BK 50 Rheinland-Pfalz mittels Data Mining – Ein Verfahren zur Erstellung von Bodenkarten	97-98
SUMFLETH, K.; B. KOOP; R. DUTTMANN; B. LENNARTZ; Y. ZHAO	Räumliche Variabilität ausgewählter Bodeneigenschaften und Standortpotenziale von Reiskulturlandschaften in SE-China	99-100
SWABODA, D.; R. GIESE; L. CLAUSNITZER; S. LENK	Altlastenbearbeitung – Grenzfälle der Gültigkeit hydraulischer Zustandfunktionen Prüfen und Parametrisieren	101-102



## Inhalt nach Autoren

BUCZKO, U.; H.H. GERKE	3-4
DEC, D.; R. HORN; B. MÄRLÄNDER	5-6
DOBER, L.	69-70
DOBERS, S.E.	67-68
DÖRNER, J.; R. HORN	9-10
EINECKE, M.; H.H. GERKE; R.F. HÜTTL	7-8
EULENSTEIN, F.; M. WILLMS; J. OLEJNIK; K.W. BECKER; B. MEYER; A. WERNER	11-12
FAZEKAS, O.; R. HORN	13-14
FÖRSTER, H.; T. BEHRENS; T. SCHOLTEN	71-72
GEBHARDT, S.; H. FLEIGE; R. HORN	15-16
GRONWALD, N.; I. ANDRÁ; S. IDEN; W. DURNER	17-18
HANNEMANN, J.	73-74
HARRACH, T.; T. VORDERBRÜGGE	19-20
HARTMANN, K.-J.; T. BEHRENS; T. SCHOLTEN	75-76
HAUBOLD-ROSAR, M.; R. SCHNEIDER	21-22
HEINRICH, M.; M. MÖLLER	77-78
HERBST, R.; J. LAMP	23-24
HERRMANN, L.; M. SOMMER; B. SCHUTTE; M. WEHRHAHN; S. GRAEFF; M. ZIPPRICH	79-80
HOEPFNER, U.; M.D. FREDLUND	25-26
HORNSCHUCH, F.; W. RIEK	27-28
IDEN, S.; W. DURNER	29-30
JANSEN, I.; J. KRÜMMELBEIN; E. JASINSKA; R. HORN	31-32
JANSSEN, M.; A. MUTH; B. LENNARTZ	33-34
KAINZ, W.	81-82
KIESEL, J.; D. DEUMLICH; J. THIERS; G. LUTZE	83-84
KLINGE, M.; J. BÖHNER; T. SELIGE; R. KÖTHE	85-86



KÖHNE, J.M.; B.P. MOHANTY	35-36
KÖHNE, S.; B. LENNARTZ; J.M. KÖHNE; J. ŠIMÚNEK	37-38
KRÜMMELBEIN, J.; S. PETH; R. HORN	39-40
LEMMNITZ, C.; M. KUHNERT; S. HAUBROCK; O. BENS; R.F. HÜTTL	87-88
LIPSIUS, K.; W. DURNER	41-42
MARKGRAF, W.; R. HORN; S. PETH	43-44
MEER, U.; T. MOSIMANN	89-90
MÖLLER, M.	91-92
MÜLLER, L.; S. WIRTH; J. AUGUSTIN; M. TAUSCHKE; U. SCHINDLER; A. BEHRENDT; F. EULENSTEIN; R. MEIBNER	45-46
NEUMANN, T.	93-94
ROGASIK, H.; I. ONASCH; O. TOMANOVA; H.-J. KOCH; H.H. GERKE	47-48
SCHAAF, W.; B. WECKER; H.H. GERKE; R.F. HÜTTL	49-50
SCHINDLER, U.; L. MÜLLER	51-52
SCHMIDT, K.; T. BEHRENS; T. SCHOLTEN; F. REINHARDT; W. BRANDTNER	95-96
SCHNEIDER, R.; D. SCHRÖDER	53-54
SCHRÖDER, D.; R. SCHNEIDER	55-56
STEINRÜCKEN, U.; T. BEHRENS; T. SCHOLTEN; M. GOLDSCHMITT	97-98
SUMFLETH, K.; B. KOOP; R. DUTTMANN; B. LENNARTZ; Y. ZHAO	99-100
SWABODA, D.; R. GIESE; L. CLAUSNITZER; S. LENK	101-102
TIEMEYER, B.; P. KAHLE; B. LENNARTZ	57-58
TRESSEL, E.; R. SCHNEIDER	59-60
WILLMS, M.; F. EULENSTEIN; J. OLEJNIK; K.W. BECKER; B. MEYER; A. WERNER	61-62
WÖLLECKE, B.; U. BUCZKO; O. BENS; R.F. HÜTTL	63-64

**MITTEILUNGEN  
DER  
DEUTSCHEN BODENKUNDLICHEN  
GESELLSCHAFT**

**Referate der gemeinsamen Sitzung der Kommissionen I und II  
18. und 19. Februar 2005, Schloß Wulkow, Müncheberg**

Band 106

2005



# Möglichkeiten und Grenzen der Abschätzung der pF-Kurve in kohlearmen und kohlehaltigen Kippenböden mit dem Arya-Paris-Modell

Uwe Buczko<sup>1</sup>, Horst H. Gerke<sup>2</sup>

## Einleitung

Für Simulationen des Wasserflusses und Stofftransports in Braunkohleabraumkippen sind räumliche Verteilungen von hydraulischen Parametern (pF-WG, hydraulische Leitfähigkeit) erforderlich. Eine direkte Messung dieser Parameter in der erforderlichen Datendichte ist jedoch nicht praktikabel. Daher ist die Verwendung von Pedotransferfunktionen, mit denen aus der Textur und der Lagerungsdichte die pF-WG-Beziehung abgeschätzt werden kann, sinnvoll. Eine z.T. auf physikalischen Grundlagen basierende Pedotransferfunktion ist das Modell von Arya & Paris (1981) (Arya-Paris-Modell - APM). Das APM wurde ursprünglich für gewachsene Böden entwickelt; Abraumsedimente des Braunkohletagebaues enthalten jedoch lignitische Fragmente unterschiedlicher Größe. Ziel dieser Arbeit ist es, die Anwendbarkeit und Grenzen des APM in Abraumsedimenten und -böden des Braunkohletagebaues zu untersuchen. Dabei wurden Abraumböden mit unterschiedlichen Gehalten von Lignitfragmenten untersucht und unterschiedliche Methoden zur Abschätzung des APM-Exponenten getestet.

## Methoden

Es wurden Proben der Kippen „Schlabendorf-Nord“ (kohlearmes Sediment) und „Bärenbrücker Höhe“ (kohlereiches Sediment), beide im Lausitzer Braunkohlerevier, untersucht. Für Schlabendorf-Nord wurden an 250 cm<sup>3</sup>-Proben von verschiedenen Tiefen einer 41 m tiefen Bohrung pF-WG- und Textur-Messungen verwendet. Von der Bärenbrücker Höhe wurden Messungen von Textur, Lagerungsdichte, und Gehalt an Kohlefragmenten eines 250 × 150 × 110 cm großen Bodenblocks in räumlicher Auflösung verwendet. pF-WG-Messungen wurden an Proben die einige m entfernt gewonnen wurden, durchgeführt. Für die Abschätzung der pF-WG-Beziehung aus Textur und Lagerungsdichte wurde das Modell von

Arya und Paris (1981) verwendet. Für die Abschätzung des Skalierungsfaktors  $\alpha$  in diesem Modell wurden folgende Methoden getestet (siehe Buczko 1999, Buczko & Gerke 2005b):

1. Konstanter Wert von 1,38 wie ursprünglich in Arya und Paris (1981).
  2. Kalibrierung an Meßwerten, wobei  $\alpha$  als konstant für alle Korngrößenklassen eines Bodens angenommen wurde.
  3. Kalibrierung an Meßwerten, mit  $\alpha$  als Funktion der Korngrößenklasse.
  4. Abschätzung mit der Beziehung zwischen Partikelgröße und Partikelanzahl nach Tyler und Wheatcraft (1989).
  5. Abschätzung mit der Beziehung zwischen Partikelgröße und kumulativem Massenanteil nach Tyler und Wheatcraft (1992).
- Zusätzlich wurde getestet, ob eine zusätzliche Korrektur für den residualen Wassergehalt eine Verbesserung der Vorhersagen ergibt.

## Ergebnisse

Die Ermittlung von  $\alpha$  mit fraktalen Methoden ist offenbar mit Unsicherheiten behaftet (Abb. 1 und 2). Dies gilt insbesondere für die Korngröße-Massenanteil-Methode (Tyler & Wheatcraft 1992, Abb. 2), die  $\alpha$ -Werte unter 1 liefert (Buczko & Gerke 2005b). Entsprechend groß ist die Abweichung zu den gemessenen pF-Daten für diesen Ansatz (Abb. 3).

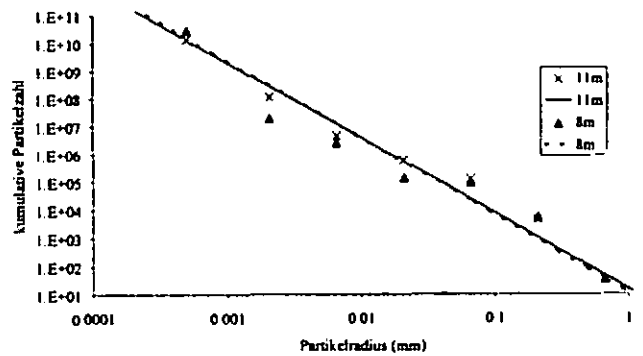


Abb. 1: Abschätzung von  $\alpha$  mit der Methode „Partikelradius vs. kumulative Partikelanzahl“ (Tyler & Wheatcraft 1989).

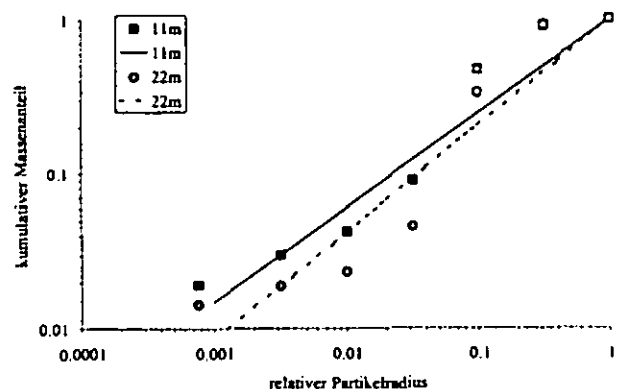


Abb. 2: Schlabendorf-Nord: Abschätzung der fraktalen Dimension, Korngröße-Massenanteil-Methode (Tyler & Wheatcraft 1992).

<sup>1</sup> Lehrstuhl f. Bodenschutz u. Rekultivierung, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, E-Mail: Buczko@tu-cottbus.de

<sup>2</sup> Institut f. Bodenlandschaftsforschung, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V., Müncheberg

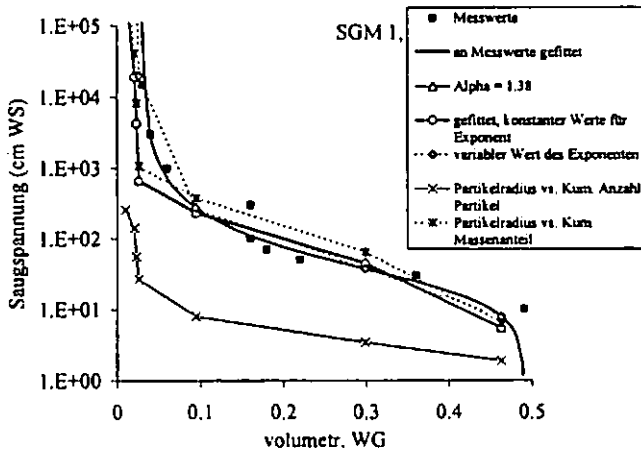


Abb. 3: Schlabendorf-Nord: Mit dem APM berechnete pF-WG-Kurven, beispielhaft für 8 m Tiefe.

Für das kohlehaltige Kippsubstrat Bärenbrücker Höhe wurden pF-WG-Kurven für die einzelnen Kippstrukturen als volumengewichtetes Mittel der pF-Kurven des Sandanteils und des Kohlenanteils abgeschätzt (Abb. 4, Details siehe Buczko & Gerke 2005a).

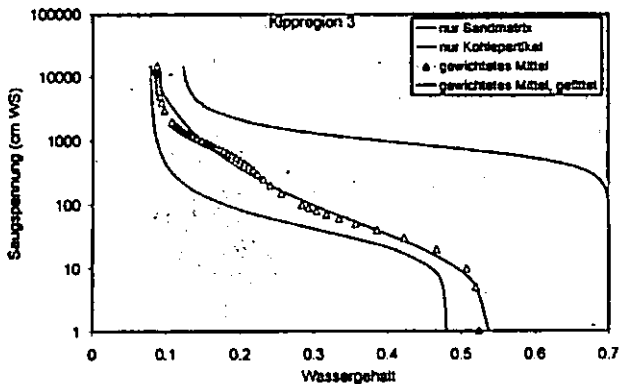


Abb. 4: Bärenbrücker Höhe: Abschätzung der pF-WG-Kurve

### Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

APM für kohlearmes Kippsubstrat (Buczko & Gerke 2005b):

Fraktale Ansätze zur Abschätzung von  $\alpha$  liefern offenbar ungenaue Werte, die ausserdem zwischen den beiden Ansätzen stark divergieren; d.h. Porenraum des Bodens ist nicht fraktal, oder Beziehung zwischen Textur und Porenraum ist zu komplex (Bodenstruktur). Korrektur für residualen Wassergehalt liefert besser an die gemessenen Werte angepasste pF-Kurven; dies kann bedeuten, dass das APM nicht in der Lage ist, den residualen WG in diesen Kippsanden wiederzugeben (kann bedingt sein durch Haftwasser und/oder Kohlestaub). Eine genaueste Reproduzierung der gemessenen Werte wird erreicht, wenn  $\alpha$  jeweils für jede KG-Fraktion gefittet wird und eine Korrektur für den residualen WG verwendet wird. In diesem

Fall ist aber eine Vorhersage der pF-Kurve aus der Textur kaum möglich.

APM für kohlereiches Kippsubstrat (Bärenbrück) (Buczko & Gerke 2005a):

$\alpha$  wurde für mittlere Textur für jede KG-Fraktion gefittet. Die Abschätzung der pF-Kurve erfolgte mit dem APM für den Mineralbodenanteil, die Gesamt-pF-Kurve wurde als volumengewichtete Mittelung mit pF-Kurve der Kohlepartikel berechnet. Mit dieser Vorgehensweise scheint die Anwendung des APM für Sand-Kohkegemische prinzipiell möglich, erforderlich sind aber pF-Daten des Kohleanteils (hier nur grob abgeschätzt).

### Literatur

- Arya, L.M. & Paris, J.F. (1981): A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data.- Soil Sci. Soc. Am. J., 45: 1023-1030.
- Buczko, U. (1999): Modellierung des Wasserflusses und Stofftransports in der wasserungesättigten Zone heterogener Braunkohletagebau-Abraumkippen der Lausitz. Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung, Bd. 6.
- Buczko, U. & Gerke, H.H. (2005a): Estimation of the spatial distribution of hydraulic properties in a heterogeneous lignitic mine soil.- Journal of Hydrology, im Druck.
- Buczko, U. & Gerke, H.H. (2005b): Evaluation of the Arya-Paris-Model for estimating water retention characteristics of lignitic mine soils.- eingereicht bei Soil Science, November 2004
- Tyler, S.W. & Wheatcraft, S.W. (1989): Application of fractal mathematics to soil water retention estimation.- Soil Sci. Soc. Am. J., 53: 987-996.
- Tyler, S.W. & Wheatcraft, S.W. (1992): Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations.- Soil Sci. Soc. Am. J., 56: 362-369.

## Auswirkung verschiedener Bearbeitungsvarianten auf die thermische Diffusivität und Berechnungsmöglichkeiten.

Dorota Dec<sup>1</sup>, R.Horn, B.Märländer<sup>2</sup>

Die Bodentemperatur ist von der Lufttemperatur abhängig. Wärmeflüsse in Böden weisen aufgrund periodischer Änderungen der Temperatur im tages- und jahreszeitlichen Rhythmus gewisse Regelmäßigkeiten auf. Unter Annahme einer rein harmonischen Temperaturos zillation lässt sich der Temperaturverlauf als Funktion der Zeit durch eine Sinusschwingung approximieren<sup>1</sup>. In wasserfreien Systemen wird die Wärme über die Kontaktpunkte zwischen den Bodenpartikeln weitergeleitet. Mit steigendem Wassergehalt im Boden nimmt auch die wärmeleitende Fläche zuerst zu. Bei vollständiger Wassersättigung nimmt aufgrund der größeren Wärmeleitfähigkeit wassergesättigter Systeme dann Temperaturerhöhung in einem gegebenen Bodenvolumen nur noch langsamer zu bzw. sinkt.

Ziel dieser Arbeit war:

1. Die Bestimmung der thermischen Diffusivität (D) aus Temperaturfeldmessungen von zwei Bodenbearbeitungen (Pflug und Mulch).
2. Anpassung des Tagesverlaufs von Bodentemperaturen in zwei Tiefen (5 und 15 cm).

## Material und Methoden

### Standortbeschreibung:

- Standort: Harste/Göttingen, Norddeutschland
- Bodentyp: Tschernozem Parabraunerde  
Bodenart: mittel toniger Schluff
- Bodenbearbeitung: Pflug (P) bis 30 cm und Mulch (M) mit Grubber bis 8-10 cm Tiefe

### Freilandmessungen:

Die Bodentemperatur wurde vom Institut für

Zuckerrübenforschung in Göttingen (IFZ) in zwei Tiefen (5 und 15 cm) gemessen. Aus diesen Messungen wurde die thermische Diffusivität mit der Dämpfungstiefenmethode berechnet<sup>3</sup>. Die täglichen Bodentemperaturen wurden angepasst und mit den gemessenen Werten verglichen.

### Bestimmung von thermischen Eigenschaften:

Zur Berechnung der thermischen Diffusivität wurde die Dämpfungstiefenmethode benutzt. Diese Methode setzt voraus, dass der Verlauf der Bodentemperatur eine sinusförmige Funktion aufweist. Das Verfahren besteht aus folgenden Schritten:

1. Bestimmung der Dämpfungstiefe [cm]:
  - Phasenverschiebung  
 $d = P/2\pi[(z_1 - z_2)/(t_1 - t_2)]$  Gl.1
  - Amplitudendämpfung  
 $d = (z_1 - z_2)/\ln(Az_1/Az_2)$  Gl.2
2. Berechnung der thermischen Diffusivität:  
 $D = (\pi/P)d^2$  [ $10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ ] Gl.3

wobei:

P - Oszillationsperiode [sec]

$z_1, z_2$  - Tiefe der Temperaturmessung [cm]

$t_1, t_2$  - Zeit in der die Welle ihre maximalen Werte in Tiefe  $z_1$  und  $z_2$  erreicht [sec]

$Az_1, Az_2$  - Amplitude in Tiefe  $z_1$  und  $z_2$  [°C]

Der Tagesverlauf der Bodentemperatur wurde mit folgender Gleichung angepasst:

$$T_s(z,t) = T_a + A_0 \exp(-z/D) \sin(\Omega t - z/D) \quad \text{Gl.4}$$

wobei:

t - Zeit [Stunde]

$A_0$  - die Hälfte der Amplitude der Bodenoberflächentemperatur [°C]

$T_a$  - Mittelwert der Tagestemperatur an der Bodenoberfläche [°C]

$\Omega$  - Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation ( $7,292 \cdot 10^{-5} \text{rad/sec}$ )

D - Dämpfungstiefe der Tagestemperaturwelle [cm]

## Ergebnisse und Diskussion

Die Mulchvariante ist in den beiden Tiefen wärmer als die Pflugvariante. Die Bodentemperatur nimmt einen sinusförmigen Verlauf an. (Abb. 1 und 2).

<sup>1</sup>Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Olshausenstraße 40, D-24118 Kiel

<sup>2</sup> Institut für Zuckerrübenforschung, Göttingen

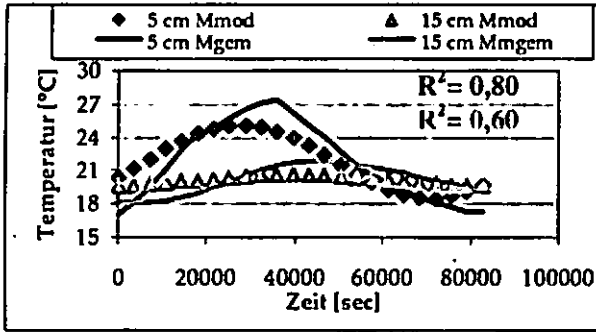


Abb. 1. Vergleich der angepassten und gemessenen Temperaturverläufe bei der Mulchvariante ( 5-15 cm) am 08.07.1995.

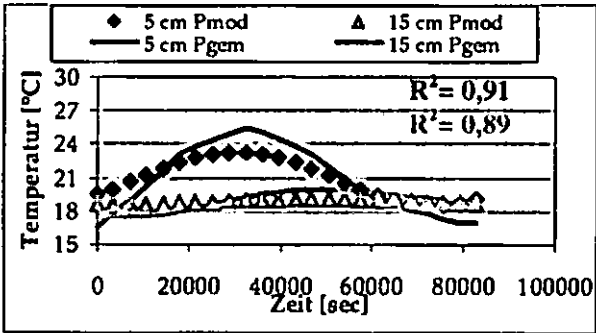


Abb. 2. Vergleich der angepassten und gemessenen Temperaturverläufe bei der Pflugvariante (5-15 cm) am 08.07.1995.

Die nach beiden Methoden berechnete Dämpfungstiefe (Phasenverschiebung, Amplitudendämpfung) ist in (Tab. 1) dargestellt. Die daraus berechnete thermische Diffusivität ist bei beiden Varianten unterschiedlich.

Tab. 1. Dämpfungstiefe und thermische Diffusivität für M und P.

Bodenbearbeitung	Mulch	Pflug
Ampl.Dämpf. [cm]	10.03	7.88
Phasenverschiebung [cm]	12.73	7.64
Th.Diff. [ $10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ ]	0.005	0.002

Abb. 3 zeigt, dass die thermische Diffusivität größere Werte bei Mulchbewirtschaftung hat. Die Lagerungsdichte hat eine Auswirkung auf die thermische Diffusivität, dennoch kann der Unterschied der Lagerungsdichte ( $0.04 \text{ g/cm}^3$ ) zwischen beiden Bearbeitungssystemen als Ursache ausgeschlossen werden, da der Unterschied zu klein ist. Dahingegen kann der stets höhere Wassergehalt in der Mulchvariante die größere thermische Diffusivität erklären, da ein Anstieg des Wassergehalts über die Ausbildung von Wärmebrücken zu steigender thermischer Diffusivität führt.

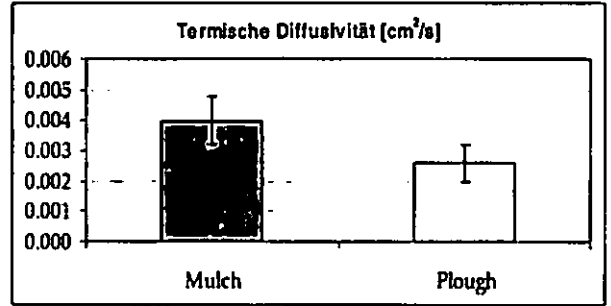


Abb. 3. Thermische Diffusivität für M und P im Juli 1995 (arithmetisches Mittel und Standardfehler; n=12)

### Schlussfolgerungen

In beiden Tiefen weist die Mulchvariante eine höhere mittlere Temperatur als die Pflugvariante auf.

Die Bodenbearbeitung beeinflusst die thermische Diffusivität. Die Mulchvariante zeigt höhere mittlere Wassergehalte als die Pflugvariante. Das ist der Grund für das Erreichen größerer Diffusivitätswerte.

### Danksagung

Wir danken dem Institut für Zuckerrübenforschung in Göttingen für die zur Verfügungstellung der Temperaturdaten. Die Erstautorin dankt für das Stipendium zur Förderung des wissenschaftlichen und künstlerischen Nachwuchses durch die CAU-Kiel.

### Literatur

- De Vries, D.A., 1996. Thermal properties of Soils. In: Van Wijk, W.R. Physics of Plant Environment, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 210-235.
- Hanks R.J., Ashcroft G.L., 1980. Applied soil physics. Berlin, New York.
- Chacko.T.P., G.Renuka., 2002. Temperature mapping, thermal diffusivity and subsoil heat flux at Kariavattomof Kerala. Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.), 111, No. 1, pp.79-85.

## Untersuchungen zur Mehrregionalität und Entwicklung einer Pedotransferfunktion hydraulischer Eigenschaften kohlehaltiger Kippböden

M. Einecke<sup>1</sup>, H.H. Gerke<sup>2</sup>, R.F. Hüttl<sup>1</sup>

### Einleitung

Die überwiegend sandigen Böden der Niederlausitzer Bergbaufolgelandschaft bestehen aus tertiären Abraumsedimenten mit kohligem Substrat, die sowohl feinverteilt in Form von Staub als auch einzeln in Form von porösen Fragmenten vorliegt (Haubold-Rosar, 1998). Die kohlehaltige Substanz kann einen erheblichen Einfluss auf die Wasserretention (Sharma et al., 1993) und Benetzbarkeit (z.B. Gerke et al., 2001) dieser Böden ausüben. Da kohlehaltige Fragmente porös sind, repräsentieren Kippböden ein duales Porensystem. Die Effekte der dualen Porenraumstruktur auf das Speichervermögen für Wasser wurden bislang meist in Wasser- und Stoffbilanzbetrachtungen vernachlässigt. Die Standardtexturanalyse für Mineralböden basiert auf der Zerstörung des organischen Kohlenstoffs und der chemischen Dispersion der Partikel und ist für Böden, in denen kohlenstoffreiche Komponenten zur Struktur des Bodens beitragen nicht geeignet. Ziel dieser Arbeit war es, Pedotransferfunktionen zur Vorhersage bodenhydraulischer Parameter von Mehrregionen-Modellen kohlehaltiger Kippböden abzuleiten.

### Material und Methoden

Untersuchungsstandort war die Bärenbrücker Höhe, eine Außenhalde Tagebaue Cottbus Nord und Jänschwalde. Ein 3,6 m<sup>3</sup> umfassender Bodenmonolith (2,45 m Länge, 1,35 m Breite, 1,10 m Tiefe) wurde vollständig 3D-beprobt. Im Gelände erfolgte eine Fraktionierung des Substrats durch Siebung in die Größenklassen  $d < 2$  mm, 2-7 mm und  $> 7$  mm. Aus den Größenfraktionen  $d > 2$  mm wurden Steine, Schlackestücke und kohlige Fragmente manuell separiert und deren Messanteile bestimmt.

### Textur

Für die Fraktion  $d < 2$  mm (Abb.1, rechts) wurde die mineral- und kohlehaltige Substanz  $d > 0,2$  mm nass abgesiebt und kohlige Aggregate von mineralischen Partikeln mittels Natriumpolywolframatlösung von 2,0 g cm<sup>-3</sup> Dichte getrennt (Einecke et al., 2003). Die Textur der kohlenstaubhaltigen Fraktion  $d < 0,2$  mm wurde mit der Standardmethode (Gee und Bauder, 1986) analysiert.



Abb.1: Kohlige Fragmente unterschiedlicher Größe in Detailaufnahme einer Profilwand und Mikroskopaufnahme eines Dünnschliffs

### Dichteuntersuchungen

Die Lagerungsdichte des Gesamtbodens wurde durch Wägung einer bei 105°C getrockneten volumengenauen Probe bestimmt. Die Raumdichte von kohligem Fragmenten  $d > 2$  mm wurde mit einer Quasiflüssigkeitsmethode (Micromeritics, GeoPyc) und die der kohlehaltigen Substanz  $d = 0,2-2,0$  mm durch Tauchwägung in Heptan bestimmt. Die Messung der Partikeldichte der Matrix  $d < 0,2$  mm und kohligem Fragmenten  $d > 2,0$  mm erfolgte mittels Pycnometermethode mit Xylol, die der kohlehaltigen Substanz  $d = 0,2-2,0$  mm mittels Tauchwägung in Heptan.

### Bodenhydraulische Eigenschaften

Die Wasserretention von kohligem Fragmenten und Gesamtbodenproben wurde bis Potentialen von -15 MPa mittels Druckapparat bestimmt. Mit multistep in/outflow Versuchen bis Potentialen von -100 hPa wurden Wasserretention und ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit von Stechringproben (250 cm<sup>3</sup>), die in ungestörter Lagerung entnommen worden waren, simultan gemessen. Mittels Miniinfiltrimeter wurde die tensionsgesättigte hydraulische Leitfähigkeit von kohligem Fragmenten nach Leeds-Harrison und Youngs (1997) bestimmt.

### Ergebnisse

In Analogie zu dualen Porositätsmodellen werden zwei Porensysteme unterschieden. Dies ist zum einen die Porenregion innerhalb kohligem Fragmenten (Index  $K$ ) und die zwischen Mineralpartikeln und kohligem Fragmenten (Index  $S$ ).

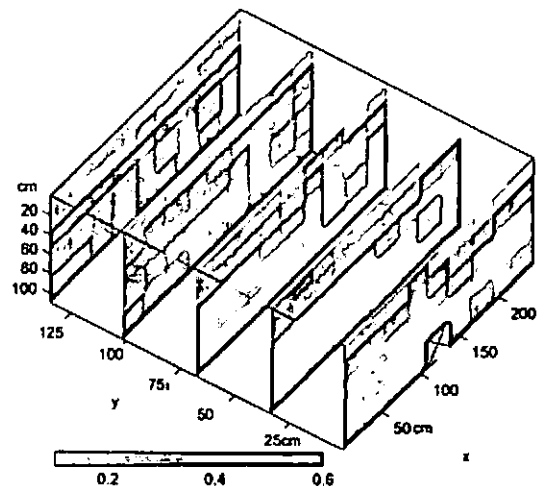


Abb. 2: Verteilung des volumetrischen Anteils [cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>] an kohlehaltigen Fragmenten  $d > 0,2$  mm im Bodenmonolith

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung, Brandenburgische Technische Universität Cottbus (BTUC), Postfach 101344, D-03013 Cottbus. (Tel.: +49-355/69-4239, 0160 97343839, [einecke@tu-cottbus.de](mailto:einecke@tu-cottbus.de)).

<sup>2</sup> Institut für Bodenlandschaftsforschung, Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V., Eberswalder Straße 84, D-15374 Müncheberg (Tel.: +49-33432/82-229, Fax: +49-33432/82-280, [hgerke@zalf.de](mailto:hgerke@zalf.de)).



Die feinverteilte kohlige Substanz in Form von Staub wurde zunächst zur zweiten Region gezählt. Die mineralischen Substanz besteht bei allen Proben gleichkörnig überwiegend aus Feinsand. Die räumliche Variabilität der Textur beruht fast ausschließlich auf den kohlehaltigen Bestandteilen und deren Verteilung im Kippboden. Die räumliche Anordnung kohligler Fragmente  $d > 2,0$  mm ist unstrukturiert und inmitten des geschütteten Substrats zufallsverteilt (Abb. 2).

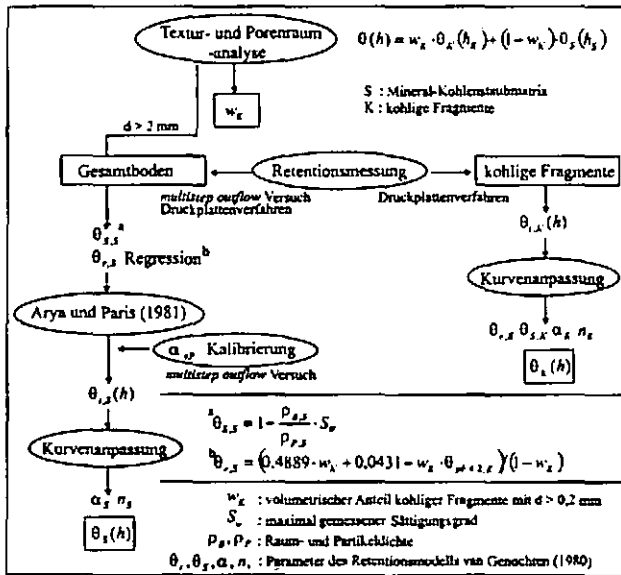


Abb.3: Schema der Entwicklung einer Pedotransferfunktion der dualen Retention kohlehaltiger Kippböden

Die Wasserretention des Gesamtbodens ergibt sich aus einer gewichteten Summierung der Retention der Regionen (Abb. 3). Die Parameter der Region kohligler Fragmente wurden durch Kurvenanpassung an empirische Werte ermittelt. Die Retentionsfunktion der Region Mineral-Kohlenstaubmatrix wurde aus Textur- und Porenraumdaten unter Verwendung der Pedotransferfunktion von Arya und Paris (1981) bestimmt. Die Kallibrierung des Packungsparameters erfolgte an Ergebnissen der *multistep outflow* Versuche. Der residuale Wassergehalt der Matrix wurde über eine lineare Regression zwischen volumetrischem Anteil kohligler Fragmente und dem Wassergehalt des Gesamtbodens bei pF 4,2 modifiziert.

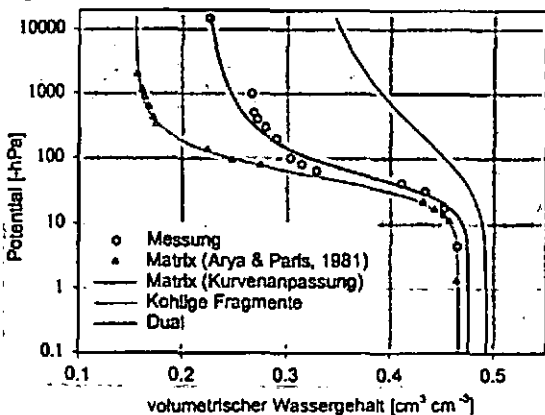


Abb. 4: Retentionsfunktionen kohligler Fragmente, der Mineral-Kohlenstaubmatrix und des Gesamtbodens (Dual) sowie Retentionsmesswerte einer Probe des Unterbodens

Obwohl kohlige Fragmente Unterschiede in ihrer mineralischen Textur und im Porenraum aufweisen, wurden mittlere Werte der Wasserretention berücksichtigt. Aus den Daten der Variabilität der kohliglen Bestandteile lassen sich mit dieser Methode räumlich differenzierte Retentionsfunktionen für den Gesamtboden ableiten.

Kohlige Fragmente weisen relativ geringe hydraulische Leitfähigkeiten auf (Mittel:  $19,8 \text{ cm d}^{-1}$ ) und liegen ‚insular‘ verteilt vor. Unter Annahme, dass die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Gesamtbodens durch den Porenraum der Mineral-Kohlenstaubmatrix dominiert wird, konnte sie mit einem modifizierten Ansatz nach Kozeny-Carman abgeleitet werden. Bei der Berechnung des hydraulisch wirksamen Korndurchmessers wurden die Raum- und Partikeldichten der Substrate inklusive der Fraktion  $d > 2,0$  mm berücksichtigt und der Tongehalt, der zum Großteil aus der Zerstörung kohligler Fragmente  $d < 0,2$  mm herrührte, mit einem Faktor von 0,2 reduziert.

### Schlussfolgerung

Mit der erweiterten Textur- und Porenraumuntersuchung können die Porenregionen, welche die Heterogenität des Substratsgemenges reflektieren, getrennt erfasst und quantifiziert werden. Unter Verwendung der Textur- und Porenraumdaten kann sowohl die duale Wasserretention des Gesamtbodens unter Berücksichtigung der Retention kohligler Fragmente als auch die hydraulische Leitfähigkeit mittels Pedotransferfunktion abgeleitet werden.

### Literatur

Einecke, M.; Gerke, H.H.; Hüttl, R.F. (2003): Zur Textur- und Porositätsbestimmung kohlehaltiger Kippböden. - Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 102 (1): 61-62.

Gee G.W. und J.W. Bauder. (1986): Particle-size analysis. in: A. Klute. Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods, second edition. Madison.

Gerke, H.H., Hangen, E., Schaaf, W. und Hüttl, R.F. (2001): Spatial variability of potential water repellency in a lignitic mine soil afforested with Pinus nigra. Geoderma, 102, 255-274.

Haubold-Rosar M. (1998): Bodenentwicklung. in: W. Pflug. Braunkohlentagebau und Rekultivierung. Berlin.

Leeds-Harrison P.B. und E.G. Youngs. (1997): Estimating the hydraulic conductivity of aggregates conditioned by different tillage treatments from sorption measurements. Soil and Tillage Research. 41:141-147.

Sharma, P.P., Carter, F.S., Halvorsen, G.A. (1993): Water retention by soils containing coal. Soil Sci. Soc. Am. J., 57, 311-316.

### Danksagung

Für die finanzielle Unterstützung danken wir der Deutschen Forschungsgemeinschaft (SFB 565 und Ge 990/2) Für Durchführung von Textur- und Porositätsmessungen danken wir Frau R. Hypscher, Frau M. Scholz und Frau I. Snelinski (ZALF-Institut für Bodenlandschaftsforschung, Müncheberg) sowie F. Damalie, E. Tangang und E. Afrifa. Wir danken Dr. Th. Heinkele für die Überlassung des Dünnstoffs.

# Anisotropie von Porenfunktionen und ihre Auswirkung auf die Wasserbewegung in einer Jungmoränenlandschaft Schleswig-Holstein

José Dörner<sup>1</sup> und Rainer Horn

## Einleitung

Über Anisotropie der hydraulischen Leitfähigkeit wurde schon von mehreren Autoren berichtet (Hartge, 1984; Mualem, 1984; Tiggles, 2000) aber ihre Berücksichtigung in der Modellierung der Wasserbewegung im agrarwissenschaftlichen Bereich ist nicht die Regel sondern eher die Ausnahme. Ziel dieser Arbeit ist es Anisotropie von Porenfunktionen nachzuweisen, um die Auswirkungen auf den Wassertransport am Hang zu quantifizieren.

## Material und Methode

Tensiometer wurden in verschiedenen Tiefen an drei Standorten einer Catena (CIIS<sub>1</sub>, CIIS<sub>2</sub> und CIIS<sub>3</sub>) installiert. Die Messung des Matrixpotentials erfolgte alle 3 oder 4 Tage. Ein hydraulisches Probenentnahmegesetz wurde benutzt um ungestörte Bodenproben in Winkel von 0°, 45° und 90° zur Bodenoberfläche an den drei Standorten der Catena zu gewinnen. Bei den Böden handelt es sich um pseudovergleyte Parabraunerden (CIIS<sub>1</sub> und CIIS<sub>2</sub>) und einen Kolluvisol (CIIS<sub>3</sub>) aus Geschiebemergel. An den Bodenproben wurden die pF-WG Kurve, die gesättigte ( $k_f$ ) sowie die Luftleitfähigkeit ( $k_l$ ) bestimmt. Die zweidimensionale Modellierung des Wassertransportes am Hang wurde mit Hydrus 2D (Šimůnek et al., 2003) durchgeführt.

## Ergebnisse und Diskussion

Während die vertikale Komponente der  $k_f$  ist im Pflughorizont 3-mal größer als ihre horizontale Komponente, ist diese horizontale Komponente der  $k_f$  in der Pflugsohle 7-mal größer als die vertikale Komponente (Abb. 1). Ursache hierfür ist eine Partikeleinregelung in der Pflugsohle, wodurch das Porensystem in der waagerechten Richtung kontinuierlicher geworden ist, und

daher steigt die  $k_f$  in dieser Richtung.

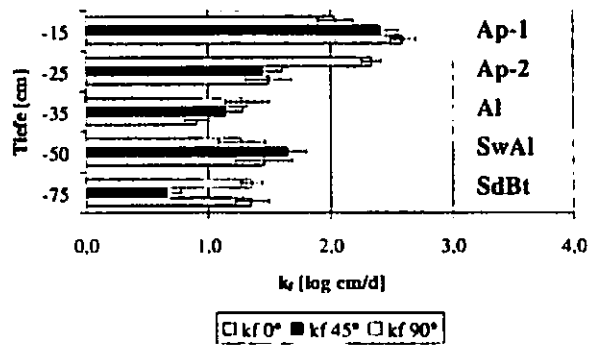


Abb. 1: Gesättigte Wasserleitfähigkeit in CIIS<sub>2</sub>, Ap-1 Pflughorizonte, Ap-2 Pflugsohle ( Fehlerbalken zeigen Standardfehler; n=10)

Die Beziehung (Abb. 2a und 2b) zwischen luftgefülltem Porenvolumen ( $\epsilon_a$ ) und Luftpermeabilität ( $k_a$ ) wurde mit einer logarithmisierten Form der Kozeny Carman Gleichung (Gl. 1) angepasst (Ball et al, 1988). Im Pflughorizont ist keine Anisotropie zu erkennen, wohingegen in der Pflugsohle wieder auftritt. Hier ist die horizontale Komponente der Permeabilität größer als ihre vertikale Komponente. Mit zunehmendem  $\epsilon_a$  sinkt die Anisotropie der  $k_a$ . Luftpermeabilitätsmessungen ermöglichen somit eine gute Beschreibung von geometrischen Faktoren, die die Porenfunktionen beeinflussen. In diesem Fall ist N ein Kontinuitätsfaktor und aus seiner Beziehung mit M ergibt sich das blockierte Porenvolumen (Gl. 2), das als undurchlässiges luftgefülltes Porenvolumen betrachtet wird, wenn die Luftpermeabilität  $1 \mu\text{m}^2$  erreicht (Ball et al, 1988). In der Pflugsohle zeigt sich, dass die größere horizontale Komponente der Permeabilität mit einem kleineren blockierten Porenvolumen erklärt werden kann.

Aus den gezeichneten Strukturformen wird deutlich (Abb. 3), dass Böden bzw. Bodenhorizonte aufgrund der Struktur bevorzugte Fließwege aufweisen, die kontinuierlicher und der Grund für die Anisotropie auf der Skala von Bodenhorizonten sind. Aus den Strukturformen lässt sich auch erkennen, dass nur eine kugelförmige Anordnung ein isotropes Verhalten aufweisen kann. Aus diesen Gründen ist die Anisotropie in Böden keine Ausnahme.

<sup>1</sup> Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, CAU Kiel.

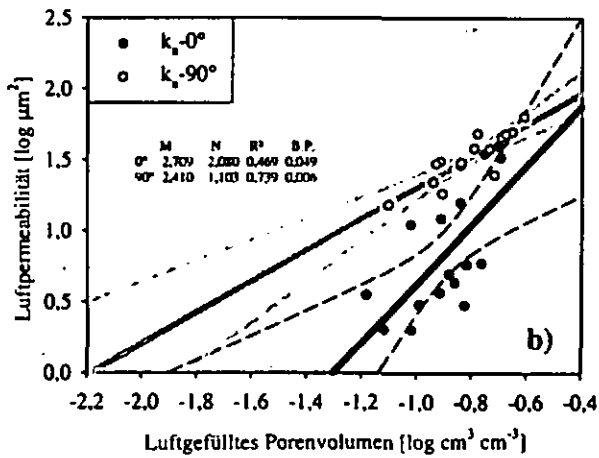
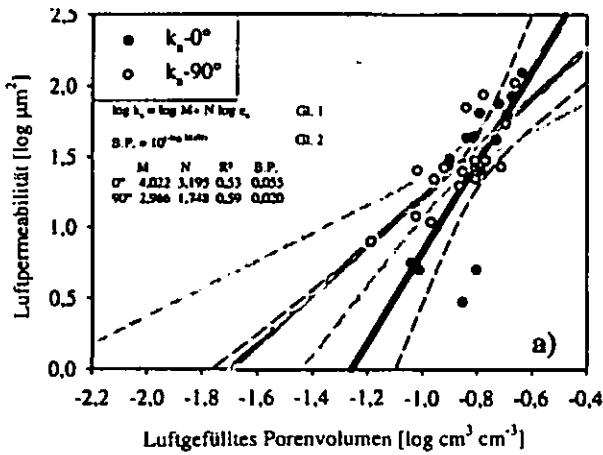


Abb. 2: Beziehung zwischen luftgefülltem Porenvolumen und Luftpermeabilität in CHS<sub>2</sub>; a: Pflughorizonte; b: Pflugsohle. Gestrichelte Linien entsprechen die Konfidenzintervallen (95%)

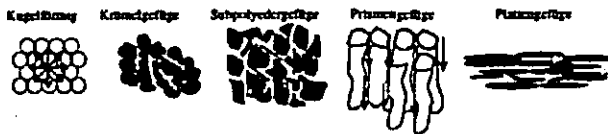


Abb. 3: Beispiele der Bodenstrukturformen (Pfeile zeigen die Flussrichtung).

Die Modellierung des Wassertransportes am Hang wurde mit und ohne Berücksichtigung der Anisotropie der  $k_f$  für die ersten 2 Bodenhorizonte durchgeführt ( $k_f$  0° und 90° zur Geländeoberfläche). In gesättigten Zustand, wenn keine Anisotropie berücksichtigt wurde (Abb. 4a), richten sich die Vektoren des Wasserflusses nach unten. Wenn die Anisotropie berücksichtigt wird, gibt es eine Ablenkung des Wasserflusses in der Richtung des Gefälles, welches die größte gesättigte Wasserleitfähigkeit aufweist (Abb. 4b).

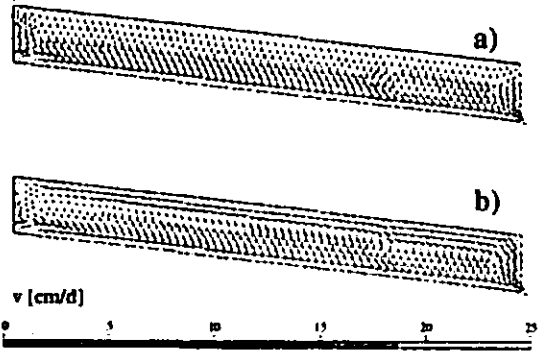


Abb. 4: Vektor des Wasserflusses am Hang nach 20 mm Regen, a) Isotropie  $k_f$ , b) Anisotropie  $k_f$ .

### Schlussfolgerung

Die Porenfunktionen weisen Anisotropie auf.

Die Anisotropie hängt von der Porenkontinuität ab, die wiederum von der räumlichen Einregelung von Bodenaggregaten bzw. Partikeln bestimmt wird.

Die Anisotropie ist wasserspannungsabhängig.

Das blockierte Porenvolumen spielt eine wichtige Rolle im Zusammenhang mit der Entstehung der Anisotropie der Luftpermeabilität.

Der Wassertransport entlang der Catena wird in Richtung der höchsten  $k_f$  abgelenkt. Damit tritt lateraler Fluss auf.

### Literatur

Ball, B.C., O'Sullivan, M.F. und Hunter, R. 1988. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. *Journal of Soil Science*, 39: 327-339.

Hartge, K.H. 1984. Vergleich der Verteilungen der Wasserleitfähigkeit und des Porenvolumens von waagrecht und senkrecht entnommenen Stechzylinderproben. *Z. Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 147:316-323.

Mualem, Y. 1984. Anisotropy of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 505-509.

Šimůnek, J., M. Šenja und M. Th. van Genuchten. 2003. The Hydrus 2D Software Package for Simulating the Two - Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably - Saturated Media. Version 2.102. U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California.

Tigges, U. 2000. Untersuchungen zum mehrdimensionalen Wassertransport unter besonderen Berücksichtigung der Anisotropie der hydraulischen Leitfähigkeit. Dissertation. Christian Albrechts Universität, Kiel.

### Danksagung

Der erste Autor bedankt sich bei DAAD für die finanzielle Unterstützung.

# Steigende Sulfatgehalte im Sickerwasser eines Trinkwassereinzugsgebietes durch autotrophe Denitrifikation

F. EULENSTEIN<sup>1</sup>, M. WILLMS<sup>1</sup>, J. OLEJNIK<sup>2</sup>, K. W. BECKER<sup>3</sup>, B. MEYER<sup>3</sup>, A. WERNER<sup>1</sup>

## 1 Problemstellung

Das Untersuchungsgebiet Bramstedt befindet sich nördlich von Bremen. Die Sulfatgehalte im Sickerwasser sind relativ gering, haben aber eine steigende Tendenz. Zur Untersuchung der Ursachen wurden Schwefel- und Stickstoffbilanzen für die landwirtschaftlich genutzten Flächen berechnet. Anschließend wurden mit Hilfe der Modelle SULFONIE und HERMES die Austräge für beide Stoffe berechnet.

## 2 Landwirtschaftliche Flächennutzung

Die Daten für die Nutzung der landwirtschaftlichen Fläche wurden im Untersuchungsgebiet Bramstedt für die Jahre 1996–2000 durch Befragung der Betriebsleiter erhoben. Bei den Betrieben handelt es sich um Futterbau- und Veredelungsbetriebe. Über die Hälfte der landwirtschaftlich genutzten Fläche wird als Grünland genutzt. Innerhalb der Ackerfläche dominiert der Maisanbau. Der Viehbesatz beträgt im Mittel der Jahre 2,0 GV/ha. Dabei ist er von 1,7 GV/ha im Jahr 1996 auf 2,5 GV/ha im Jahr 2000 gestiegen.

### 2.1 Nährstoffbilanzen

In Tab. 1 sind die aggregierten Betriebsbilanzen dargestellt. Dabei handelt es sich um die Mittelwerte der Jahre 1996–2000.

Beim Nährstoffimport stellt unter den zugekauften Düngern der Stickstoff aus Mineraldüngern den größten Bilanzposten dar. Die Jahresmenge der mit Mineraldüngern zugekauften Nährstoffe beträgt für Stickstoff 114 kg/ha bezogen auf den Durchschnittshektar des Untersuchungsgebietes, für Schwefel 2 kg/ha. Dies entspricht etwa 60 % der gesamten Stickstoffimporte und 25 % der gesamten Schwefelimporte.

Um zukünftig die Nährstoffsalden zu senken, ist es notwendig, den Zukauf von Mineraldüngern so weit, wie produktionstechnisch möglich, zu senken und die Nährstoffe in den Wirtschaftsdüngern stärker zu berücksichtigen.

Tab. 1: Betriebsbilanz für Stickstoff und Schwefel des Untersuchungsgebietes Bramstedt, aggregierte Daten von 4 landwirtschaftlichen Betrieben mit insgesamt 366 ha, flächengewichtete Mittelwerte der Jahre 1996–2000

Bilanzposten	N		S	
	kg/(ha·a)	%	kg/(ha·a)	%
+ Dünger	114	62	2	25
+ Futtermittel	64	35	4	70
+ Vieh	5	3	< 1	4
<b>Import gesamt</b>	<b>+ 184</b>	<b>100</b>	<b>+ 6</b>	<b>100</b>
- Marktfrüchte	8	14	1	26
- tierische Produkte	51	87	3	74
<b>Export gesamt</b>	<b>- 59</b>	<b>100</b>	<b>- 4</b>	<b>100</b>
<b>Nährstoffsaldo</b>	<b>+ 125</b>		<b>+ 2</b>	

Die atmosphärische Deposition von Schwefel ist in den letzten Jahren allgemein so weit gesunken, dass sie zur Deckung des Bedarfs der landwirtschaftlichen Fruchtarten nicht mehr ausreicht. Schwefelmangel wird im Untersuchungsgebiet bei dem bestehenden hohen Viehbesatz jedoch nicht auftreten, da durch den Zukauf von Futtermitteln genügend Schwefel in die Betriebe gelangt, der dann in Form von Wirtschaftsdünger die Schwefelversorgung der Flächen gewährleistet (Tab. 2).

Tab. 2: Zufuhren, Abfuhren und Salden für Stickstoff und Schwefel für ausgewählte Fruchtarten im Untersuchungsgebiet Bramstedt. Werte als jährliche flächengewichtete Mittelwerte der Jahre 1996–2000 auf Basis der Flächenbilanzierung

	Winterweizen	Wintergerste	Silomais	Grünland	Winterraps	Kartoffeln
Ertrag [dt/ha]	77	60	450	369	33	297
Flächenanteil [%]	1	3	27	39	2	1
+ N-Zufuhr miner. [kg/ha]	165	139	19	104	181	125
+ N-Zufuhr organ. [kg/ha]	132	109	225	186	172	0
- N-Abfuhr [kg/ha]	169	131	171	166	107	104
<b>N-Saldo [kg/ha]</b>	<b>128</b>	<b>117</b>	<b>72</b>	<b>124</b>	<b>245</b>	<b>21</b>
+ S-Zufuhr miner. [kg/ha]	2	5	2	1	9	54
+ S-Zufuhr organ. [kg/ha]	11	9	21	16	14	0
- S-Abfuhr [kg/ha]	15	11	12	14	13	9
<b>S-Saldo [kg/ha]</b>	<b>-2</b>	<b>3</b>	<b>11</b>	<b>3</b>	<b>10</b>	<b>45</b>

## 3 Simulative Berechnung von Schwefel- und Stickstoffausträgen

Die Ergebnisse, der mit SULFONIE und HERMES durchgeführten Modellsimulationen werden als flächengewichtete jährliche Mittelwerte für den jeweiligen Zeitabschnitt berechnet. Bei einem Niederschlag von 781 mm/a beträgt die potenzielle Evapotranspiration nach Haude 468 mm/a. Die reale Evapotranspiration liegt aufgrund der begrenzten Wasserverfügbarkeit in den Sommermonaten rund 50 mm niedriger und beträgt etwa

1 Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e.V. ZALF, Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg

2 Agrometeorology Department of Agricultural University of Poznan, 60-660 Poznan, Poland

3 Universität Göttingen, Inst. f. Bodenwissenschaft, v. Sieboldstr. 6, 37075 Göttingen

420 mm/a. Die Differenz von etwa 360 mm/a zwischen Niederschlag und realer Verdunstung steht als Sickerwasserspende zur Verfügung.

Generell liegt die Sulfatkonzentration im Sickerwasser mit 15 bis 30 mg/L auf niedrigem Niveau und mit fallender Tendenz (Abb. 1). Die fallende Tendenz ist auf den zurückgehenden Abbau der organischen Substanz der Moore zurückzuführen. Die relativ niederschlagsarmen Jahre 1989 und 1996 haben kaum Auswirkungen auf die Sulfatkonzentration des Sickerwassers. Die Nitratkonzentration im Sickerwasser liegt in diesen Jahren jedoch besonders niedrig. In dem niederschlagsreichen Jahr 1998 haben der Stickstoffaustrag und die Nitratkonzentration im Sickerwasser einen Peak. Für Schwefel lässt sich eine erhöhte Auswaschungsrate jedoch nicht feststellen

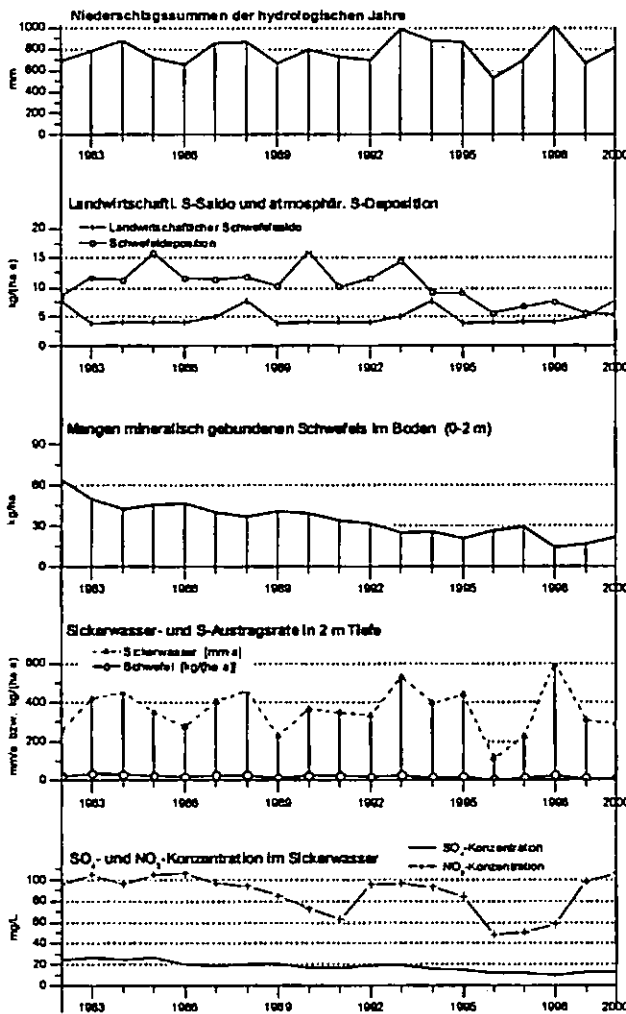


Abb. 1: Verlauf der jährlichen Werte für Niederschlag, atmosphärische Deposition, landwirtschaftlichen Schwefelsaldo sowie ausgewählter Werte der Simulations-Rechnungen 1982–2000 in Bramstedt. Werte als flächengewichtete Mittelwerte des Untersuchungsgebietes berechnet

Durch die Senkung der Depositionsrates sinkt der Saldo von landwirtschaftlicher Flächennutzung und atmosphärischer Deposition von 15 kg/(ha·a) auf 10 kg/(ha·a). Die Konzentration des Sulfats im Sickerwasser sinkt nur leicht von 16 auf 12 mg/L. Die Konzentration des Nitrats bleibt wegen der nur geringfügigen Änderung der atmosphärischen Deposition mit 83 mg/L fast unverändert.

#### 4 Schlussfolgerung

Die steigenden Sulfatgehalte im Grundwasser konnten wie folgt erklärt werden: Der Stickstoff-Bilanzüberschuss wird entweder gasförmig entbunden oder mit dem Sickerwasser abwärts verlagert. Dieses Nitrat dient als Sauerstoffquelle für die autotrophe Denitrifikation im anaeroben Bereich des Grundwasserleiters. Dabei werden mit Hilfe von Bakterien Eisensulfide ( $FeS_2$ ) in den pleistozänen Sanden mit Hilfe des Sauerstoffs aus dem Nitrat oxidiert. Das Nitrat wird dabei zu  $N_2O$  bzw.  $N_2$  reduziert. Für dieses Untersuchungsgebiet trägt die landwirtschaftliche Flächennutzung auf direktem Wege nicht zur Sulfatanreicherung des Grundwassers bei. Sie bewirkt lediglich auf indirektem Wege, aufgrund der geologischen Verhältnisse, eine Erhöhung der Sulfatgehalte in Grundwasser.

#### 5 Literatur:

EULENSTEIN, F. ; OLEJNIK, J. ; WILLMS, M. ; KERSEBAUM, K.-C. ; WERNER, A. (2003): Simulation des Stofftransports in der ungesättigten Zone. - In: Handbuch Wasserversorgung und Sulfatbelastung des Grundwassers unter land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen: 110-117; Karlsruhe (Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft).

EULENSTEIN, F. ; WILLMS, M. ; OLEJNIK, J. ; KERSEBAUM, K.-C. ; MEYER, B. ; WERNER, A. (2003): Schwefel in der Landwirtschaft. - In: Handbuch Wasserversorgung und Sulfatbelastung des Grundwassers unter land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen: 65-82; Karlsruhe (Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft)

WICHMANN, K. ; NUBER, T. ; EULENSTEIN, F. ; WILLMS, M. ; MEIBNER, R. ; RICHTER, G. (2003): Fallbeispiel Bramstedt. - In: Handbuch Wasserversorgung und Sulfatbelastung des Grundwassers unter land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen: 265-297; Karlsruhe (Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft).

## Auswirkung schwerer landwirtschaftlicher Maschinen auf die mechanische Stabilität

O. Fazekas, R. Horn

### Einleitung

Durch den zunehmenden Einsatz schwerer landwirtschaftlicher Maschinen rückt immer häufiger das Problem der Bodendeformation in den Vordergrund, was z.T. sehr kontrovers diskutiert wird. Je schwerer die Landmaschinen und je geringer die Bodenstabilität hierzu im Vergleich ist, um so tieferreichende und irreversible Gefügezerstörung können im Boden nachgewiesen werden mit allen Folgen auch für ein verändertes Porensystem und deren Funktionen. Somit werden auch der Wasser-, Wärme- und Lufthaushalt beeinflusst (Drescher et al., 1988).

Der Einsatz schwerer landwirtschaftlicher Maschinen, wie z.B. bei der Zuckerrübenenernte (Abb.1), führt nicht nur zu einer Erhöhung des stark plattigen Pflugsohlenbereichs, sondern trägt außerdem zu einer tieferreichenden Komprimierung und Plattenbildung in tieferen Horizonten bei (Horn et al., 2000).

Zur Vorhersage der Schadverdichtung stehen bodenphysikalische und -mechanische Parameter zur Verfügung.

### Material und Methoden

Das Versuchsfeld befindet sich in Harste / Niedersachsen, ca. 8 km nördlich von Göttingen. Auf dem Versuchsfeld wurde bis 1991 überall jährlich einheitliche Pflugbewirtschaftung mit einem Wendepflug bis 30 cm Tiefe durchgeführt. Zur Zuckerrübenenernte wurde ein schleppergezogener 1- oder 2- reihiger Köpfrödebunker mit einem Gesamtgewicht von 7 t verwendet.

Ab dem Jahr 1992 wurde an den festgelegten Parzellen konventionelle (Pflug, P), mit

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde,  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Hermann-Rodewald-Str. 2, D-24118 Kiel

e-mail: o.fazekas@soils.uni-kiel.de

Wendepflug bis 30 cm Tiefe, und konservierende (Mulch, M), mit Grubber bis ca. 8-10 cm Tiefe, Bodenbewirtschaftung durchgeführt.

Als Maschineneinsatz zur Zuckerrübenenernte wurde überall weiterhin der 1- oder 2- reihige Köpfrödebunker verwendet. Um die Wirkung eines schweren Rübenroders zu simulieren, wurde auf ausgewählten Parzellen für konventionelle und konservierende Bewirtschaftung eine erst- und einmalige Überrollung mit Holmer Terra Dos (Abb.1) durchgeführt (befahrene Fläche, b). Die Parzellen, die nicht mit Holmer Terra Dos belastet wurden, gelten als Kontrollflächen (unbefahren, ub).



Abb.1. Holmer Terra Dos (6-reihig), Gewicht halb beladen ca. 35 t

Bodentypologisch handelt es sich um eine Tschernosem-Parabraunerde aus Löß. Tabelle 1 informiert über einige bodenphysikalische Kenngrößen.

Tabelle 1. Bodenprofil aus dem Versuchsfeld

Tiefe [cm]	Horizont	Bodenart	Gefüge
0-30	Axp	U13	Krümel/Polyeder
30-50	Axh-A1	U13/4	Platten
>50	Axh-(Bt)	U14	Platten/Polyeder

Es wurden ungestörte Stechzylinderproben aus dem Oberboden (12 cm), unterhalb der Pflugsohle (35 cm) und aus dem Unterboden (60 cm) genommen und hieran die Lagerungsdichte nach 16 stündiger Trocknung (105°C) an 100 cm<sup>3</sup> und die Vorbelastung mit Ödometer an 236 cm<sup>3</sup> Stechzylindern bestimmt.

### Ergebnisse und Diskussion

Im Oberboden ist die Lagerungsdichte (dB) (Abb.2) nach der Befahrung höher, wohingegen

die Vorbelastung abnimmt (Abb.3). Aufgrund der Knetung während der Befahrung werden die Partikel zusammengeschoben und es kommt, besonders bei feuchten Bodenbedingungen, zur Partikeleinregelung, verbunden mit einer Stabilitätsminderung.

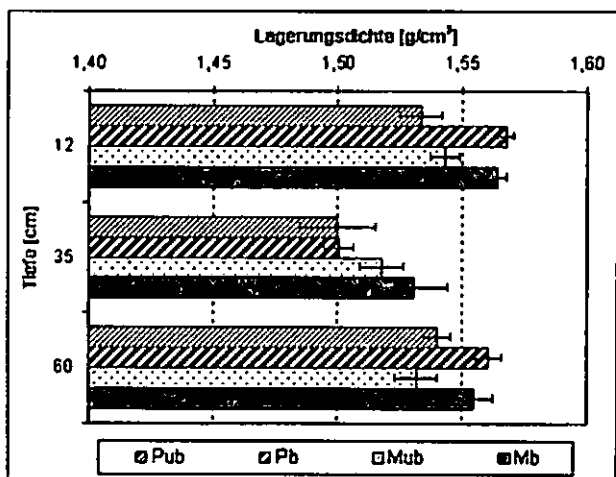


Abb.2: Lagerungsdichte in unterschiedlichen Tiefen (die Balken bedeuten die Standardfehler bei n=24)

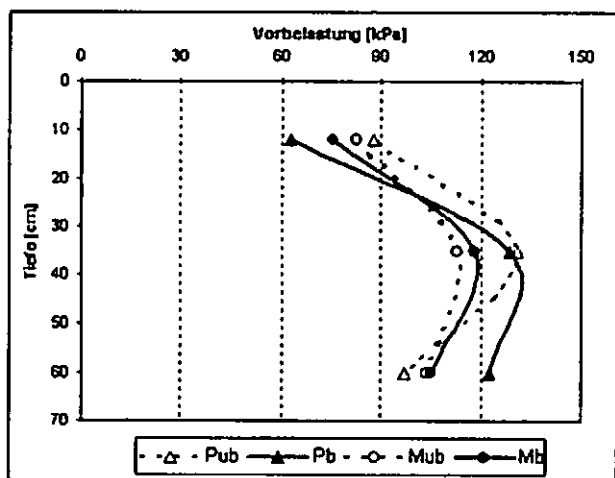


Abb.3: Vorbelastung in unterschiedlichen Tiefen

Unterhalb der Pflugsohle weist die Pflugvariante eine kleinere dB als die Mulchvariante auf (Abb.2); bei der Vorbelastung ist es umgekehrt (Abb.3). Bei der dB sind keine Unterschiede zwischen Pub und Pb festzustellen im Gegensatz zu Mub und Mb, da die ehemalige Pflugsohle bei der Mulchvariante nicht mehr so stark ausgeprägt ist, wie bei der Pflugvariante. Durch die Mulchbearbeitung wurde über die Zeit eine Bodenregeneration begünstigt. Dies hat zur

Folge, dass auftretende Spannungen bei der Mulchvariante stärker abgepuffert werden.

Im Unterboden nimmt die dB (Abb.2) bei beiden Bewirtschaftungen zu. Die Vorbelastungen (Abb.3) sind bei Mub, Mb und Pub ähnlich; allerdings steigt der Wert bei Pb. Möglicherweise ist in der Pflugsohle die schon stark verdichtete Plattenstruktur durch eine erstmalige Befahrung mit schweren Maschinen aufgebrochen worden, wodurch es in der Folge nunmehr zu einer tiefer wirkenden Verdichtung kommt.

### Zusammenfassung

- Die ehemalige Pflugsohle (bis 1991) ist bei der Mulchvariante bis heute sehr ausgeprägt, obwohl schon ein Regenerierungsprozess erkennbar ist.
- Durch einen Knetvorgang im Oberboden findet eine Stabilitätsminderung statt, wobei die Lagerungsdichte zunimmt.
- Durch eine Befahrung werden die Spannungen bei der Milchvariante im ehemaligen Pflugsohlenbereich kontinuierlich tiefer geleitet, bei der Pflugvariante wird die Pflugsohle aufgebrochen, welches zu einer Stabilitätsminderung führt.
- Durch das Aufbrechen der Pflugsohle (Pb) findet eine tieferegreifende Bodenverdichtung statt.

### Danksagung

Wir danken dem Institut für Zuckerrübenforschung Göttingen für die Ermöglichung dieser Untersuchungen auf dem Versuchsfeld.

Die erste Autorin bedankt sich bei der Konrad-Adenauer-Stiftung für die großzügige finanzielle Unterstützung.

### Weiterführende Literatur

- Drescher, J., R. Horn and M. de Boodt (1988). Interaction of structured soils with water and external forces.
- Horn, R., J. J. H. van den Akker and J. Arvidsson, Eds. (2000). Subsoil compaction: Distribution, processes and consequences. Advances in GeoEcology. Reiskirchen, Catena.

# Veränderung von Porenfunktionen unterschiedlicher Böden nach Überschreitung ihrer mechanischen Stabilität

S. Gebhardt\*, H. Fleige\*, R. Horn\*

## 1 Einleitung

Unterschiedliche Böden Schleswig-Holsteins wurden untersucht um Auswirkungen einer mechanischen Belastung auf das Porensystem und auf Porenfunktionen zu erfassen. Bei Belastungen unterhalb der Vorbelastungswerte ist mit keiner wesentlichen Veränderung des Porensystems zu rechnen, da hier ein elastisches Verhalten des Bodens vorliegt und die resultierende Verformung also reversibel ist. Eine Überschreitung der Vorbelastung führt jedoch neben einer irreversiblen Bodenverformung, also Veränderungen im Porensystem, zu einer unterschiedlich ausgeprägten Beeinflussung von Porenfunktionen.

## 2 Material und Methoden

Die vorliegenden Arbeiten wurden an ungestörten Stechzylinderbodenproben, die aus drei unterschiedlichen Böden der naturräumlichen Einheit Heide-Itzehoe Geest entnommen wurden, durchgeführt. Dabei handelt es sich um den Go-Horizont eines Moorgleys aus lehmiger Torfmudde (Standort 1), einen Aa-Horizont eines Anmoorgleys aus lehmigen Auensanden (Standort 2) und um den Ahe-Horizont eines Eisenhumuspodsols aus Geschiebe(deck)sand (Standort 3, s. Tab. 1).

Tab. 1: Eigenschaften der untersuchten Substrate

Standort	Bodenart	$\rho_t$ [g/cm <sup>3</sup> ]	C-org. [%]	Pv* [kPa]	GPv [%]	wGp	cGp	Mp [%]	Fp
						> 50 $\mu$ m	50 - 10 $\mu$ m		
1	L12	0,61	19,1	< 50	74	4	4	24	42
2	Sl3	1,14	8,9	50	57	7	7	36	7
3	mSfs	1,22	2,1	70	54	34	6	10	4

### • Vorbelastung

Die aus den jeweiligen Bodenprofilen entnommenen ungestörten, d.h. in einem Stechzylinder befindlichen Bodenproben sind nach vollständiger Aufsättigung auf eine Wasserspannung von -60 hPa entwässert worden.

Nachdem an allen Bodenproben zunächst die Luftleitfähigkeit bestimmt wurde (Bestimmung des durch den Stechzylinder hindurch fließenden Luftvolumens pro Zeiteinheit bei einem Luftdruckgradienten von 1hPa), wurden die Proben mit Hilfe einer einaxialen

Ödometeranlage mit unterschiedlichen Auflasten jeweils 15 Stunden lang belastet. Während der Belastung liegen drainierte Bedingungen vor; über poröse Sintermetallplatten ist bei Porenwasserüberdrücken ein Entweichen von Wasser möglich. An allen Proben wurde anschließend erneut die Luftleitfähigkeit bestimmt. Nach erneuter Aufsättigung, wurde an einem Teil der Proben die gesättigte Wasserleitfähigkeit mit Hilfe eines Haubenpermeameters unter instationären Bedingungen bestimmt, während der andere Teil der Proben genutzt wurde, um Wasserspannungskurven zu erstellen. Um das nach der Drucksetzung und im weiteren Verlauf der Erstellung der pF-Kurve veränderte Bodenprobenvolumen exakt erfassen zu können, ist nach jeder pF-Stufe außerdem mit Hilfe einer Schieblehre an acht Punkten an der Oberfläche jeder Bodenprobe die Volumenänderung bestimmt worden.

## 3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Setzungsverhalten

Die großen Unterschiede in Bodenart und Gehalt an organischer Substanz der drei untersuchten Böden sind bedingt durch ihre sehr unterschiedliche Entstehung. Sie ist auch der Grund für die entsprechenden Unterschiede in Trockenrohdichte, Porenvolumen, Porengrößenverteilung und Vorbelastung (vgl. Tab. 1). Abbildung 1 zeigt die von diesen Eigenschaften hervorgerufene Setzungsempfindlichkeit der drei Böden.

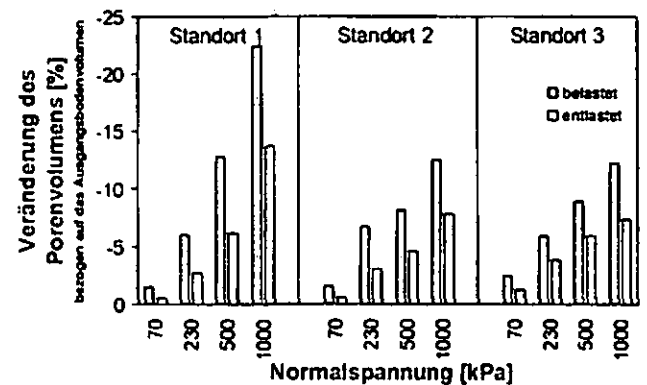


Abb. 1: Veränderung des Porenvolumens der untersuchten Substrate nach Belastung mit unterschiedlichen Auflasten (n=3, arithmetischer Mittelwert)

Deutlich zu erkennen ist die hohe Setzungsempfindlichkeit des durch eine sehr geringe Trockenrohdichte und ein hohes Porenvolumen gekennzeichneten Substrats von Standort 1, das jedoch aufgrund seines hohen Anteils an Ton und organischer Substanz einen erheblichen elastischen Anteil an der jeweiligen maximalen Gesamtverformung hat. Die beiden Sande zeigen keine wesentlichen Unterschiede in ihrem Setzungsverhalten.

\*Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Olshausenstr. 40, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 24118 Kiel



### 3.2 Veränderungen von Porengrößenverteilungen durch mechanische Spannungen

Neben einer Reduzierung des Gesamtporenvolumens haben auf einen Boden wirkende mechanische Belastungen große Auswirkungen auf die Porengrößenverteilung. Einerseits kommt es zu einer Reduktion von nur bestimmten Porengrößenklassen, andererseits aber auch zu einem Anstieg bestimmter Porengrößen auf Kosten anderer gegenüber mechanischer Belastung weniger resistenten Poren, also zu einer Umverteilung innerhalb des Porensystems.

Da der Anteil der Feinporen innerhalb des Gesamtporenvolumens ausschließlich texturbedingt ist, ist im Folgenden lediglich die Veränderung der weiten Grobporen, der engen Grobporen, sowie der Mittelporen betrachtet worden. Der Feinporenanteil ist jedoch bei jeder Gesamtporenvolumenabnahme von einer relativen Zunahme betroffen.

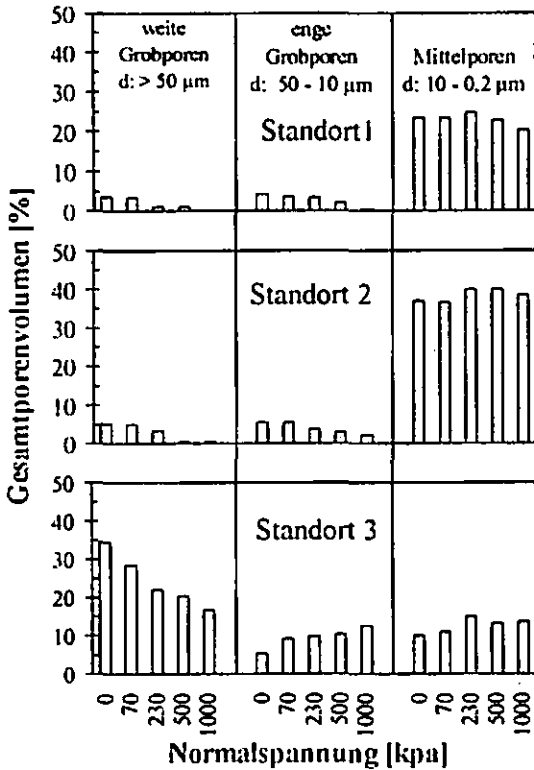


Abb. 2: Veränderung der Porengrößenverteilung der untersuchten Substrate nach Belastung mit unterschiedlichen Auflasten (n=3, arithmetischer Mittelwert)

Mit zunehmender Belastung verlieren Standort 1 und 2 einen Großteil ihrer Makroporosität, während bei Standort 3 eine Umverteilung innerhalb des Makroporensystems stattfindet (Abb. 2). Der Mittelporenanteil der untersuchten Substrate scheint auch bei hohen Auflasten nicht wesentlich von Veränderungen betroffen zu sein, eine weiter unterteilte pF-Kurve wäre jedoch wünschenswert, um kleinere Porengrößenbereiche gesondert betrachten zu können.

### 3.3 Einfluss von mechanischen Spannungen auf Leitfähigkeiten

Obwohl bei kleineren Auflasten die Änderungen im Porensystem noch verhältnismäßig gering ausfallen, findet relativ schnell eine erhebliche Abnahme der Leitfähigkeiten statt, da zuerst nur die offensichtlich besonders empfindlich reagierenden kontinuierlichen Makroporen kollabieren (Abb. 3 und 4).

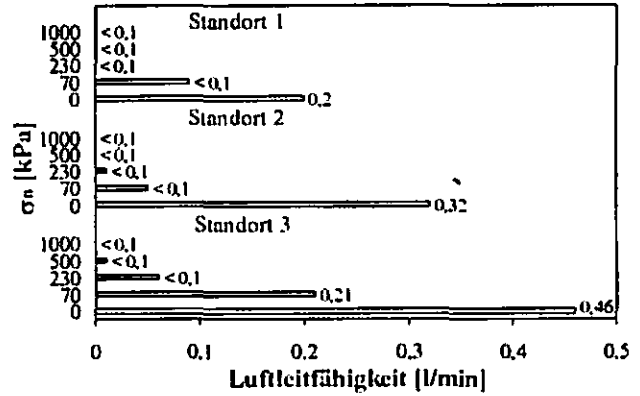


Abb. 3: Veränderung der Luftleitfähigkeit der untersuchten Substrate nach Belastung mit unterschiedlichen Auflasten (n=5, geometrischer Mittelwert)

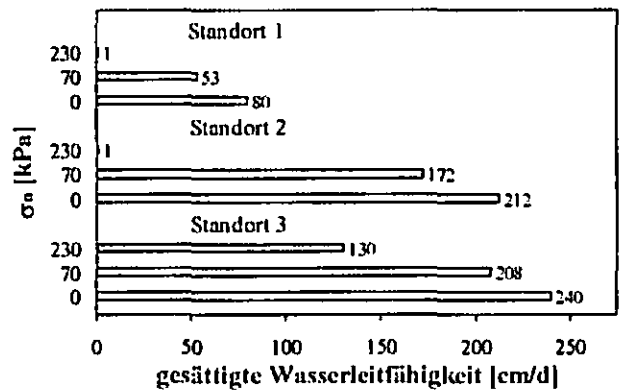


Abb. 4: Veränderung der gesättigten Wasserleitfähigkeit der untersuchten Substrate nach Belastung mit unterschiedlichen Auflasten (n=5, geometrischer Mittelwert)

### 4 Schlussfolgerungen

Die Veränderung von Porenfunktionen als Reaktion auf mechanische Belastungen sind erwartungsgemäß bei der feinkörnigeren Torfmudde wesentlich stärker ausgeprägt als bei den sandigen Substraten. Von großer Bedeutung für die Veränderung von Porenfunktionen ist nicht allein die Ausprägung des Makroporenvolumens, sondern der Anteil an kontinuierlichen Makroporen. Eine mechanische Belastung führt relativ schnell zum kollabieren dieser Poren und eine erhebliche Verringerung der Leitfähigkeiten ist die Folge.

Zusätzliche Untersuchungen an weiteren Substraten zusammen mit der Erstellung genauerer pF-Kurven sind nötig, um die Auswirkungen von mechanischen Belastungen auf das Porensystem und die daraus resultierenden Änderungen von Porenfunktionen besser verstehen zu können.

# Abschätzung mobilisierbarer Schadstoffvorräte und des Schadstoffverteilungsverhaltens aus multiplen Schüttelversuchen

## II. Anwendung

N. Gronwald, I. Andrá, S. Iden und W. Durner<sup>1</sup>

### Einleitung

Die Beurteilung des Gefährdungspotenzials von kontaminierten Böden und aufzubringenden Materialien im Hinblick auf eine Kontamination des Grundwassers erfordert im Rahmen der Sickerwasserprognose eine Quellstärkebestimmung. Diese basiert zur Zeit auf Extraktionsverfahren wie dem Bodensättigungsextrakt (BoSE) oder dem S4-Eluat nach DIN. Wie sich in der Praxis gezeigt hat, liefern Versuche mit unterschiedlichen Wasser-Feststoff-Verhältnissen (W/F) unterschiedliche Schadstoffkonzentrationen, deren Zusammenhang bislang empirisch über Regressionsverfahren beschrieben wird. In diesem Beitrag präsentieren wir die Ergebnisse von multiplen Schüttelversuchen mit dem Ziel, allein aus Messungen der Konzentration in der Flüssigphase auf die an der Festphase sorbierten mobilisierbaren Vorräte des Schadstoffs, auf das Verteilungsverhalten (Desorptionsisotherme), sowie die Schadstoffkonzentration bei in-situ-typischen Wasser-Feststoff-Verhältnissen rückzuschließen.

### Material und Methoden

Die im Beitrag Iden und Durner (2005) vorgestellte Auswertemethodik wurde in einer 3-stufigen Vorgehensweise untersucht: 1) Test des Verfahrens an synthetischen Messdaten (Iden und Durner, 2005), 2) Test an Daten aus einem kontrollierten Laborexperiment und 3) Anwendung für ein real kontaminiertes Substrat. Zur Herstellung eines wohldefinierten Ausgangsmaterials für 2) wurde ein mittelschluffiger Sand (Su<sub>3</sub>) in zwei 1-m lange Glassäulen gepackt und so lange mit einer 10mg/l Brilliant-Blue FCF-/2mM CaCl<sub>2</sub>-Lösung gespült, bis die Konzentration im Perkolat gleich der Konzentration im Infiltrat war. Dann wurde der Boden getrocknet und anschließend homogenisiert. Als real kontaminiertes Substrat (3) haben wir eine schwermetallkontaminierte Hausmüllverbrennungssasche (HMVA) untersucht, die als Referenzmaterial im Förderverbund „Sickerwasserprognose“ des BMBF eingesetzt wurde.

Wir unterscheiden bei den multiplen Schüttelversuchen zwei experimentelle Designs. Das erste Design besteht in einer parallelen Durchführung mehrerer Elutionen bei unterschiedlichen Wasser-Feststoff-Verhältnissen. Hierzu haben wir mehrere Schüttelversuche mit unterschiedlichen W/F-Verhältnissen (1:1, 2:1, 10:1, 100:1 und 1000:1) angesetzt und jeweils die Konzentration im Eluat bestimmt. Die Versuchsdurchführung erfolgte in Anlehnung an die Spezifikation in der DIN 38141-S4, mit Modifikationen im Hinblick auf die verwendete Elutionslösung und die Bodenmengen. Das zweite Design ist eine sequenzielle Elution (Kaskadelenution). Das zu untersuchende Material wurde entsprechend einem Trockengewicht von 100g in 1000ml PE-Flaschen eingewogen und mit 1000 ml des gewählten Elutionsmittels aufgefüllt. Dann wurden in fünf Kaskaden jeweils 750 ml Eluat abgezogen und anschließend wieder 750ml des gleichen Elutionsmittels aufgefüllt. Für jede Kaskade wurde die Konzentration im Eluat bestimmt. Zur Validierung unserer Auswertemethodik haben wir Bodensättigungsextraktionen durchgeführt (W/F = 0,3) Als Elutionsmittel haben wir bei beiden Designs eine 2mM CaCl<sub>2</sub>-Lösung gewählt. Alle Bestimmungen wurden in 3 Parallelen durchgeführt.

### Ergebnisse und Diskussion

Wir stellen exemplarisch Ergebnisse für den parallelen Versuchsansatz für Brilliant Blue und für beide Ansätze für Kupfer vor. Abbildung 1 (oben) zeigt für Brilliant Blue die gemessenen Konzentrationen bei den verschiedenen W/F, deren Modellierung unter Annahme einer linearen Sorptionsisotherme, sowie die Schätzungen der Parameter mobilisierbarer Vorrat  $S_0$ , BoSE-Konzentration (angenommen als Konzentration bei einem W/F von 0,3) und Sorptionsisotherme. Die grauschattierten Bereiche zeigen 95%-Vertrauensintervalle, die senkrechten Linien in der BoSE-Abbildung entsprechen real gemessenen Werten. Die Übereinstimmung zwischen Messung und Modellvorhersage ist gut. Der mobilisierbare Vorrat und die BoSE-Konzentration lassen sich mit geringer Unsicherheit aus dem parallelen Experiment schätzen. Tabelle 1 listet die zugehörigen Werte.

Die für den Fall der linearen Isotherme für den Farbtracer Brilliant Blue gemachten Aussagen gelten auch für den Fall des Schwermetalls Kupfer. Abbildung 1 (Mitte) zeigt, dass Kupfer kaum sorbiert und mit zunehmender Verdünnung stark abfällt. Mit dem zugrundeliegenden Modell wird wiederum eine gute Anpassung an die Messdaten. Der mobilisierbare Vorrat kann mit moderater Unsicherheit abgeschätzt werden, im Vergleich mit den von der BAM gemessenen Gesamtgehalten scheint aber nicht mal 0,1% des gesamten Kupfers im Boden mobilisierbar zu sein. Bei der Vorhersage des BoSE-Wertes werden die direkt

<sup>1</sup> Technische Universität Braunschweig, Institut für Geoökologie, Langer Kamp 19c, 38106 Braunschweig. E-mail n.gronwald@tu-bs.de

Tab. 1: Unsicherheitsanalyse der Größen mobilisierbarer Vorrat und vorhergesagte BoSE-Konzentration

Größe	Direkt gemessener Wert <sup>1)</sup>	Geschätzt aus Schüttelvers. <sup>2)</sup>
Mob. Vorrat BB	29,2 mg/kg < S <sub>0</sub> < 34,7 mg/kg	33,7 < S <sub>0</sub> < 39,9
Mob. Vorrat Cu-Parallel	1000 mg/kg < m <sub>0</sub> < 2000 mg/kg <sup>3)</sup>	750 µg/kg < S <sub>0</sub> < 806 µg/kg
Mob. Vorrat Cu-Kaskade		929 µg/kg < S <sub>0</sub> < 1089 µg/kg
BoSE-Wert BB	1,9 mg/l < C <sub>BoSE</sub> < 2,7 mg/l	0,9 < C <sub>BoSE</sub> < 2,8
BoSE-Wert Cu-Parallel	1998 µg/l < C <sub>BoSE</sub> < 2003 µg/l <sup>3)</sup>	2411 µg/l < C <sub>BoSE</sub> < 2709 µg/l
BoSE-Wert Cu-Kaskade		1633 µg/l < C <sub>BoSE</sub> < 2680 µg/l

<sup>1)</sup> Bereich der 3 Wiederholungen    <sup>2)</sup> 95%iges-Vertrauensintervall der Modellvorhersage    <sup>3)</sup> Gesamtgehalte (gemessen von der BAM, 2003)

gemessenen Kontrollwerte nicht getroffen, aber die Größenordnungen stimmen. Die Unsicherheiten in der Bestimmung des Verteilungsverhaltens von Kupfer sind sehr groß.

In Abb. 1 (unten) sind die Ergebnisse der Kaskadenelution für 5 Elutionsschritte dargestellt. Auch hier trifft das angepasste Modell die gemessenen Konzentrationen sehr gut. Der mobilisierbare Vorrat wird mit moderater Unsicherheit geschätzt, liegt allerdings höher als im parallelen Vergleichsansatz. Die gemessenen BoSE-Werte liegen diesmal im 95%igen-Vertrauensintervall, das Verteilungsverhalten wird mit einer geringeren Unsicherheit geschätzt als im parallelen Vergleichsdesign.

Zusammenfassend zeigen die Resultate aus den Labor-experimenten, dass einfach und schnell durchzuführende Schüttelversuche die Abschätzung von an der Festphase sorbierten mobilisierbaren Vorräten eines Schadstoffs prinzipiell ermöglichen, wobei allein Konzentrationsmessungen in der Flüssigphase benötigt werden. Die Auswertung ist an Annahmen gebunden (Iden und Durner, 2005), die in der Transportmodellierung üblicherweise als gegeben angesehen werden, im Laborversuch jedoch hinterfragt werden müssen. Der naturwissenschaftlich begründete Rückschluss von Schüttelversuchen auf eine BoSE-Konzentration ist möglich, wenn die physikalischen Vorgänge beim Schütteln (Abrasion etc.) die effektive Schadstoffverteilung nicht grundlegend verändert.

**Dank**

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung förderte diese Arbeit im Rahmen des Teilprojekts 02WP0299 im Verbundprojekt Sickerwasserprognose.

**Literatur**

Iden, S. und W. Durner (2005) Abschätzung mobilisierbarer-Schadstoffvorräte und des Schadstoffverteilungsverhaltens aus multiplen Schüttelversuchen I. Experimentelles Design und Parameteridentifikation, Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, diese Ausgabe.

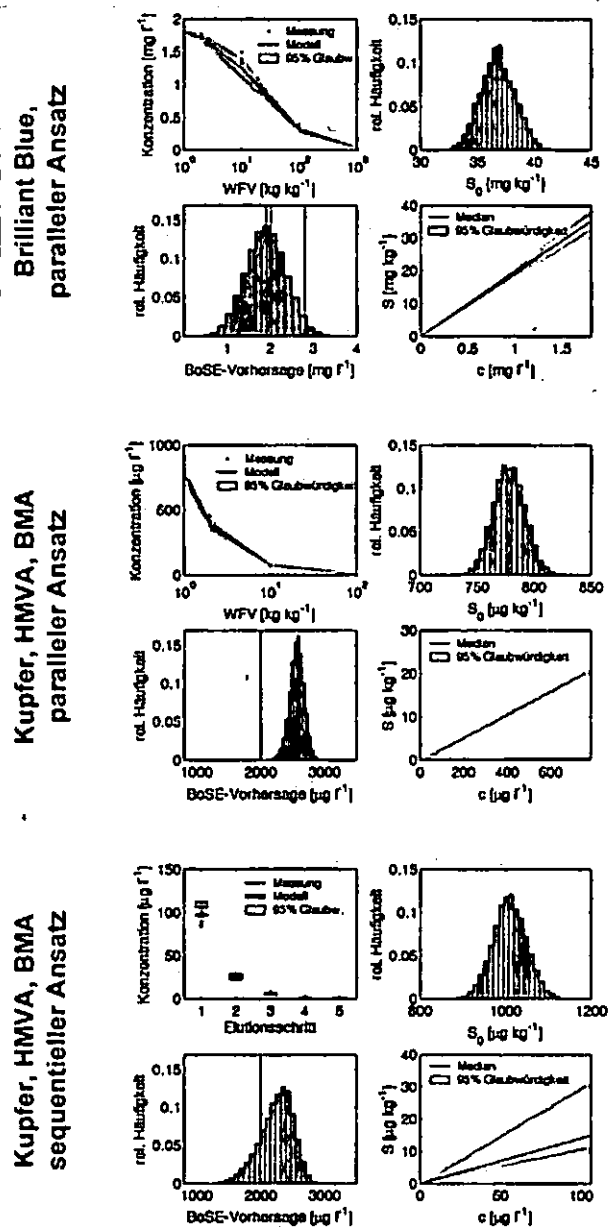


Abb. 1: Unsicherheitsanalyse der Größen mobilisierbarer Vorrat S<sub>0</sub> [mg/kg] und vorhergesagte BoSE-Konzentration [mg/l] bzw. [µg/l]. Die parallelen Ansätze umfassen die Verdünnungen 1:1, 2:1, 10:1, 30:1 und 100:1. Im kontrollierten Laborexperiment wurde bis zu einem Wasser-Feststoff-Verhältnis von 1000:1 verdünnt.

## Offene Fragen zur nFK von natürlichen und anthropogenen Böden

Tamas Harrach<sup>1</sup> und Thomas Vorderbrügge<sup>2</sup>

Wichtige Prozesse des Wasser- und Stoffhaushaltes im Boden und in der Landschaft werden von der Speicherkapazität des Bodens für pflanzenverfügbares Wasser (nFK) beeinflusst. Da Messwerte oft nicht vorliegen, werden für eine Vielzahl von Fragestellungen der angewandten Bodenkunde und des Bodenschutzes die benötigten Kennwerte mit Hilfe der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA) bzw. DIN 4220 geschätzt. Entsprechende Schätzwerte werden vielfach auch in den unterschiedlichsten bodenkundlichen und landschaftsökologischen Modellen verwendet.

Im Februar 2005 ist die überarbeitete Norm DIN 4220 „Bodenkundliche Standortbeurteilung – Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten (normative und nominale Skalierungen)“ als Entwurf veröffentlicht worden (Beuth Verlag Berlin: [www.beuth.de](http://www.beuth.de)). Hauptziel der Überarbeitung war die Anpassung an die KA 5, welche in Kürze erscheinen soll.

Offene Fragen ergeben sich nun dadurch, dass viele Angaben in DIN 4220 – Entwurf – zu wichtigen Kennwerten des Bodengefüges nicht plausibel erscheinen bzw. in Widerspruch zu bekannten Gesetzmäßigkeiten stehen. Auf ähnliche Ungereimtheiten wurde übrigens auch für die KA4 hingewiesen (Vorderbrügge 1997).

### Mittlere nFK der Bodenarten

Tabelle 31 der DIN 4220 – Entwurf – beinhaltet u.a. Angaben zur mittleren nutzbaren Feldkapazität in Abhängigkeit von Bodenart und Trockenrohdichte. Aus dieser Tabelle haben wir die Angaben zur nFK der einzelnen Bodenarten bei mittlerer Trockenrohdichte in ein Bodenartendiagramm übertragen, um die Werte auf Plausibilität zu prüfen. Erwartungsgemäß haben die Schluffe die höchste nFK (20,9 bis 25,6 Vol.%) und die meisten Tone erheblich weniger (11,8 bis 14,4 Vol.%). Nur für den Tu4 werden 17,1 Vol.% angeführt. Es überrascht jedoch sehr, dass die niedrigsten Werte nicht für Sande, sondern mit 11,8 Vol.% für Tu2 und Lt3 angegeben werden. Gemäß Tabelle 31 verfügen Sande über eine nFK von 15,6 (Ss) bis 23,1 Vol.% (Su4), während für die Lehme nur 11,8 (Lt3) bis 17,0 (Lu) Vol.% ausgewiesen werden.

Viele Bt-Horizonte hessischer Parabraunerden, auf denen sehr hohe Zuckerrübenenerträge erzielt werden, hätten nach DIN 4220 bei der Bodenart Tu3 eine nFK von nur 13,0 %, während für Sande (Ss), die allgemein als Grenzertragsböden gelten, 15,6 Vol.% genannt werden. Das ist wirklichkeitsfern.

Ebenso unverständlich ist, dass z.B. ein „milder Lößlehm“, der bodenartlich als Lu oder Tu4 einzustufen ist, über eine

nFK von nur 17,0 bzw. 17,1 Vol.%, während ein Spargelboden mit der Bodenart Su2 sogar über 17,7 Vol.% verfügen soll.

### Einfluss der Lagerungsdichte auf die Kenngrößen

Während in der KA 4 zur Kennzeichnung der Kompaktheit bzw. Lockerheit des Bodens die „effektive Lagerungsdichte“ benutzt wird, verwendet die DIN 4220 – Entwurf – unglücklicherweise hierfür undifferenziert die Trockenrohdichte, obwohl bekannt ist, dass die gleiche Stufe für die Dichte je nach Tongehalt unterschiedlich zu interpretieren ist. So weisen beispielsweise Sande per se höhere Rohdichten als Lehme oder Tone auf.

Betrachtet man in Tabelle 31 die Luftkapazität (LK) der einzelnen Bodenarten für die drei Dichteklassen ( $< 1,4 / 1,4 - 1,6 / > 1,6$ ), so fallen vielfach zu geringe Unterschiede bei unterschiedlicher Dichte auf. In Wirklichkeit hat jede Dichteänderung immer deutlichen Einfluss auf die LK.

Wenn die Böden aufgrund ihrer Kompaktheit/Lockerheit in drei Kategorien eingeteilt werden sollen, dann müssten in die erste Spalte alle ausgesprochen lockeren Böden fallen, die leicht als locker zu identifizieren sind. Solche Böden haben auch bei feiner Körnung eine LK von mindestens 10 oder 12 Vol.%. In die zweite Spalte sollten alle Bodenhorizonte gehören, die nicht ausgesprochen locker und nicht deutlich dicht sind. Gemeint sind damit z.B. die meisten Unterbodenhorizonte von Braunerden und Parabraunerden, die durchwurzelbar sind und keine Staunässe aufweisen. Für die dritte Spalte verblieben Böden mit deutlicher Dichtelagerung. Feinkörnige Böden weisen in dieser Kategorie immer eine geringe LK (etwa  $< 5$  Vol.%) auf. Als Instrumente für diese Unterteilung stehen die effektive Lagerungsdichte nach KA 4 und die Packungsdichte nach DIN 19682-10 zur Verfügung.

Nach Tabelle 31 von DIN 4220 – Entwurf – nimmt die nFK mit zunehmender Trockenrohdichte ohne Ausnahme ab. Dies steht in Widerspruch zu den bekannten Gesetzmäßigkeiten der Porenverteilung bei Verdichtung bzw. Lockerung von Böden (Hartge 1965, Rohdenburg, H. & Meyer, B. 1966, Dumbeck & Harrach 1985, Dumbeck 1986, Scheffer/Schachtschabel 2002, S. 200). Nach diesem Kenntnisstand nehmen in einem Boden mit zunehmender Dichte die Feinporen a priori zu, aber auch die Mittelporen nehmen immer zu, auch wenn in manchen Böden der Anteil an groben Mittelporen etwas abnehmen kann (Dumbeck 1986). Unterschiedlich verhalten sich die engen Grobporen, die teils ab und teils zunehmen. Nach unserer Erfahrung wird der Anteil an engen Grobporen vor allem vom Feinsandgehalt bestimmt, während die Lagerungsdichte drauf relativ geringen Einfluss hat. Im Endeffekt nehmen sowohl nFK als auch FK bei starker Abnahme der LK mit zunehmender Dichte des Bodens eher zu, was auch durch die praktische Erfahrung bestätigt wird. Durch Walzen des Bodens vergrößert sich der wasserführende Querschnitt, weshalb die kapillare Leitfähigkeit steigt. Mit Lockerung wird bekanntlich der umgekehrte Effekt erzielt.

Feinsande, Mittelsande und Grobsande werden in Tab. 31 gesondert aufgeführt. Hier fällt die sehr hohe nFK bei geringer Dichte ( $< 1,4$ ) auf, die für den Grobsand mit 21,7 Vol.% angegeben wird. Dies muss als eklatanter Fehler bezeichnet werden. Eine so hohe nFK ist eventuell bei

<sup>1</sup> Tamas Harrach, Inst. für Bodenkunde und Bodenerhaltung der JLU Giessen, [tamas.harrach@agr.uni-giessen.de](mailto:tamas.harrach@agr.uni-giessen.de)

<sup>2</sup> Thomas Vorderbrügge, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, [t.vorderbruegge@hlug.de](mailto:t.vorderbruegge@hlug.de)

humusreichen Grobsanden vorstellbar, aber diese Tabelle sollte nur für Böden mit Humusgehalten < 1% gelten, denn Zuschläge bei höheren Humusgehalten gibt Tabelle 32 an.

Schließlich zeigt Tabelle 31 die FK in Abhängigkeit von Bodenart und Trockenrohddichte an. Entgegen den bereits beschriebenen Gesetzmäßigkeiten der Porenverteilung nimmt in dieser Tabelle die FK mit zunehmender Dichte stets ab, wobei die Abnahme deutlich stärker ist als die gleichzeitige Abnahme der nFK. Da die Differenz von FK und nFK dem Feinporenanteil („Totwasser“) entspricht (s. auch Fußnote in Tab. 31), geht DIN 4220 – Entwurf – davon aus, dass der Feinporenanteil mit zunehmender Dichte deutlich abnimmt. Dies ist aber definitiv falsch und die ganze Tabelle unhaltbar.

#### Definition der Feldkapazität

DIN 4220 – Entwurf – definiert die Feldkapazität im Abschnitt 5.2.12.2 als „...Wassermenge, die ein nahezu gesättigter Boden nach ein bis zwei Tagen gegen die Schwerkraft zurückhalten vermag. Im Laboratorium wird die Feldkapazität...bei Wasserspannung  $pF = 1,8$  bestimmt...“ Diese Definition entspricht nicht dem Kenntnisstand der Bodenphysik (Hartge & Horn 1999, Bohne 1992). Ein bis zwei Tage Wartezeit sind bei den meisten Böden nicht ausreichend, um die Wassermenge zu bestimmen, die der Boden für die Vegetationszeit zu speichern vermag, da der Sickerungsvorgang länger andauert (Bohne 1992). Falls sich diese Regelung in NW-Deutschland bewährt haben soll, bedeutet dies noch nicht, dass sie sich auf die niederschlagsärmeren Gebiete sinnvoll übertragen lässt.

Die undifferenziert generelle Festlegung der Feldkapazität bei  $pF 1,8$  erscheint daher nicht sinnvoll.

#### Effektive Durchwurzelungstiefe

Der am häufigsten benötigte Kennwert zum Wasserhaushalt des Bodens ist die nutzbare Feldkapazität des Wurzelraumes. Das Konzept zur Bestimmung der nFKWe ist überzeugend. Bedauerlich ist jedoch, dass die nFKWe nur selten gemessen, sondern meistens geschätzt wird. Dafür soll Tabelle 41 in DIN 4220 – Entwurf – die Grundlage sein, die die mittlere effektive Durchwurzelungstiefe (We) homogener Böden in Abhängigkeit von der Trockenrohddichte angibt. Nach dieser Tabelle zeigt We eine recht große Variabilität je nach Bodenart und deutlich geringere Unterschiede in den drei Trockenrohddichtestufen. Dies entspricht nicht der praktischen Erfahrung.

Es ist zwar richtig, dass Sandböden im Durchschnitt nicht so tief durchwurzelt werden wie Lößlehm Böden, aber die Differenzierung nach der Dichte ergibt ein anderes Bild. Lockere Sandböden mit Trockenrohddichten < 1,4 werden unter sonst gleichen Voraussetzungen tiefer durchwurzelt als Lehme oder Schluffe, um die Wasserversorgung der Pflanzen sicherzustellen. Bei stark verdichteten Böden wiederum bestimmt nicht die Bodenart, sondern der Verdichtungsgrad die Durchwurzelbarkeit des Bodens. Die Trockenrohddichte in Stufen ist aber ein völlig ungeeignetes Mittel, den Verdichtungsgrad unterschiedlicher Bodenarten zu kennzeichnen.

Schließlich sei bemerkt, dass die We auch vom Klima abhängt und in Trockengebieten erheblich größere Werte gemessen werden als die Schätzwerte nach Tabelle 41 (Sauer et al. 2002).

Die nFKWe ist eine äußerst wichtige und sehr häufig benötigte Kenngröße des Bodens. Die Tabelle 41 in DIN 4220 ist jedoch leider keine geeignete Grundlage, sie sachgerecht zu schätzen.

#### Schlussfolgerungen

Die wichtigsten offenen Fragen lauten:

1. Ist die generelle Festlegung der Feldkapazität auf  $pF 1,8$  akzeptabel?
2. Sind die Angaben von DIN 4220 zur nFK der Bodenarten plausibel?
3. Sind die Zusammenhänge zwischen Rohddichte und Porengrößenverteilung gemäß DIN 4220 plausibel?
4. Sind die Angaben von DIN 4220 zur Mächtigkeit des effektiven Wurzelraumes akzeptabel?

Da wir die Fragen mit einem klaren Nein beantworten müssen, werden wir Einspruch gegen die entsprechenden Abschnitte von DIN 4220 (Entwurf von Februar 2005) beim Deutschen Institut für Normung e.V. ([www.din.de](http://www.din.de)) einlegen.

Es darf nicht sein, dass z.B. Ingenieurbüros, die als Auftragnehmer verpflichtet sind, nach der Bodenkartierung bzw. nach DIN 4220 zu arbeiten, wider besseres Wissen mit falschen Werten für die nFK arbeiten müssen.

#### Literatur

- Bohne, K. (1992): Methoden zur Berechnung der Feldkapazität und des Gravitationswasserabflusses auf der Basis der Fleißtheorie. Mitt. Dtsch. Bdkl. Ges. 68, 33-36.
- Dumbeck, G. (1986): Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. Diss. Gießen.
- Dumbeck, G. & Harrach, T. (1985): Porenverteilung bei Bodenverdichtungen. Mitt. Dtsch. Bdkl. Ges. 43/1, 213-218.
- Hartge, K.-H. (1965): Formen und Verbreitung der im Boden vorkommenden Verdichtungen. Z. Pflanzenernähr. Bodenkd. Bd. 108, Heft 1, S. 8 - 18.
- Hartge, K.-H. & Horn, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. Enke Vlg. Stuttgart.
- Rohdenburg, H. & Meyer, B. (1966): Zur feinstratigraphie und Paläopedologie des Jungpleistozäns nach Untersuchungen an Südniedersächsischen und Nordhessischen Lössprofilen. Mitt. Dtsch. Bdkl. Ges. 5, S. 1 - 135.
- Sauer, S., Haussmann, W., & Harrach, T. (2002): Effektive Durchwurzelungstiefe, Sickerwasserbildung und Nitratverlagerung in tiefgründigen Lößböden eines Trockengebietes. J. Plant Nutr. Soil. Sci., 165, S. 269-273.
- Scheffer/Schachtschabel (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 5. Aufl., Akademischer Vlg. Spektrum, Heidelberg.
- Vorderbrügge, Th. (1997): Vergleich von bodenphysikalischen Kennwerten der Bodenkundlichen Kartierung mit gemessenen Werten. Mitt. Dtsch. Bdkl. Ges. 85/III, S. 1267 - 1270.

## Entwicklung bodenphysikalischer Eigenschaften junger Kippböden im Lausitzer Braunkohlenrevier in Abhängigkeit von Substrat und Melioration

Michael Haubold-Rosar<sup>1</sup> und Raimund Schneider<sup>2</sup>

### 1 Einleitung

Ein vorrangiges Ziel der Wiedernutzbarmachung ehemaliger Bergbauflächen ist die Wiederherstellung der Böden und ihrer natürlichen sowie für eine land- und forstwirtschaftliche Folgenutzung wichtigen Funktionen. Junge Kipp-Rohböden sind zunächst gekennzeichnet durch nutzungs- und ertragsbegrenzende Eigenschaften wie Humusarmut und ein technogenes, instabiles Gefüge. Die im Lausitzer Revier großflächig verkippten Substrate tertiären Ursprungs weisen infolge der Verwitterung von Eisendisulfiden zudem meist extrem niedrige pH-Werte auf. Vor Inkulturnahme werden sie tiefgründig gekalkt. Weitere Meliorationsmaßnahmen sowie auch die folgenden Rekultivierungsverfahren zielen insbesondere auf eine rasche Humusanreicherung und die Etablierung geschlossener Stoffkreisläufe.

In einem Feldversuch auf Kippenflächen des Tagebaus Nochten in Ostsachsen wurden verschiedene Kippsubstrate tiefgründig gekalkt und zu Beginn der Rekultivierung mit organischen Sekundärrohstoffdüngern behandelt. Mittels Stechzylinderuntersuchungen sollte der Frage nachgegangen werden, wie sich die tiefe Bodenbearbeitung bei der Grundmelioration und der Einsatz organischer Düngestoffe auf die Entwicklung bodenphysikalischer Eigenschaften auswirken.

### 2 Material und Methoden

In dem praxisnahen Feldversuch erfolgte im Herbst 1994 die Grundmelioration der verschiedenen Kippsubstrate durch tiefe Einarbeitung von Braunkohlenfilterasche mit einer Imants-Tiefspatenfräse (Tab. 1). Im Frühjahr 1995 und 1996 wurden neben Parzellen mit einer mineralischen Grunddüngung auch Varianten mit einer einmaligen organischen Düngung angelegt (u.a. 1996: 100 t TS ha<sup>-1</sup> Bio-/Grünkompost (BGK); 25 t TS ha<sup>-1</sup> Klärschlamm (KS) in Mischung mit 25 t TS ha<sup>-1</sup> Kohletrübe (KT)). Die Grunddünger wurden mit einer Ackerfräse bis in 25 cm Tiefe eingearbeitet. Auf 50 x 50 m großen Einzelparzellen erfolgte in den Jahren 1995 und 1996 der Anbau von Winterroggen. Seit 1997 werden die Flächen für den Futterbau genutzt (Luzernegras).

Tab. 1: Grundmelioration der Kippsubstrate

Substrat	Aschemenge [t TS ha <sup>-1</sup> ]	Tieffräsen	
		Tiefe[cm]	Häufigkeit
oj-ss (q)	480	60	1 x
oj-xls (t)	1600	100	2 x
oj-(tl,lt)(x) sl (t)	560	100	3 x

Vor der Grundmelioration und zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Melioration (1995, 1999, 2002, 2004) wurden aus Profilgruben ungestörte Bodenproben mittels Stechzylindern gewonnen. Die bodenphysikalischen Eigenschaften wurden mit folgenden Methoden bestimmt:

Trockenraumgewicht (Rt) n. Trocknung bei 105 °C; Luftkapazität (LK) und nutzbare Feldkapazität (nFK) n. RICHARDS & FIREMAN 1943 und HARTGE & HORN 1989; Luftleitfähigkeit (ka) n. KMOCH 1962 bei pF 2,5; gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) n. HANUS 1964; Textur n. DIN 19683-2.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

Der Kipp-Reinsand wies vor der Grundmelioration eine geringe Dichtlagerung auf (Abb. 1). Lockere Lagerung und hohe Sandgehalte (Tab. 2) bedingen eine sehr hohe Luftkapazität sowie Luft- und Wasserleitfähigkeit (ka = 20-40 μ<sup>2</sup>; kf = 400-1000 cm d<sup>-1</sup>). Die einmalige Bearbeitung mit der Tiefspatenfräse bis 60 cm Tiefe führte zu einer weiteren deutlichen Auflockerung (Abb. 1). 10 Jahre nach dem Tieffräsen ist es zu einer Rückverdichtung auf das ursprüngliche Niveau gekommen. Infolge der mehrjährigen Luzernegrasnutzung weist der Oberböden im Jahr 2004 eine geringfügig höhere Dichtlagerung als vor der Melioration auf. Durchlüftung und Wasserleitfähigkeit sind jedoch aufgrund der hohen Sandgehalte nicht beeinträchtigt (ka = 47 μ<sup>2</sup>; kf = 1060 cm d<sup>-1</sup>).

Tab. 2: Textur und C<sub>org</sub>-Gehalte der Kippsubstrate

	S [%]	U [%]	T [%]	C <sub>org</sub> [%]
oj-ss (q)	94,8	4,5	0,7	0,1
	1,4	1,7	0,9	0,1
oj-xls (t)	86,2	6,6	7,3	3,0
	3,7	2,6	2,6	1,1
oj-(tl,lt)(x) sl (t)	53,4	13,1	33,6	2,1
	16,0	5,7	12,2	0,4

*Kursiv: Standardabweichung*

Im Kipp-Kohlelehmsand lag vor dem Tieffräsen eine mittlere bis hohe Dichtlagerung vor (Abb. 2). Die geringen Raumgewichte sind auf Kohlebeimengungen zurückzuführen (C<sub>org</sub> = 3 %). Die gesamte Fläche musste zweimal mit der Imantsfräse bearbeitet werden, um die geforderte Arbeitstiefe von 1 m zu erreichen. Hierdurch wurde der Kippboden bis 60 cm Tiefe sehr deutlich und in der Zone von 60 bis 100 cm in geringerem Umfang gelockert.

<sup>1</sup> FIB e.V., Brauhausweg 2, 03238 Finsterwalde; haubold-rosar@fib-ev.de

<sup>2</sup> Universität Trier, FB VI, Abt. Bodenkunde, 54286 Trier; schneider@uni-trier.de

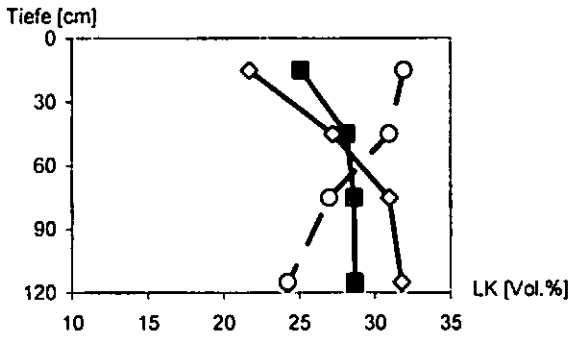
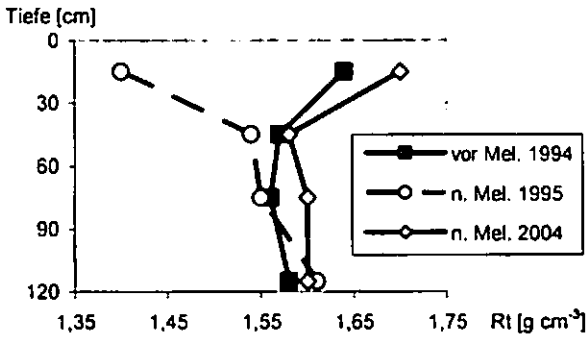


Abb. 1: Rt und LK des oj-ss vor (n=18 Zyl.) und nach der Grundmelioration (n=12 Zyl.).

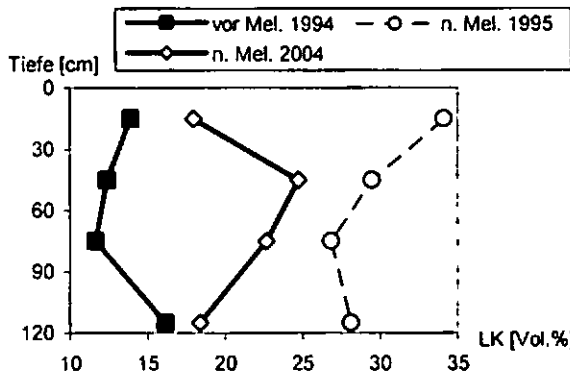
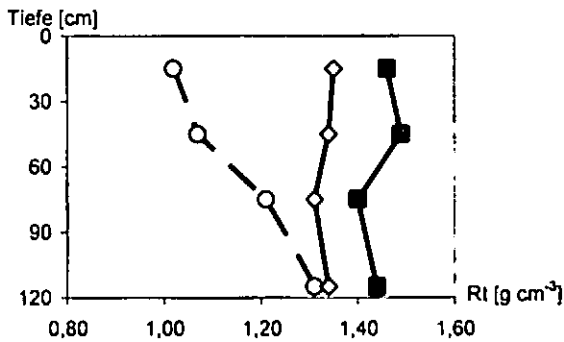


Abb. 2: Rt und LK des oj-xls vor (n=18 Zyl.) und nach der Grundmelioration (n=12 Zyl.)

10 Jahre nach der Grundmelioration ist es auch in diesem Kippsubstrat zu einer Rückverdichtung gekommen, die aber nicht das ursprüngliche Ausmaß erreicht. So ist in 30 bis 90 cm Tiefe bei Luftkapazitäten >20 Vol.% eine hohe bis sehr hohe Luft- und Wasserleitfähigkeit gegeben ( $k_a = 12 \mu^2$ ;  $k_f = 570 - 1100 \text{ cm d}^{-1}$ ). Der mehrjährige Futterbau ohne Bodenbearbeitung hat im Oberboden zwar zu einer stärkeren Verdichtung geführt, Durchlüftung

und Wasserleitfähigkeit sind jedoch auch hier nicht schädlich verringert.

In den von Ton- und Schluffbrocken durchsetzten, kohlehaltigen Sandlehmen wurden vor der Grundmelioration bei mittleren Dichten im Unterboden geringe Luftkapazitäten bis 5 Vol.-% und Luftleitfähigkeiten bis maximal  $5 \mu^2$  festgestellt. Obwohl diese Flächen dreifach mit der Tiefspatenfräse bearbeitet wurden, konnten Lockerungseffekte aufgrund der starken Heterogenität des Gemengesubstrates (vgl. Texturdaten in Tab. 2) mit dem gewählten Stichprobenumfang nicht nachvollzogen werden.

Der Einsatz von 100 t TS ha<sup>-1</sup> Bio-/Grünkompost führte in den sandigen Kippsubstraten zu einer Verbesserung des Wasserspeichervermögens im Vergleich zu den rein mineralisch gedüngten Böden (Abb. 3).

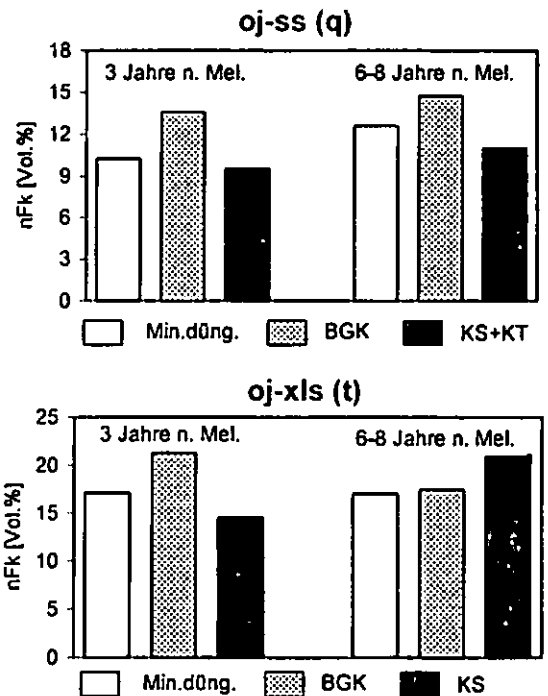


Abb. 3: Wirkung des Einsatzes organischer Stoffe auf die nutzbare Feldkapazität sandiger Kippsubstrate (n=12 Zyl.)

#### 4 Schlußfolgerungen

Die Grundmelioration mit Tiefspatenfräsen führt zu einer starken Lockerung sowie Erhöhung der Durchlüftung und Wasserdurchlässigkeit in Kipp-Sanden und -Lehmsanden. Trotz der sehr geringen Tragfähigkeit der tief gefrästen Substrate kommt es bei bodenschonender Folgebewirtschaftung nicht zu einer schädlichen flächenhaften Rückverdichtung des Unterbodens. Durch Komposteinsatz kann das Wasserspeichervermögen der Kipp-Sande und -Lehmsande verbessert werden.

Die starke Heterogenität der Gemengelehme erschwert den Nachweis der Wirkungen von Meliorationsmaßnahmen auf das Bodengefüge mittels Stechzylinderuntersuchungen.

## Effiziente Geosondierung zur tiefendifferenzierten Bodeninventur

<sup>^</sup>Ruprecht Herbst<sup>1</sup>, und Jürgen Lamp<sup>2</sup>

### 1. Einleitung

Messverfahren der Geoelektrik kommt für die tiefendifferenzierte, räumliche Bodeninventur eine wesentliche Bedeutung zu. Im Gegensatz zu Sensoren aus der spektralen Fern- und Naherkundung liefern diese Systeme Informationen nicht nur über die Bodenoberfläche, sondern auch über den Unterboden und Untergrund. Unter dem Begriff der Geoelektrik werden elektrische und elektromagnetisch-induktive Verfahren zusammengefasst zur

- Bestimmung der räumlichen Leitfähigkeit (EC) bzw. des spezif. Widerstands ( $R=1/EC$ ),
- Untersuchung der Polarisierungseigenschaften und des Aufladevermögens,
- Ermittlung von Strukturen durch Änderung der dielektrischen Leitfähigkeit,
- Beobachtung natürlicher elektrischer Felder.

Geoelektrische Verfahren sind für die Erfassung von Bodeneigenschaften und -funktionen eine wesentliche Unterstützung in bezug auf die

- Räumliche Verteilung von Bodenfunktionen und -substraten,
- Inhaltlich attributive Determination,
- Festlegung von Probenpunkten, Schürfgruben und Bohrstocksondierungen.

### 2. Untersuchungsgebiete und Methodik

Im Rahmen des Forschungsvorhabens *preagro* des BMBF wurden in vier unterschiedlichen Bodenschaften intensive Untersuchungen zur geoelektrischen Leitfähigkeit von Böden mit der EM38-Sonde von Geonics vorgenommen (Jungmoräne, Kalkstein und Tonstein). Hierfür wurden auf den Untersuchungsschlägen Rasterkartierungen mit dem Bohrstock standardisiert durchgeführt und die Bodendaten der Bohrpunkte kombiniert mit den Messwerten der geoelektrischen Leitfähigkeit (ECa in mS/m: „apparent electrical conductivity“) ausgewertet. Das EM38 ist ein Zweispulverfahren mit festem Spulenabstand von 1 m. Ein Wechselstrom erzeugt ein primäres elektromagnetisches Feld, das im Boden tiefenabhängig Stromflüsse induziert. Diese erzeugen wiederum sekundäre elektromagnetische Felder, die von der Empfangsspule relativ zum Primärfeld integrativ erfasst werden. Aus der Differenz der beiden Feldpotentiale ergibt sich nach dem Ohmschen Gesetz die Leitfähigkeit des Bo-

dens. Neben deutschlandweiten Routine-Befahrungen auf *preagro*-Schlägen (Details s. HERBST 2002) wurde auf dem Schlag „Rkamp“ des Pilotbetriebes im Ostholsteinischen Hügelland ausser einer EM38-Fahrgassenbefahrung mit interpolierten ECa-Werten (s. Abb.1) auch erste Untersuchungen zur Mehrpol-Gleichstrom-Geoelektrik in

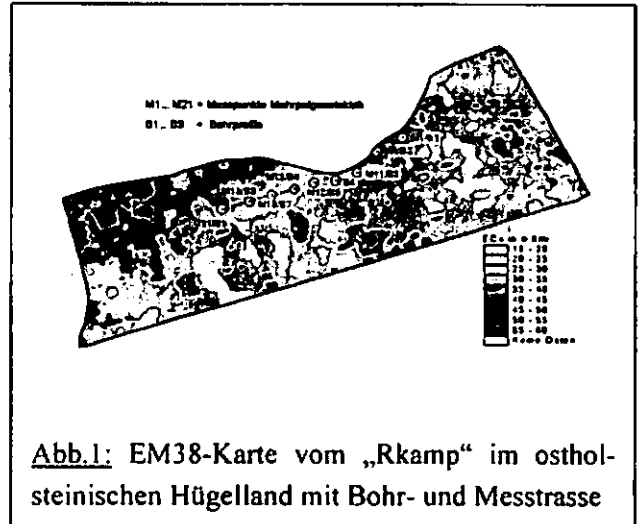


Abb.1: EM38-Karte vom „Rkamp“ im ostholsteinischen Hügelland mit Bohr- und Messstrasse

Zusammenarbeit mit der Firma Geoserve, Kiel (info@geoserve-kiel.de) vorgenommen. Hierzu wurden entlang einer Bohr- und Messpunkttrasse (B1-B9 bzw. M1-M21) in 2dm-Abständen je zehn Strom- und Messelektroden in den Boden gesteckt (Pseudotransekte a 2m Breite). Die Messtiefe ergibt sich aus dem Abstand der Elektroden bzw. daraus berechneten Geometriefaktoren. Da die Leitfähigkeiten der oberen Bodenschichten das Signal im Unterboden beeinflussen, wurden die Daten invertiert, um tiefenaufgelöste Informationen über Bodeneigenschaften zu erhalten (APPARAO 1997; Ergebnisse Abb.3).

### 3. Ergebnisse und Diskussion

**EM38-Sondierung:** Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit mit der EM38-Sonde bietet eine leistungsstarke und hochauflösende Informationsquelle über die Heterogenität von Böden summarisch bis ca. 2m Tiefe. Aus dem Oberboden kommt aber ein relativ geringer Anteil des EC-Signals, das hauptsächlich von Tongehalt/Bodenart im Unterboden, aber auch von Bodenfeuchte und Temperatur abhängt. Die Messung in unterschiedlichen Messmodi (vertikale und horizontale Spulenordnung) zur Detektion von Schichtungen in Böden haben keine aussagekräftigen Zusatzinformationen geliefert, die Daten beider Messmodi sind hoch korreliert ( $r=0.89$ ). Untersuchungen zur saisonalen Stabilität des Messsignals haben Korrelationen von 0.9 ergeben, wobei die Messsignale absolut verschiedene, relativ aber stabile Strukturen liefern.

**Bodenart/Tongehalt und Feuchte:** Die Ableitung von bodenartabhängigen Zielgrößen (Substratabfol-

<sup>^</sup> <sup>1</sup>Humboldt-Universität zu Berlin, JP Precision Agriculture, Philippstraße 13, 10115 Berlin  
E-mail: r.herbst@agrar.hu-berlin.de

<sup>2</sup>CA-Universität zu Kiel, AG Bodeninformatik, Olshausenstraße 40, 24115 Kiel  
E-mail: jlamp@soils.uni-kiel.de



ge, Tongehalt, nutzbar.Feldkapazität nFK) aus der Leitfähigkeitsmessung mit dem EM38 hat ergeben,

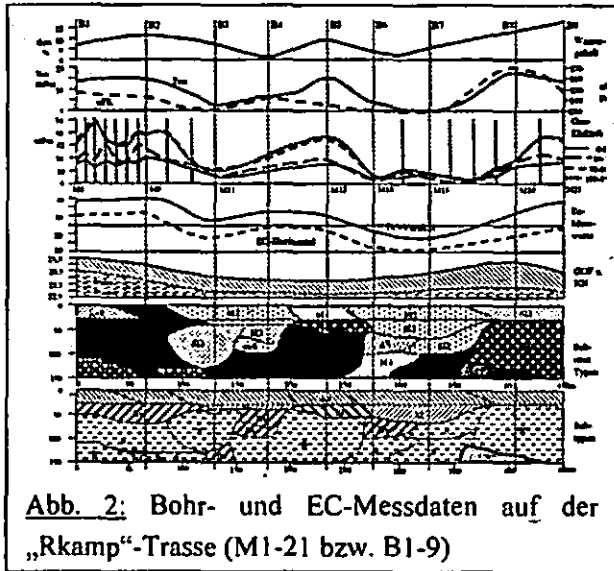


Abb. 2: Bohr- und EC-Messdaten auf der „Rkamp“-Trasse (M1-21 bzw. B1-9)

das besonders (Grob)Sande und Lehme/Tone im Unterboden sicher differenzier- und kartierbar sind (Abb. 2). Die EC-Werte sind auch stark abhängig von der Feuchte bzw. Hydromorphie der Böden. Die Berechnung *multipler* Punktkorrelationen für die Abschätzung von Tongehalten aus EC-Werten unter Berücksichtigung von Feuchte und Temperatur zeigten, dass der im Profil (0-2m) gemittelte Tongehalt am besten bei Hinzunahme des „mobilen Restwassers“ (aktuelles minus Totwasser) abgeschätzt wird ( $r=0,76$ ). Auch der Einbezug einer Hydromorphiezahl aus der Fleckung und Lage im Relief verbessert die Schätzung (HERBST 2002). Die induktiv-geoelektrische Sondierung der Bodenleitfähigkeit liefert ein in der Tiefe nicht differenziertes Mischsignal. Dies ist – trotz der hohen Flächenleistung des Verfahrens – bodenprofilkundlich und wegen häufiger Schichtung unbefriedigend.

**Mehrpol-Geoelektrik:** Eine wesentliche Verbesserung zur Erfassung von Schichtungen liefert die Mehrpol-Messung. Sie verbessert nicht nur die Korrelationen - gegenüber ECa-Messungen der EM38-Sonde - mit den Tongehalten von etwa  $r=0,75$  auf  $0,85$ , sondern liefert – nach Dateninversion und Kalibrierung durch Bohrprofile – auch tiefendifferenzierte Signale über die wichtige Zielgröße Tongehalt (LAMP et. al. 2003). In Abb. 2 sind für vier Bodenzonen (0 bis > 1m) tiefendifferenzierte Leitfähigkeiten in der Messtrasse (M1 –M21) dargestellt: di- und konvergierende EC-Verläufe zeigen deutlich die Schichtungs- bzw. Verlagerungseffekte in den Profilen an. Die Werte stammen aus Abb.3, die anhand von 21 invertierten Pseudotransekten ( $a2*2m$ ), die Profildifferenzierungen noch deutlicher visualisieren. Das Potential der Mehrpol-Geoelektrik, das mit Rollektroden und GPS-gestützter Fahrgassenbefahrung erst praktisch voll erschließbar ist, muss aber weiter untersucht werden. Ein Hauptziel sind räumlich

hochaufgelöste Informationen über die wichtigen, aber schwer zugänglichen Kenngrößen des Wasserhaushalts des tieferen Wurzelraumes.

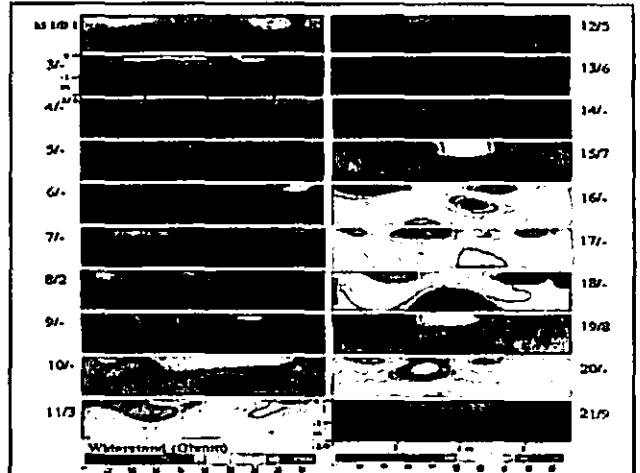


Abb.3: Geoelektrische Mehrpol-Widerstände ( $2*2m$  Pseudotransekte) in Trasse B1 – B9

#### 4. Zusammenfassung

Die Messung der geoelektrischen Leitfähigkeit ist ein sehr wichtiges Verfahren zur Unterstützung der räumlichen Detektion von Bodenfunktionen. Die Leitfähigkeitsmessung ersetzt aber nicht die klassische Bodenkartierung durch Bohrkerne. Auch ist diese kaum geeignet zur Reduzierung bzw. intelligenten Bodenbeprobung in bezug auf die Erfassung von Nährstoffen. Nachfolgend ist kurz zusammengefasst, was generell an bodenkundlichen Kenngrößen aus der elektrischen Leitfähigkeit der EM38-Sonde abgeleitet werden kann:

- Das EC-Messsignal ist eine relative Größe, die je Landschaft und Schlag neu zu eichen ist.
- Sand/Kies und Tongehalte >35 % im Unterboden sind gut kartierbar.
- Erhöhte Feuchtigkeit kompensiert geringe Leitfähigkeiten tonarmer Böden.
- Zwischen nutzbarer Wasserkapazität (nFK) und EC besteht nur eine mäßige Korrelation.
- Schichtungen sind nicht mit dem EM38, aber mit der Gleichstrom-Geoelektrik zu kartieren.
- In Gebieten mit geringen Tongehaltsunterschieden werden diese durch lokale Feuchte- und Temperatureffekte oft kompensiert.

#### 5. Literatur

APPARAO, A. (1997): Developments in geoelectrical methods. Balkema, Rotterdam

HERBST, R.. (2002): Bodenschätzung, geoelektrische Sondierung und pedostatistische Modellierungen als Basis digitaler Hof-Bodenkarten im Präzisen Landbau. Inst. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde, CAU Kiel

LAMP, J.; HERBST, R.; REIMER, G. (2003): Digitale Hof-Bodenkarten. Abschlussbericht Forschungsprojekt preagro, KTBL Verlag, Darmstadt

# The $\theta(\psi)$ -function of waste rock: measurements and pedotransfer functions

Uwe Hoepfner<sup>1</sup> Murray D. Fredlund<sup>2</sup>

## 2 Methods

We measured the  $\theta(\psi)$ -function with the evaporation method (20 samples of waste rock, 250 cm<sup>3</sup>). The waste rock material from the dumps of the Ronneburg Uranium Mining Site is a mixture of fine material (11 % clay, 37 % silt, 54 % sand) with a high stone content (37 %). Because this waste rock is relocated in a open pit with heavy dumpers, we condensed the samples up to 1,9–2,1 g cm<sup>-3</sup>.

We tested the PTFs of RAWLS a. BRAKENSIEK, VERECKEN, ARYA a. PARIS 1981 and FREDLUND a. WILSON with the software SOILVISION. The  $\theta(\psi)$ -functions are parameterized with the VAN GENUCHTEN (VGN) approach.

## 3 Results

The prediction of the  $\theta(\psi)$ -function with the regression based methods was not possible for the stony waste rock material. The tested methods of RAWLS a. BRAKENSIEK and VERECKEN shows high deviation to the measured curves, as expected. Also, the physical based method of ARYA a. PARIS didn't work well.

The results of the PTF of FREDLUND et al. differs for the 20 samples, depending on the packing porosity of the sample. We increased the packing porosity an average of +12,3 % compared with the neural net prediction of SoilVision. For the cover soils of the Ronneburg site the packing porosity was increased an average of +10 % (HOEPFNER et al. 2003). Previous comparisons to soils calibrated for a site in Montana have indicated a recommended increase in the packing porosity of +27,9 % (FREDLUND 2000). With that calibration, the mean FREDLUND a. WILSON-PTF fit well the mean measured  $\theta(\psi)$ -function (Fig. 1), with a somewhat lower  $\alpha$ .

Common pedotransfer functions should not be used for anthropogenic soils or materials like waste rock or tailings. High deviations of the packing porosity, the stone content and continuity and tortuosity of the pore space limit the application of this methods. For practical applications e.g. covering waste rock with top soil at mining sites, the FREDLUND and WILSON-approach gives good results. Future work could include these types of materials in the neural net prediction of SoilVision.

## 1 Introduction

The determination of the  $\theta(\psi)$ -function is laborious and costly. For applications like water balance studies these functions are often predicted with pedotransfer functions (PTF) with the help of soil characteristics like grain size or density, which are easy to measure. A first approach to predict the  $\theta(\psi)$ -function was the physically based method of ARYA a. PARIS (1981). ARYA predicts the pore radius and pore volume from a grain size distribution, and then converts the pore volume and radii to water content and tension. A second class of PTFs are regression based methods that depend on clay content or soil density (e.g. RAWLS a. BRAKENSIEK 1985, VERECKEN et al. 1989).

The FREDLUND and WILSON estimation method (1997) is based on the physico-empirical method and estimates the  $\theta(\psi)$ -function from the grain-size distribution curve and volume-mass properties. The grain-size distribution is divided into small groups of uniformly-sized particles. A packing porosity and  $\theta(\psi)$ -function is assumed for each group of particles. The incremental  $\theta(\psi)$ -functions are then summed to produce a final curve.

These PTFs are extensively tested on natural soils, but rarely on anthropogenic soils or materials like waste rock or tailings. HOEPFNER et al. (2003) has shown that a calibrated FREDLUND a. WILSON-PTF could be successfully applied to anthropogenic cover soils.

Field tests of cover systems for remediation of contaminated mining sites in East Germany has shown that the underlying waste rock takes part in the water balance of the cover system. Deep drying in summer seasons results in capillary rise of water from waste rock to the overburden cover soil. Therefore the hydraulic characteristics of the waste rock are important for the assessment of the performance of cover systems as well as predicting the water balance and water quality of top soils. The  $\theta(\psi)$ -function of waste rock was therefore studied.

<sup>1</sup>Wismut GmbH, Chemnitz;  
u.hoepfner@wismut.de

<sup>2</sup>SoilVision Systems Ltd., Saskatoon, Canada;  
murray@soilvision.com

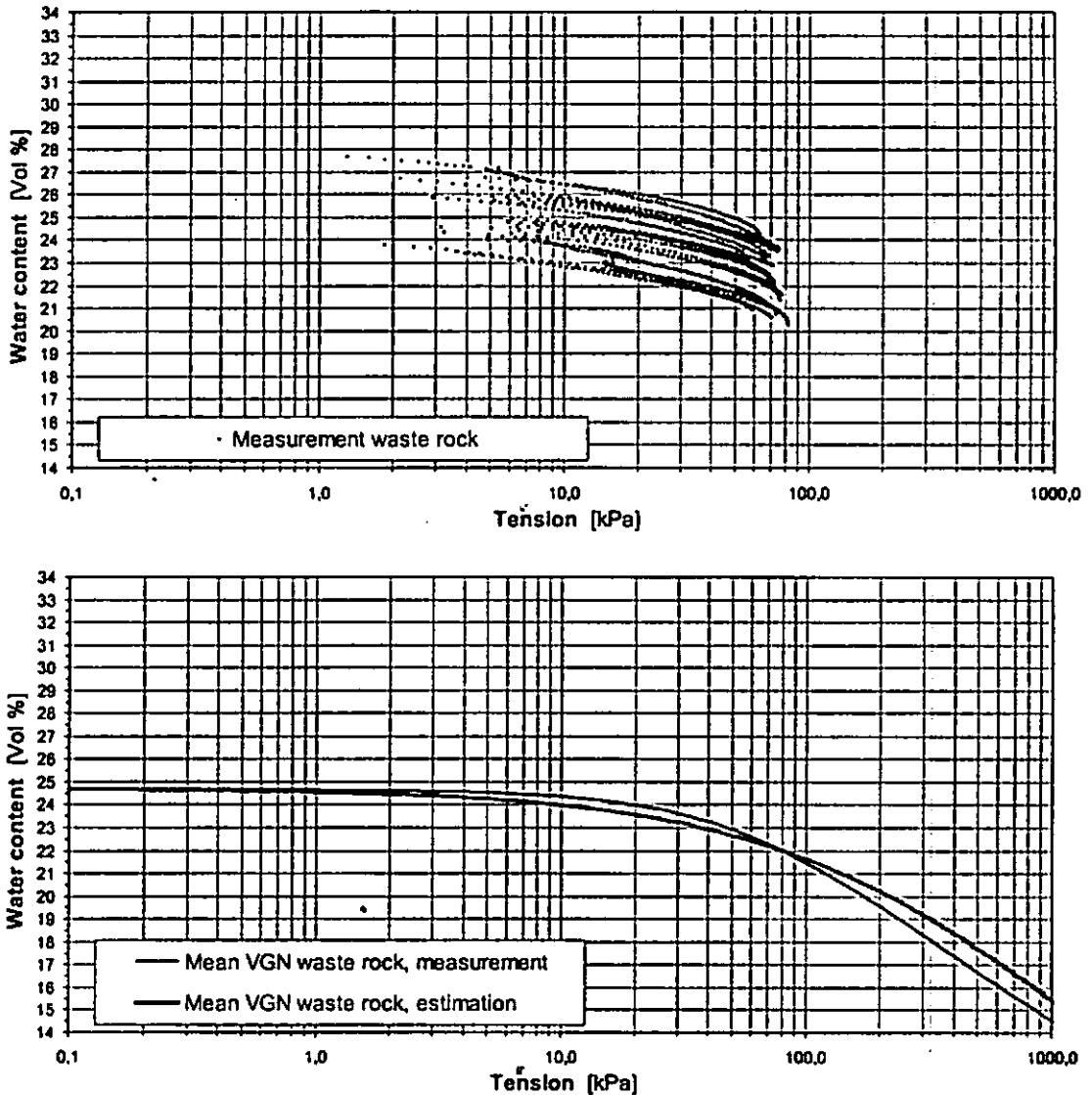


Fig. 1: Measurements of  $\theta(\psi)$ -functions, waste rock material with mean VGN-parameterization, and prediction of mean  $\theta(\psi)$ -function, calibrated FREDLUND and WILSON-PTF

References

ARYA, L. a. PARIS, J. [1981]: A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 45, P. 1023-1030.

FREDLUND, M.; WILSON, G. a. FREDLUND, D. [1997]: Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution curve. *3rd Symposium on unsaturated soil. Proc.; Rio de Janeiro, Brazil, 20.4-22.4.97*; P. 13-23.

FREDLUND, M. [2000]: The role of unsaturated soil property functions in the practice of unsaturated soil mechanics. *Ph.D. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada.*

HOEPFNER, U.; WEISS, K. a. ZEPP, H. [2003]: Zur Vorhersage der  $\theta(\psi)$ -Beziehung von künstlichen Rohböden mittels Pedotransferfunktionen. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, Vol. 102, P. 83-84.

RAWLS, W. a. BRAKENSIEK, D. [1985]: Prediction of soil water properties for hydrologic modelling. JONES, E. u. WARD, T. (Hrsg.): *Watershed Management in the Eighties. Proc. Symp. Comm. Watershed Management, ASCE; Denver, CO, 30.4-1.5.85*; P. 293-299.

SOILVISION [2001]: User's Guide - A knowledge-based database system for soil properties. Version 3.0. *SoilVision Systems Ltd., Saskatoon, Canada.*

VERECKEN, H.; MAES, J.; FEYEN, J. a. DARIUS, P. [1989]: Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Sci.*, Vol. 148, P. 389-403.

# Bodenheterogenität: Indikator für Biodiversität und Naturnähe?

## - Problemstellung, Ziele, Methodik -

Falko Hornschuch und Winfried Riek<sup>1</sup>

### Problemstellung

Neuere Definitionen von Biodiversität sind nicht auf „Artenvielfalt“ beschränkt, sondern beziehen auch die abiotischen Umweltbedingungen als Ausdruck der Vielfalt an Lebensräumen mit ein (Hobohm, 2000). In der Literatur sind zahlreiche Verfahren zur Quantifizierung von Zoo- und Phyto-diversität sowie Habitat- und Strukturvielfalt von Ökosystemen beschrieben (s. Mühlenberg, 1993).

Bodengenetische Aspekte werden bei der Erfassung von Biodiversität bislang kaum berücksichtigt. Das von der DFG geförderte Forschungsprojekt „Heterogenität und Musterbildung in Waldböden als Indikator für Biodiversität und Naturnähe“ (Fördernummer RI 1219 / 1-1) setzt hier an.

### Arbeitshypothese

Bei den Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass sich bei Waldökosystemen über mehrere Bestandesgenerationen Bodenmuster als Produkt der Selbstorganisation herausbilden und Variationskennwerte von Bodenparametern deshalb zur strukturellen Beschreibung der Nischenvielfalt und des Natürlichkeits- (Hemerobie-) bzw. Selbstorganisationsgrads der Ökosysteme geeignet sind (Scherzinger, 1996).

Die Struktur und Größe dieser Muster sowie die Intensität und die Ausprägung bei unterschiedlichen Bodenparametern dürfte vom Grad der Natürlichkeit abhängen, da sich Naturwälder von bewirtschafteten Wäldern z.B. hinsichtlich der Menge an Totholz, herausgerissenen Wurzeltellern und höherem Streuaufkommen im Stammbereich von Uraltbäumen unterscheiden. Auch die Waldökosystem-Typen könnten Einfluss auf diese Bodenmuster haben, weil diese – je nach bestandesbildenden Baumarten – spezifische Stammzahlen, Biomassen, Nettopräimärproduktionen sowie unter-

schiedliche Kronen- und Wurzelausdehnungen der Bestandesglieder aufweisen.

Umstürzende Bäume verursachen durch das Herausreißen ihres Wurzelstocks eine vertikale Bodendurchmischung (Koop, 1982) und die rezente wie frühere Bestandesstrukturen modifizieren die horizontale Variabilität von Bodeneigenschaften, so z.B. den pH-Wert (Friedrich, 1992) und den Humusgehalt (Abb.1).

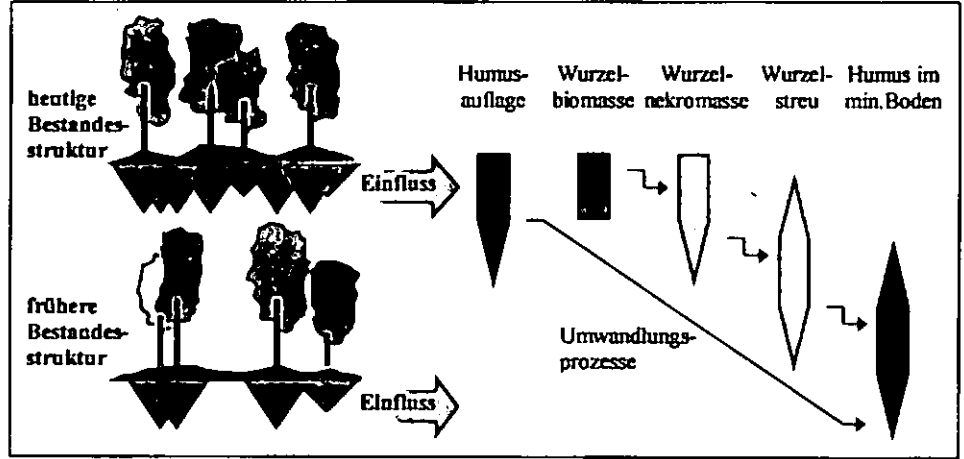


Abbildung 1: Einfluss der früheren und heutigen Bestandesstruktur auf horizontale Verteilungsmuster verschiedener Wurzel- und Humusfraktionen

### Untersuchungsziele

- 1) Beschreibung der räumlichen Variation von Bodenmerkmalen sowie der Prozesse der ökosystemaren Selbstorganisation, die zu dieser Variabilität und den daraus resultierenden Mustern in Böden führen, in Abhängigkeit von Waldökosystem (Hauptbaumart) und Natürlichkeit (Bestandesgeschichte).
- 2) Quantifizierung der Bodenheterogenität und Überprüfung hinsichtlich ihrer Eignung für die ökosystemare Diversitätseinschätzung (Bestandesstruktur-, Bodenfauna-, Bodenvegetations-Diversität) und die Bewertung der Naturnähe aus pedogener Sicht.
- 3) Ableitung statistischer Kennwerte (Indizes) zur Operationalisierung der Bodenvariabilität bzw. Diversität von Bodeneigenschaften im Kontext mit dem Begriff der Biodiversität von Waldökosystemen. Es ist zu testen, wie sich diese Kenngrößen bei unterschiedlichen Stichprobenmengen verhalten bzw. welche Minimalanforderungen an das Beprobungsdesign bei Gewähr reproduzierbarer Ergebnisse und Aussagen zu stellen sind.

### Flächenauswahl

Auf Sandböden Brandenburgs und der Neumark (Polen) wurden Flächenpaare von Buchen-, Eichen- und Kiefernwald-Ökosystemen mit jeweils geringer anthropogener Störung (Naturwälder, „Urwälder“) und solche mit stärkerer forstlicher Beeinflussung,

<sup>1</sup> Fachhochschule Eberswalde, Alfred-Möller-Str. 1, 16225 Eberswalde, Tel. 03334/65459, e-Mail: fhornschuch@fh-eberswalde.de und Tel. 03334/65211, e-Mail: wriek@fh-eberswalde.de

jedoch mit standortgerechter Vegetation (Wirtschaftswälder) ausgewählt (Tab. 1). Dabei wurde innerhalb der Untersuchungsareale hinsichtlich der Geländelage, der Feinbodenform und eventuell vorhandener Begleitbaumarten auf relative standörtliche Homogenität geachtet.

Tabelle 1: Untersuchungsflächen

Untersuchungsfläche	Region	Forstrevier, Forstabteilung	Geologie	Feinbodenform	Standortgruppe
Buchen-Naturwald	Drawa-Nationalpark, Neumark, Polen	Obwód Ochrony Debina 247b	Pomm. Stadium Weichsel-EZ, Sander, grundwasserbeeinflusst	nicht klassifiziert	K 2
Buchen-Wirtschaftswald	BR Schorfh.-Chorin, Brandenburg	Theerofen 154a1	Pomm. Stadium Weichsel-EZ, Sander, grundwasserbeeinflusst	KbS	K 2
Eichen-Naturwald	Ami Schlaubetal, Brandenburg	Fünfeichen 59a3	Berliner Stadium Weichsel-EZ, Decksand auf Geschiebelehm	NeS	M 2
Eichen-Wirtschaftswald	Ami Schlaubetal, Brandenburg	Dammendorf 84a1	Berliner Stadium Weichsel-EZ, Decksand auf Geschiebelehm	LwS	M 2
Kiefern-Naturwald	BR Schorfh.-Chorin, Brandenburg	Kienhorst 95a2	Pomm. Stadium Weichsel-EZ, Flugsand-Düne	SkS	Z 2
Kiefern-Wirtschaftswald	Naturpark Barnim, Brandenburg	Melchow 65a	Pomm. Stadium Weichsel-EZ, Flugsand-Düne	SwS ↔ SkS 7:3	Z 2

Entlang der Transektlinien werden die Koordinaten und der Brusthöhendurchmesser von Stämmen und Stubben bis in eine Entfernung von 10 m aufgenommen, um Beziehungen zwischen Bodeneigenschaften sowie Wurzeldichten und dem gegenwärtigen Strukturindex („Nachbarschaftsindex“, Hornschuch, 2004) zu ermitteln.

An 49 Probepunkten erfolgt die Analyse der

Regenwurmfauna und Bodenvegetation.

Bei der Auswertung der Daten kommen geostatistische Verfahren, wie die Variographie zur Anwendung. Unter Einbeziehung von Vegetations-, Fauna- und Bestandes-(struktur-)daten soll ermittelt werden, ob und inwiefern Korrelationen zwischen einerseits Boden- und andererseits Phyto-, Zoo- sowie Bestandesstrukturdiversität bestehen.

Literatur

Friedrich, J. (1992): Räumliche Variation bodenchemischer und -physikalischer Merkmalsgrößen sowie der Wurzelverteilung in Buchen- und Fichtenwaldökosystemen. Rhe. A, Bd. 83, Selbstverlag Univ. Göttingen,

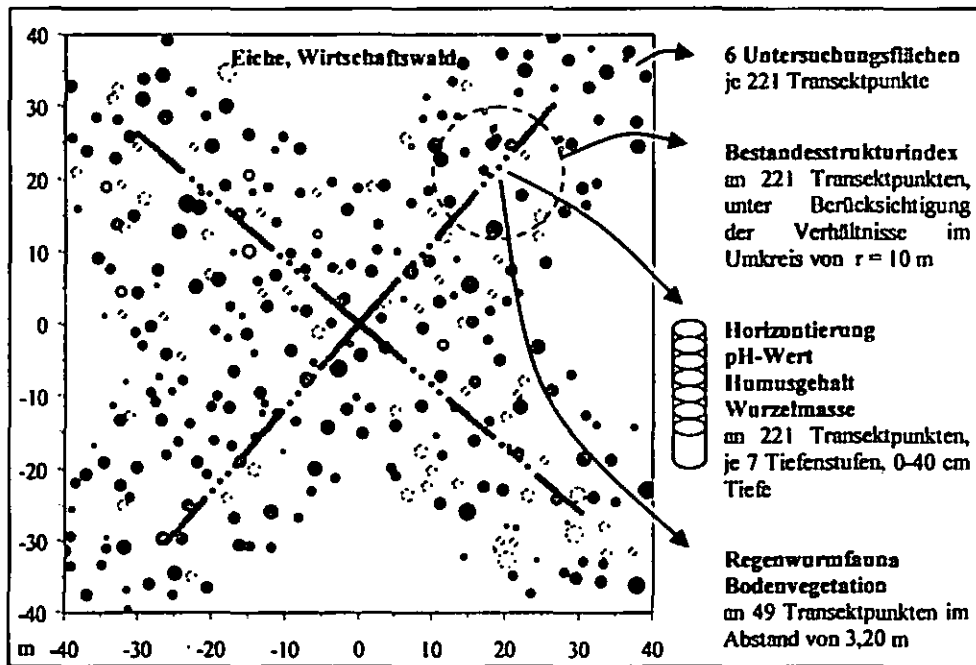


Abbildung 2: Stammverteilungskarte mit Lage der Probepunkte sowie erhobene Parameter am Beispiel der Fläche „Eichen-Wirtschaftswald“

Untersuchungsansatz, Methodik, Auswertung

Um eine sehr hohe Stichprobenzahl zu ermöglichen, werden leicht zu erhebende Parameter wie Horizontmächtigkeit, Humusgehalt und pH-Wert untersucht, die bei Sandböden als Indikatoren wesentlicher Bodeneigenschaften gelten. Weiterhin wird die Gesamtwurzelmasse an jedem Probepunkt bestimmt.

Je Untersuchungsfläche werden entlang eines 80 x 80 m-Kreuztransektes 221 Einstiche mittels Wurzelbohrer (d = 8 cm) vorgenommen. Der Punktabstand beträgt in wiederkehrenden Intervallbereichen 40, 80 oder 160 cm. Die Mineralbodensäulen bis 40 cm Tiefe werden in 7 Tiefenstufen zerlegt (Abb. 2).

Göttingen, 146 S. und Anhang.

Hobohm, C. (2000): Biodiversität. 1. Aufl. UTB, Wiebelsheim, 218 S.

Hornschuch, F. (2004): Auswirkungen des Waldumbaus auf die Struktur des Feinwurzelsystems. In: Anders, S., Beck, W., Hornschuch, F., Müller, J., Steiner, A.: Vom Kiefern-Reinbestand zum Kiefern-Buchen-Mischbestand. Beitr. Forstwirtsch. u. Landsch.ökol. 38, 2, 55-67.

Koop, H. (1982): Waldverjüngung, Sukzessionsmosaik und kleinstandörtliche Differenzierung infolge spontaner Waldentwicklung. In: Dierschke, H. (Hg.) 1982: Struktur und Dynamik von Wäldern, Ber. Internat. Vereinigung für Vegetationskunde Rinteln, Vaduz, 235-275.

Mühlenberg, M. (1993). Freilandökologie. 3. Aufl., UTB, Quelle & Meyer Verlag, Heidelberg, Wiesbaden, 514 S.

Scherzinger, W. 1996: Naturschutz im Wald. Ulmer, Stuttgart, 448 S.

# Abschätzung mobilisierbarer Schadstoffvorräte und des Schadstoffverteilungsverhaltens aus multiplen Schüttelversuchen

## I. Experimentelles Design und Parameteridentifikation

S. Iden und W. Durner<sup>1</sup>

### Einleitung

Zur Abschätzung des Gefährdungspotentials für Grundwasserverschmutzungen durch kontaminierte Bodenmaterialien kommen derzeit verschiedene Verfahren zum Einsatz. Schüttelversuche können verwendet werden, um zu erwartende in situ-Konzentrationen in der Bodenlösung sowie mobilisierbare Schadstoffvorräte zu bestimmen. Der Bodensättigungsextrakt (BoSE) wird in der Bundesbodenschutzverordnung als Referenzmethode zur Abschätzung von in situ-Konzentrationen genannt. Die Versuchsdurchführung enthält jedoch eine subjektive Festlegung und es können nur geringe Mengen Elutionslösung für eine Konzentrationsbestimmung gewonnen werden. Versuche, die bei weiterem Wasser-Feststoff-Verhältnis durchgeführt werden, z.B. der in der Praxis weit verbreitete S4-Schüttelversuch nach DIN, vermeiden diese Probleme, sind jedoch prinzipiell ungeeignet, eine in situ-Konzentration widerzuspiegeln. Eine weitergehende Parameterbestimmung im Rahmen der Quellstärkeermittlung, z.B. die Bestimmung des Verteilungsverhaltens und des mobilisierbaren Gesamtgehalts, ist darüber hinaus basierend auf der Messung einer Eluatkonzentration grundsätzlich unmöglich. Der Bestimmung mobilisierbarer Gesamtgehalte kommt eine besondere Bedeutung zu, da diese sich von Gesamtgehalten um Größenordnungen unterscheiden können.

Ziel dieses Beitrags ist, die grundsätzliche Eignung von multiplen Schüttelversuchen zur Parameterfindung im Rahmen der Sickerwasserprognose zu untersuchen. Wir unterscheiden hierbei zwischen zwei experimentellen Designs – einem parallelen multiplen Schüttelversuch sowie einer Kaskadenelution.

### Material und Methoden

Unser Ansatz zur Parameterbestimmung liegt darin, den Prozess der Schadstoffverteilung beim Schüttelversuch in Abhängigkeit von mobilisierbarem Vorrat und dem Verteilungsverhalten zu simulieren, und die unbekann-

ten Systemparameter (Vorrat, Koeffizienten der Adsorptionsisotherme) über Anpassung des Modells an gemessene Konzentrationsdaten aus mehreren Schüttelversuchen über inverse Simulation zu schätzen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Quantifizierung der Parameterunsicherheiten und der Unsicherheit der resultierenden Desorptionsisotherme.

Ausgehend von der Massenbilanzgleichung für einen Schadstoff bei der Partition in eine sorbierte und gelöste Phase, haben wir ein Programmwerkzeug entwickelt, welches die Konzentration in der gelösten Phase in Abhängigkeit von Wasser-Feststoff-Verhältnis für lineare und nichtlineare Isothermen berechnet. Die Formulierung der Massenbilanzgleichung setzt die Invarianz der Isotherme gegenüber dem eingesetzten Wasser-Feststoff-Verhältnis sowie eine Gleichgewichtseinstellung zwischen fester und flüssiger Phase voraus. Wir lösen das inverse Problem unter Verwendung von Methoden der Bayesschen Statistik. Hierzu werden aus der a-posteriori-Verteilung der Modellparameter gegeben die Messdaten durch random-walk Verfahren Parametersätze gezogen (sog. Markov-Chain-Monte-Carlo, Gelman et al., 2004). Die generierten Parametersätze dienen als Grundlage für die Berechnung von Unsicherheiten der einzelnen Modellparameter, der Sorptionsisotherme, und der vorhergesagten Konzentrationen im Messbereich sowie der extrapolativ vorhergesagten Konzentration beim Wasser-Feststoff-Verhältnis eines BoSE-Versuchs. Die so erzielte Inversion ist robust im Sinne globaler Konvergenzeigenschaften, die Unsicherheitsanalyse ist unabhängig von Linearisierungsannahmen und berücksichtigt die Nichtlinearität der Modellstruktur somit explizit.

Experimente im Themenkomplex Sickerwasserprognose stehen grundsätzlich in einem Konfliktbereich zwischen Aufwand (Anwendbarkeit) und Informationsgehalt. Wir zeigen deshalb die Eignung multipler Schüttelversuche auf, die aus lediglich fünf gemessenen Konzentrationen bei unterschiedlichen Wasser-Feststoff-Verhältnissen (1:1, 2:1, 10:1, 30:1 und 100:1) ermittelt werden. Da unter diesen Umständen Messfehler in einzelnen Konzentrationen gravierende Auswirkungen auf die Ergebnisse der Parameterschätzung haben können, führen wir eine Unsicherheitsanalyse zweiter Ordnung (Beck, 1987) durch.

Für eine gegebene Isotherme und einen gegebenen mobilisierbaren Gesamtvorrat generieren wir hierfür jeweils 500 synthetische Datensätze mit einem relativen Fehler von 5% (Standardabweichung des normalverteilten Messfehlers). Für diese Datensätze werden mit Hilfe des Shuffled Complex Evolution Metropolis Algorithmus (Vrugt et al., 2003) jeweils 10000 Parametersätze aus der Bayesschen a-posteriori-

<sup>1</sup> Technische Universität Braunschweig, Institut für Geoökologie, Langer Kamp 19c, 38106 Braunschweig. E-mail s.iden@tu-bs.de

Größe	$K_f$	Wert	Geschätzt <sup>1)</sup>	Unsicherheit <sup>2)</sup>
Mob. Vorrat (log-Skala)	1	2	2.007	0.014
Mob. Vorrat (log-Skala)	10	2	2.002	0.029
Mob. Vorrat (log-Skala)	100	2	1.991	0.112
Mob. Vorrat (log-Skala)	100 <sup>3)</sup>	2	2	0.038
BoSE-Wert (mg/l)	1	198.2	199.3	22.4
BoSE-Wert (mg/l)	10	24.1	24.04	1.65
BoSE-Wert (mg/l)	100	0.996	0.995	0.054
BoSE-Wert (mg/l)	100 <sup>3)</sup>	0.996	0.992	0.054

Tabelle 1: Unsicherheitsanalyse der Größen mobilisierbarer Vorrat und vorhergesagte BoSE-Konzentration. Angaben für den Vorrat logarithmiert, Dimension des Vorrats ist mg/kg. Alle virtuellen multiplen Schüttelversuche umfassen 5 Ansätze mit den Verdünnungen 1:1, 2:1, 10:1, 30:1 und 100:1. <sup>1)</sup> Als Schätzung wird der Median aus 500 Modi verwendet. <sup>2)</sup> Die Unsicherheit ist der Median von 500 Standardabweichungen, wobei letztere aus dem Interquantilabstand der Verteilung abgeleitet wurde. <sup>3)</sup> In diesem virtuellen Experiment wurde bis zu einem Wasser-Feststoff-Verhältnis von 1000:1 verdünnt, der Ansatz mit 30:1 wurde ausgelassen. Allen Experimenten liegt ein Standardfehler in den generierten Konzentrationsdaten von 5% sowie ein Freundlich-Exponent von 0.7 zu Grunde.

Verteilung generiert und die Unsicherheiten der Zielgrößen berechnet. Auf diese Weise können wir die Eignung des Experiments für verschiedene nichtlineare Isothermen prüfen.

### Ergebnisse und Diskussion

Die Analyse von fehlerbehafteten, synthetisch generierten Datensätzen multipler Schüttelversuche zeigt, dass eine die Parameterbestimmung im Fall einer linearen Isotherme grundsätzlich möglich ist. Hierbei ist zu beachten, dass die Größen »mobilisierbarer Vorrat« und »Verteilungsverhalten« für starke Sorption nur mit erhöhter Unsicherheit identifizierbar sind. Dagegen ist die Vorhersage der BoSE-Konzentration in diesem Fall sogar mit größerer Sicherheit möglich. Der Terminus starke Sorption wird hierbei bewusst relativ verwendet: es ist das Verhältnis von Stärke der Sorption und experimentell realisierter Verdünnung, welches die Genauigkeit der Bestimmung von Vorrat und Isotherme steuert. Grundsätzlich gilt: je stärker die Sorption, desto höhere Verdünnungen müssen eingestellt werden, um zu einer genaueren Bestimmung der beiden Größen zu kommen.

Für den Fall nichtlinearer Isothermen ist die Charakteristik des inversen Problems aufgrund der Interaktion von in diesem Fall drei Modellparametern deutlich verkompliziert. Insbesondere die relativ hohe Korrelation der Isothermenparameter erschwert die Identifizierbarkeit einzelner Modellparameter. Für stärkere Sorption korrelieren der Parameter  $K_f$  der Isotherme zusätzlich stark positiv mit dem mobilisierbaren Vorrat. Durch die Anwendung des Bayesschen Paradigmas ist eine robuste Bestimmung der besten Modellanpassung sowie eine Unsicherheitsanalyse unter Berücksichti-

gung der Nichtlinearität der Modellstruktur jedoch auch in diesem Fall möglich. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse für eine Freundlich-Isotherme mit einem Exponenten von 0.7 für die Größen »vorhergesagte BoSE-Konzentration« und »mobilisierbarer Vorrat« (letztere auf der log-Skala). Die oben für den Fall der linearen Isotherme gemachten Aussagen gelten auch für den Fall eines nichtlinearen Verteilungsgleichgewichts. Es wird deutlich, dass eine Erhöhung der Verdünnung zu einer zuverlässigeren Schätzung des Vorrats bei gleichzeitig konstant zuverlässiger Vorhersage der BoSE-Konzentration führt.

Die Auswertung von Kaskadeneelutionen erfolgt mit denselben statistischen Methoden. Wir behandeln die Ergebnisse für dieses experimentelle Design jedoch hier nicht detailliert - die grundsätzliche Eignung für die Parameterfindung ist bei Gültigkeit der Modellannahmen auch für diesen Fall gegeben.

### Dank

Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung. Es förderte diese Untersuchungen im Rahmen des Teilprojekts 02WP0299 im Verbundprojekt Sickerwasserprognose.

### Literatur

- Gelman, A. et al., 2004. Bayesian Data Analysis. Chapman & Hall, Boca Raton.
- Vrugt, J. A. et al., 2003. A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. Water Res. Res. 39: 1201, doi:10.1029/2002WR001642.
- Beck, M. B. 1987. Water quality modeling: a review of the analysis of uncertainty. Water Res. Res. 23:1393-1442.

**Bedeutung von Textur und Bodenstruktur für die Sorptivitäten unterschiedlicher Böden**

I. Janßen\*, J. Krümmelbein\*, E. Jasinska\*, R. Horn\*

**1 Einleitung**

Viele Bodeneigenschaften wie z. B. Infiltration und Oberflächenabfluss, Wassernachlieferung durch kapillaren Aufstieg werden durch die Sorptivität bzw. die Benetzungshemmung beeinflusst. Diese wiederum ist von der organischen Substanz, deren Zersetzungsgrad und Zusammensetzung, dem pH-Wert, der Korngrößenverteilung und Struktur abhängig. Außerdem erkennt man eine Beeinflussung der Sorptivität durch die unterschiedliche Nutzung bzw. Vegetation, z. B. durch Veränderung der Bodenstruktur durch Bodenbearbeitung oder durch Stoffwechselprodukte von Pflanzen (ätherische Öle, Wachse usw.) und deren Einfluss auf Menge und Zusammensetzung der organischen Substanz.

Letztendliches Ziel ist es, eine Bewertungsmöglichkeit unterschiedlicher Sorptivitäten zu definieren, um Bodeneigenschaften wie beispielsweise Infiltration und Aggregatstabilität beurteilen zu können.

Generell steigt sowohl die Wassersorptivität als auch die Benetzungshemmung mit steigender Vorentwässerung. Jedoch sind bei den Untersuchungen Ergebnisse aufgetreten, die nicht zu erwarten waren und wofür es bis jetzt keine eindeutige Erklärungen gibt. Diese Ergebnisse sollen hier vorgestellt werden.

**2 Material und Methoden**

Die vorliegenden Ergebnisse stammen von einem chilenischen Andisol, einem chinesischen Ultisol und einem brasilianischen Oxisol.

Die Beprobung in Chile fand in der Nähe von Puerto Montt (Südchile) statt, es handelte sich um eine nicht bearbeitete und bearbeitete (Dammkultur) Variante unter forstlicher Nutzung (*Eucalyptus nitens*).

In China befanden sich die beprobten Flächen in der Provinz Jiangxi unter unterschiedlicher Nutzung (erodierter/unerodierter Boden unter *Lespedeza bicolor*, erodierter/unerodierter Boden unter *Cinnamom camphora* und erodierter vegetationsloser Boden).

In Brasilien wurden die Proben in der Nähe von Passo Fundo und Erechim (Bundesstaat Santa Catarina) entnommen (Allg. Bodenkennwerte s. Tab. 1).

Es wurden sowohl die Wassersorptivität als auch die Ethanol-sorptivität nach der Methode von Hallett und Young (1999) an Aggregaten (in China an ungestörten Bodenproben) bestimmt. Die Bestimmung der Ethanol-sorptivität dient der Berechnung einer evtl. vorhandenen Benetzungshemmung (R) des Bodens.

Tab. 1: Chemische und physikalische Kennwerte der vorgestellten Böden.

Ort	Bodentyp/ Tiefe [cm]	Veg./ Nutzung	Textur			C/N
			S	U	T	
Brasilien/ Cruz Alta	Oxisol 0-50	keine/ Böschung	73	7	20	14
	Oxisol 0-20		6	42	52	13
Chile/ Frutillar	Andisol 15	Forst/ Dämme	21	57	22	10
		Forst/ Nullvariante	21	57	22	11
China/ Yintang	Ultisol 5-10	erodiert /ohne Veg.	17	29	54	nb
		Camphor	14	34	52	nb
		Camphor/ erodiert	nb	nb	nb	nb
		Lespedeza/ erodiert	18	32	50	nb
		Lespedeza/ erodiert	nb	nb	nb	nb

**3 Ergebnisse**

Die Wasser- und Ethanol-sorptivität und die dazu errechnete Benetzungshemmung der vorgestellten Böden werden für pF 5 und für die jeweils oberste Tiefe in Tab. 2 vorgestellt.

Die Wasser- und Ethanol-sorptivität werden als Funktion der Vorentwässerung dargestellt. Der Andisol zeigt eine höhere Sorptivität von Ethanol gegenüber Wasser (Abb. 1). Der Ultisol verhält sich jedoch anders, ab pF 2.7 übersteigt die Wasser- die Ethanol-sorptivität um ein Vielfaches.

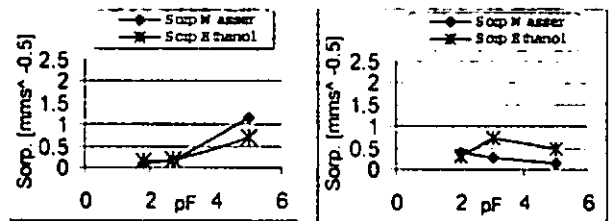


Abb. 1: Sorptivitätsverlauf als Funktion der Wasserspannung.  
links: Ultisol, nicht erodierter Camphor (5-10cm)  
rechts: Andisol, Dammkultur (15cm)

Die Benetzungshemmung (R) ist als Funktion der Vorentwässerung dargestellt (Abb. 2).

Die Kurve des Andisols stellt einen typischen Verlauf dar: mit zunehmender Austrocknung steigt die Benetzungshemmung an.

Beim Oxisol verhält es sich umgekehrt, hier sinkt die Benetzungshemmung mit zunehmender Austrocknung.

\*Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde,  
Olshausenstr. 40,  
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 24118 Kiel;



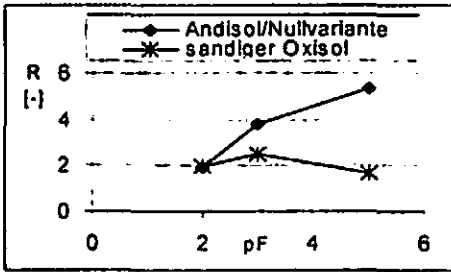


Abb.2: Benetzungshemmung (R) in Abhängigkeit der Vorentwässerung.

Aufgrund verschiedener Nutzungen treten unterschiedliche Sorptivitäten /Benetzungshemmungen auf (Abb.3). Dies ist bei gleichem Bodentyp auf die durch Nutzung veränderte Struktur zurückzuführen.

In der linken Grafik wird die Dammkultur mit der Nullvariante des Andisols verglichen und zeigt, dass mit steigender Entwässerung die Benetzungshemmung besonders im Fall der Dammkultur steigt und die Wassersorptivität sinkt. Auffällig ist, dass der Ultisol sich anders verhält. Hier sinkt die Benetzungshemmung mit zunehmender Entwässerung und die Wassersorptivität steigt entsprechend.

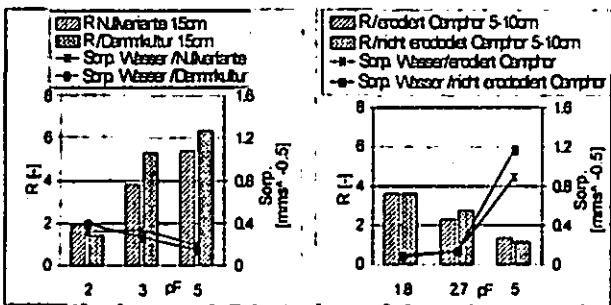


Abb.3: Benetzungshemmung und Wassersorptivität in Abhängigkeit der Vorentwässerung.

Tab.2: Sorptivitäten und Benetzungshemmung (R) bei 40°C.

Bodentyp/ Tiefe [cm]	pF 5/ 40°C					
	Sorp. Wasser	SD	Sorp. Ethanol	SD	R	SD
Sandiger Oxisol 0-50cm	0,45	0,13	0,37	0,07	1,6	0,39
Toniger Oxisol 0-20cm	0,24	0,05	0,24	0,10	2,0	0,0
Andisol Dämme 15cm	0,15	0,02	0,49	0,04	6,4	0,86
Andisol Nullvariant 15cm	0,19	0,04	0,52	0,05	5,3	0,57
Ultisol erod. ohne Veg. 5-10cm	0,67	0,20	0,41	0,23	1,2	0,56
Ultisol Camphor 5-10cm	1,17	0,34	0,69	0,18	1,2	0,33
Ultisol erodiert Camphor 5-10cm	0,89	0,34	0,63	0,35	1,4	0,39
Ultisol Lespedeza 5-10cm	0,62	0,22	0,73	0,32	2,3	1,29
Ultisol Erod. Lespedeza 5-10cm	0,62	0,26	0,75	0,29	2,4	0,73

#### 4 Ausblick

Letztendliches Ziel ist es, eine Bewertungsmöglichkeit unterschiedlicher Sorptivitäten zu finden, um Bodeneigenschaften wie beispielsweise Infiltration und Aggregatstabilität beurteilen zu können. Jedoch gibt es viele nicht geklärte Faktoren, die die Sorptivität beeinflussen, u.a. in der Form, dass bei einigen Böden ein Absinken der Sorptivität (und R) ab einer gewissen Entwässerungsstufe zu beobachten ist. Dies könnte daran liegen, dass die organischen Umhüllungen einzelner Partikel Risse bekommen. Auch hat die Nutzung der Böden einen entscheidenden Einfluss auf Sorptivitätseigenschaften, da z.B. durch belüftende Bearbeitungsmethoden ein verstärkte Austrocknung der organischen Substanz auftritt. Um eine aussagekräftige und vergleichbare Bewertung zu finden, müssen die Untersuchungsmethoden vereinheitlicht werden (z.B. gleiche Vorbehandlung der Bodenproben).

#### Literatur

P.D. Hallett & I.M. Young 1999. Changes to water repellency of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. *European Journal of Soil Science*, 50, 35-40.

# Bodenhydrologische Eigenschaften von Paddy-Reisfeldern in SE-China

Manon Janssen<sup>1</sup>, Andreas Muth & Bernd Lennartz

## EINLEITUNG

Terrassierte Reislandschaften zeichnen sich durch ein komplexes hydrologisches System aus, dessen detaillierte Untersuchung zur Vorhersage von Wasser- und Stoffflüssen auf Feldskala notwendig ist. Das übergeordnete Ziel dieses Projektes ist es, die Wasser- und Stoffflüsse auf Paddy-Reisfeldern in Abhängigkeit von Landnutzung und Bodenstruktur zu quantifizieren und die Bedeutung von präferentiellen Fluss- und Transportprozessen für die Qualität von Grund- und Oberflächenwasser abzuschätzen. Spezifisches Ziel der ersten Arbeitsphase ist dabei die Charakterisierung bodenhydrologischer Eigenschaften in Bezug auf Nutzungsalter, Anisotropie und räumliche Variabilität.

Das Untersuchungsgebiet liegt im subtropischen SE-China und wird aus reliefarmen quartären Tonen gebildet. Es erfolgen zwei Reisernten im Jahr; während des Winters liegen die Felder brach.

Die Untersuchungen wurden auf drei Feldern durchgeführt, die seit 5 Jahren (Feld QV), 20 Jahren (Feld QY) bzw. über 100 Jahren (Feld QO) für Nassreisanbau genutzt werden. Die lehmigen Böden weisen einen Oberboden (puddled layer) von 11-14 cm und eine Pflugsohle (plough pan) mit einer Mächtigkeit von 0,4 bzw. 5 cm auf.

## METHODEN

### Vertikale Infiltration

Die Infiltration in die Pflugsohle wurde mit klassischen Doppelringinfiltrometern gemessen. Auf drei Feldern wurden je 9 bzw. 12 Messungen durchgeführt, die im Abstand von wenigen Metern regelmäßig über das Feld verteilt wurden.

### Lateraler Fluss

Laterale Fließeigenschaften des Oberbodens wurden auf zwei Feldern über eine Fließlänge von 50 cm untersucht. Dazu wurde der durch einen künstlichen Gradienten erzeugte laterale Durchfluss mit 24 Blechen (15 cm breit) in 100ml-Flaschen aufgefangen (Abb. 1) und jeweils der Durchbruch des Tracers Bromid bestimmt.

Um die Heterogenität der Abflüsse beider Felder miteinander vergleichen zu können, wurde eine kumulative Darstellung der Ergebnisse nach Quisenberry et al. (1994) gewählt. Zunächst wird der Anteil eines jeden Bleches am Gesamtabfluss

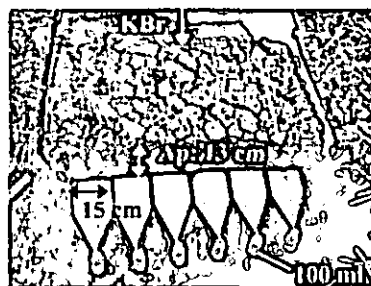


Abb. 1: Versuchsaufbau lateraler Fluss.

berechnet. Diese Werte werden in absteigender Reihenfolge sortiert und aufaddiert. Der kumulative Abfluss wird dann gegen den jeweiligen Anteil am Gesamtfließquerschnitt aufgetragen.

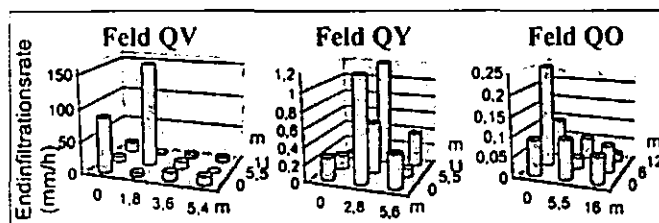
Um die Fließungleichgewichte zu quantifizieren, wurde ein Heterogenitätsindex nach Stagnitti et al. (1999) berechnet. Dafür wird die kumulative Standard-Beta-Verteilung, die zwei unabhängige Parameter enthält, an den kumulativen Abfluss angepasst. Der Heterogenitätsindex berechnet sich dann aus dem Quotient von Standardabweichung und Mittelwert der Beta-Verteilung.

## ERGEBNISSE

### Vertikale Infiltration in die Pflugsohle

Die Infiltrationsrate in die Pflugsohle betrug auf den seit 5, 20 bzw. über 100 Jahren für Nassreisanbau genutzten Feldern durchschnittlich 27,4, 0,51 bzw. 0,09 mm/h, respektive (Abb. 2). Eine Abhängigkeit der Infiltrationsrate vom Alter des Feldes ist zu erkennen. Dies ist mit einer mit dem Bearbeitungsalter zunehmenden Verdichtung und Mächtigkeit der Pflugsohle zu erklären.

In der Literatur werden für vergleichbare, gepuddelte Böden Werte zwischen 0,02 und 0,6 mm/h genannt (u.a. WÖPREIS et al. 1992, KUKAL et al. 2002).



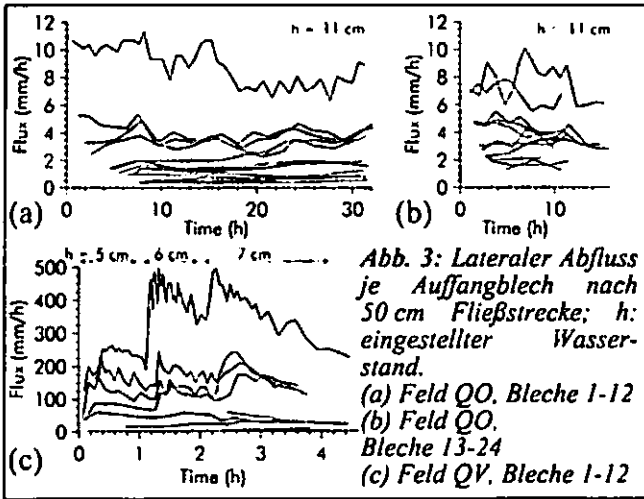
NA	5 Jahre	20 Jahre	>100 Jahre
Min	1,8 mm/h	0,07 mm/h	0,02 mm/h
Max	157,3 mm/h	1,38 mm/h	0,26 mm/h
x	27,4 mm/h	0,51 mm/h	0,09 mm/h
σ	46,7 mm/h	0,47 mm/h	0,07 mm/h

Abb. 2: Endinfiltrationsraten der Felder QV, QY und QO; NA: Nutzungsalter als Reisfeld; x: arithmetisches Mittel; σ: Standardabweichung.

### Lateraler Fluss

Der gemessene Durchfluss pro Blech variierte zwischen 0 und 400 mm/h auf Feld QV (8 von 12 Blechen am Abfluss beteiligt) sowie zwischen 0,4 und 10 mm/h auf Feld QO (alle 24 Bleche am Abfluss beteiligt)(Abb. 3).

Eine kumulative Darstellung von Durchfluss gegen Abflussquerschnitt belegt die deutlichen Fließungleichgewichte (Abb. 4). Homogener Fluss würde



eine Einheitsgerade erzeugen (mit einem Heterogenitätsindex von 1); je stärker die tatsächlichen Werte davon abweichen, desto heterogener ist der Fluss.

Der Heterogenitätsindex ist für Feld QV deutlich größer als auf Feld QO (Abb. 4a). Dies ist auf den stärkeren Austrocknungsgrad von Feld QV mit entsprechender Bildung von Schrumpfungsrissen zurückzuführen, die sich im Feld QO erst im Anfangsstadium befinden.

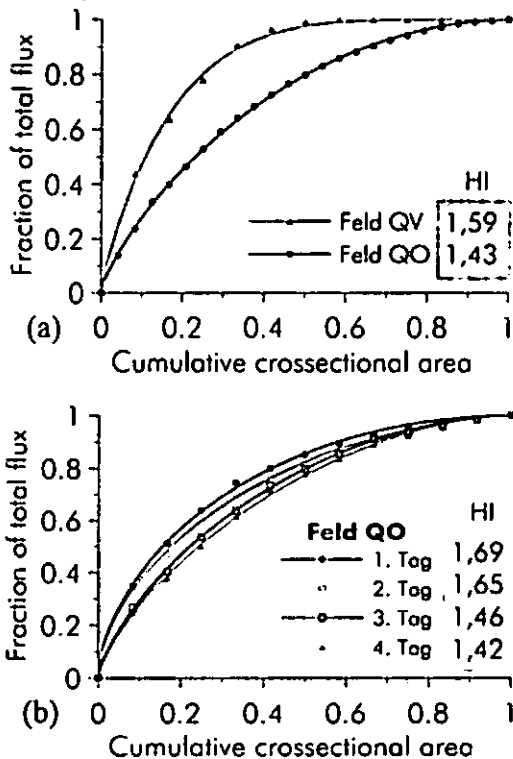


Abb. 4: Kumulativer lateraler Abfluss bezogen auf den Fließquerschnitt; Punkte: Messwerte; Linie: angepasste kumulative Standard-Beta-Verteilung; HI: Heterogenitätsindex nach Stagnitti et al. (1999)

Ein Vergleich der durchschnittlichen Durchflüsse am ersten bis vierten Versuchstag auf Feld QO zeigt erwartungsgemäß, dass die Heterogenität des Flusses mit zunehmender Versuchsdauer abnimmt (Abb. 4b). Der Anteil des Bodenquerschnitts, der am Abfluss beteiligt ist, nimmt mit der Zeit zu.

**AUSBLICK**

Die ermittelten Ergebnisse dienen in weitergehenden Arbeitsschritten als Grundlage für eine Modellentwicklung zur Abbildung feldskaliger Wasser- und Stoffflüsse in Paddy-Reisfeldern (Abb. 5) unter besonderer Berücksichtigung der präferentiellen Komponente.

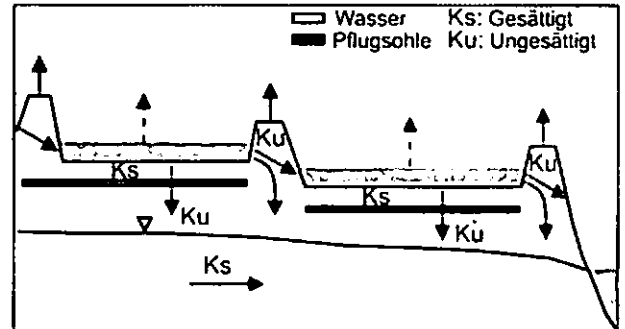


Abb. 5: Feldskalige Wasserflüsse in überstauten, terrassierten Reisfeldern

**DANK**

Die Feldarbeit wurde in Zusammenarbeit mit dem Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, durchgeführt. Dieses Projekt wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanziell gefördert (LE 945/8-1).

**LITERATUR**

KUKAL, S.S. & G.C. AGGARWAL (2002): Percolation losses of water in relation to puddling intensity and depth in a sandy loam rice (*Oryza sativa*) field. *Agricultural Water Management*, 57: 49-59.

QUISENBERRY, V. L., PHILLIPS, R.E. & J.M. ZELEZNIK (1994): Spatial distribution of water and chloride macropore flow in a well-structured soil. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 1294-1300.

STAGNITTI, F., LI, L., ALLINSON, G. et al. (1999): A mathematical model for estimating the extent of solute- and water-flux heterogeneity in multiple sample percolation experiments. *Journal of Hydrology*, 57: 59-69.

WOPEREIS, M.C.S., WÖSTEN, J.H.M., BOUMA, J. et al. (1992): Hydraulic resistance in puddled rice soils: measurement and effects on water movement. *Soil and Tillage Research*, 24: 199-209.

# Wasserströmung in einer gepackten Bodensäule mit präferenziellem Fließweg: Experiment und Hierarchische Modellierung

J. Maximilian Köhne<sup>1</sup> und Binayak P. Mohanty<sup>2</sup>

## EINLEITUNG

Mechanistische Modelle werden zunehmend zur Analyse von präferenziellem Stofftransport in strukturierten Böden verwendet. Aufgrund der Komplexität und Parameteransprüche dieser Modelle, sowie der Limitierung bislang verfügbarer Messtechniken, sind Modellevaluierungen anhand geeigneter experimenteller Daten bisher rar. Ziel dieser Studie war (1) die Messung von Wasserflüssen im präferenziellen Fließweg (PFW), in der Matrix, sowie zwischen den Regionen (PFW-Matrix) im Bodensäulenexperiment, und (2) die Evaluierung von vier numerischen Modellen verschiedener Komplexität anhand der gewonnenen experimentellen Daten.

## VERSUCHSAUFBAU

Die Anlage (Abb. 1) besteht aus einer Bodensäule (24.4 cm Durchmesser, 80 cm hoch) mit separaten Auslässen für Matrix und mit Grobsand befülltem PFW. Am unteren Rand verhindert eine 5 cm hohe Röhre Wasseraustausch zwischen Matrix und PFW. Mit Vakuumpumpe und Puffertanks erfolgt die hochkonstante Unterdruckregelung. In 5 Tiefen werden jeweils in Matrix und PFW Wassergehalte mit TDR- und TDR-Coil Sonden, und Tensionen mit Mini-Tensiometer gemessen. Ungesättigte Infiltration erfolgt mit einem Tensionsinfiltrimeter, welches automatisiert wiederbefüllt werden kann.

## MODELLE

Die evaluierten Modellkonzepte sind in Abb. 2 gezeigt. Als Referenzmodell wurde die Pseudo-3D „Axisymmetric Richards’ Equation“ (ARE) in HYDRUS-2D (Simunek et al., 1999) invers an die Messdaten angepasst. Die damit erhaltenen regionenspezifischen hydraulischen Parameter wurden anschliessend in HYDRUS-1D (Simunek et al., 1999, 2003) verwendet zur Evaluierung eines „Equivalent Continuum Models“ (ECM), d.h. Richards’ Gleichung mit bimodalen hydraulischen Funktionen (Durner, 1994), und zwei Dual-Permeabilitätsmodellen mit Wassertransferterm 1. Ordnung (DPM1) (Gerke und van Genuchten, 1993) und mit Term 2. Ordnung (DPM2) nach Köhne et al. (2004).

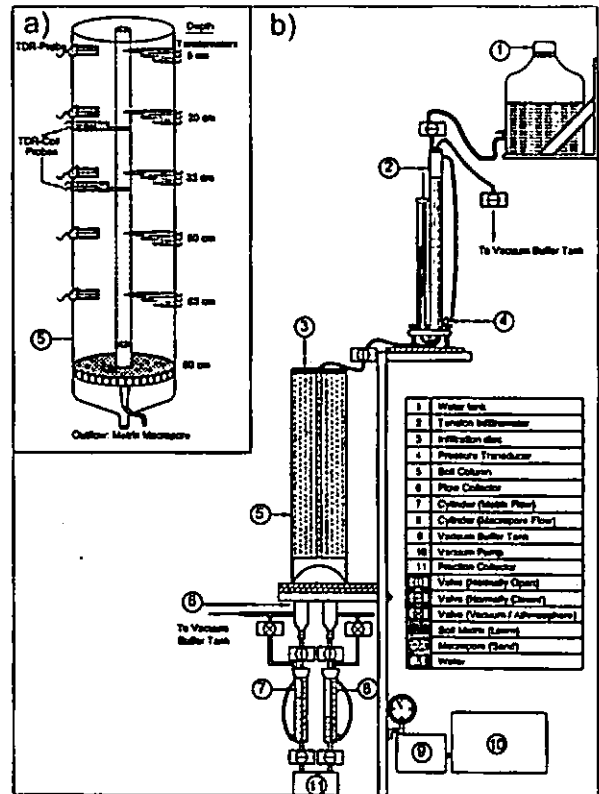


Abb.1: Säulenanlage zur Untersuchung der Wasserströmung in und zwischen PFW und Bodenmatrix.

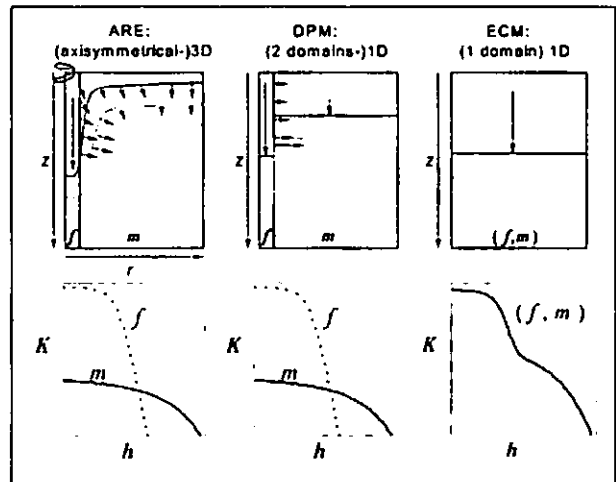


Abb.2: Modellkonzepte für präferentiellen Fluss

## ERGEBNISSE

Abbildung 3 zeigt Messdaten für kumulative Infiltration und Abfluss sowie Modellergebnisse für ARE, DPM1, DPM2, and ECM für Gesamtboden (Abb. 3a), und gemessene versus simuliert kumulative Abflüsse aus PFW and Matrix (Abb. 3b). Alle Modelle beschreiben die Messdaten zufriedenstellend.

<sup>1</sup> Institut für Landnutzung, Universität Rostock, [max.koehne@uni-rostock.de](mailto:max.koehne@uni-rostock.de).

<sup>2</sup> Department of Biological & Agricultural Engineering, Texas A&M University.

Das ECM kann konzeptbedingt keine regionenspezifischen Abflüsse berechnen, und DPM1 unterschätzt den Matrixabfluss aufgrund des vereinfachten Wassertransfers 1. Ordnung (Abb. 3b).

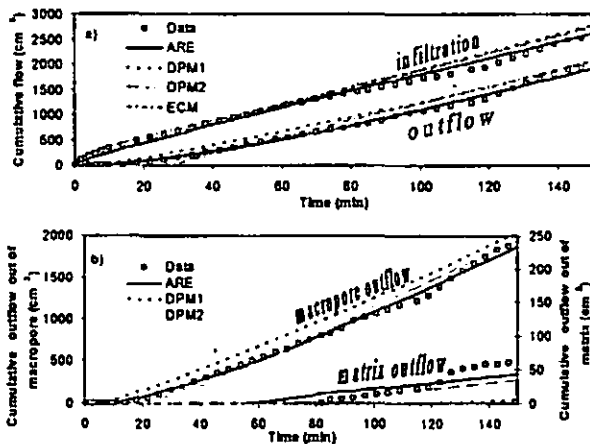


Abb. 3: Daten und Simulation des Infiltrationsexperiments: a) kumulative Infiltration und Abfluss (Gesamtboden), b) kumulativer Abfluss aus Makropore und Matrix.

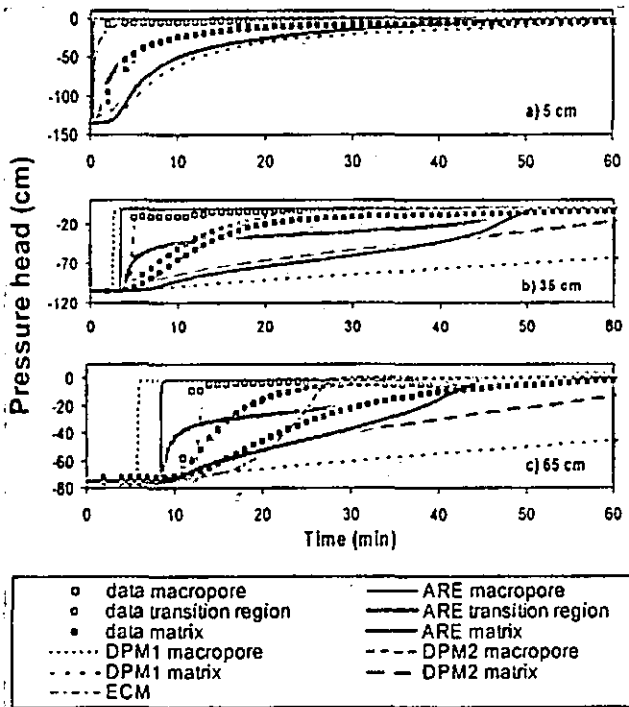


Abb. 4: Daten und Simulationsergebnisse: Regionenspezifische Tensionen in a) 5 cm, b) 35 cm, c) 65 cm Tiefe.

Die gemessenen Tensionen in Matrix und PFW werden von den Modellen in der Genauigkeitsrangfolge ARE > DPM2 > DPM1 > ECM getroffen. Die individuelle inverse Anpassung würde die Ergebnisse von DPM1, DPM2 und ECM verbessern, dabei Unterschiede in der mathematischen Modellstruktur durch „effektive Parameter“ verwischen (hier nicht gezeigt). Die mit ARE gefitteten kontrastierenden hydraulische Funktionen für Matrix und PFW sind in Abb. 5a,b

gezeigt, sowie auf Gesamtboden bezogen in Abb. 5c,d illustriert.

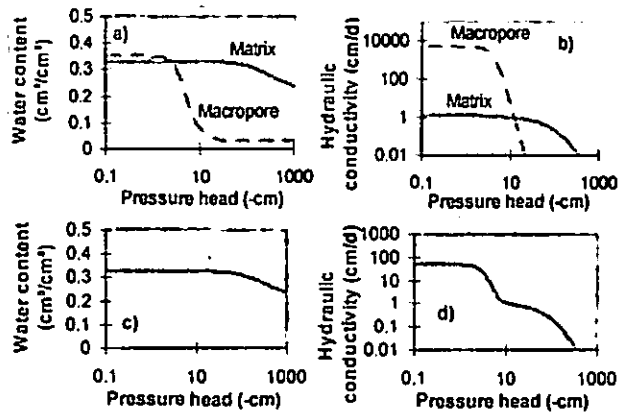


Abb.5: mit ARE invers ermittelte regionenspezifische a) PF-WG Kurve, b) hydraulische Leitfähigkeit, und aufsummierte, gesamtbodenbezogene c) PF-WG Kurve, d) hydraulische Leitfähigkeit.

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Unser Versuchsaufbau ermöglicht Detailuntersuchungen zum Fluss im Boden mit präferentiell Fließweg. Das ARE Referenzmodell erschien zur Abbildung der Messdaten geeignet. Die anderen Ansätze (mit ARE Parametern) wichen aufgrund vereinfachter Modellkonzepte in der Reihenfolge DPM2-DPM1-ECM von ARE ab, lieferten aber auch akzeptable Ergebnisse zum präferentiellen Fluss. Das ECM kann verwendet werden, solange nicht präferentieller Stofftransport gerechnet werden soll.

## LITERATUR

Durner, W., Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, *Water Resour. Res.* 30(2):211-223, 1994.

Gerke, H.H., and M.T. van Genuchten, A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media, *Water Resour. Res.* 29, 305-319, 1993.

Köhne, J.M., B.P. Mohanty, J. Simunek, and H.H. Gerke, Numerical evaluation of a second-order water transfer term for variably saturated dual-permeability models, *Water Resour. Res.*, 40, W07409, doi:10.1029/2004WR003285, 2004.

Simunek, J., M. Sejna, and M. T. van Genuchten, The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 2.0, *IGWMC - TPS - 70*, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 202pp., 1998.

Simunek, J., M. Sejna, and M. T. van Genuchten, The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 2.0, *IGWMC - TPS - 53*, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 251pp., 1999.

Simunek, J., N.J. Jarvis, M.T. van Genuchten, and A. Gärdenäs, Review and comparison of models for describing nonequilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone, *J. Hydrol.* 272, 14-35, 2003.

# Bromidtransportexperiment an einem Dränstandort: Ein- und zweidimensionale numerische Modellierung von physikalischen Ungleichgewichtsprozessen.

Sigrid Köhne<sup>1</sup>, Bernd Lennartz<sup>1</sup>, J. Maximilian Köhne<sup>1</sup> und Jirka Šimůnek<sup>2</sup>

## Kurzfassung

Um den Einfluss von Dränung und Ungleichgewichtsprozessen auf den Stoffaustrag aus strukturierten gedränten Böden zu untersuchen, wurden Bromidtransportversuche auf drei Parzellen mit unterschiedlichen Dränagegeometrien durchgeführt. Die experimentellen Ergebnisse (Abfluss, Bromidkonzentration im Abfluss) wurden mit ein- und zweidimensionalen physikalisch basierten Stofftransportmodellen für einfach-poröse (SPM) und für dual-poröse (MIM) Böden analysiert. Die SPM Simulationen zeigten unrealistisch hohe Konzentrationen. Die MIM Simulation zeigte, dass über 60 % des applizierten Bromids in immobile Bodenwasserbereiche gelangte, was dazu führte, dass sehr niedrige Konzentrationen im Dränabfluss auftraten. Diese Studie weist darauf hin, daß bei physikalisch basierter Modellierung des Stofftransports in strukturierten, gedränten Böden sowohl das dräninduzierte zweidimensionale Fließfeld als auch physikalisches Ungleichgewicht berücksichtigt werden sollten.

## 1. Einleitung

Entwässerung von landwirtschaftlichen Flächen durch Dränagesysteme beschleunigt den Austrag von Nährstoffen und trägt zur Verschlechterung der Qualität von Grundwasser und Oberflächengewässern bei. Insbesondere der mit präferentiell Wasserfluss verbundene Stofftransport im physikalischen Ungleichgewicht bewirkte raschere und höher konzentrierte Stoffausträge aus Dräns als unter Gleichgewichtsbedingungen erwartet wurde (LENNARTZ ET AL., 1999; GISH ET AL., 2004).

Verschiedene Ansätze zur physikalisch basierten Modellierung des Stofftransports zu Dränsystemen berücksichtigten zumeist entweder das zweidimensionale (2D) Fließfeld, das den Stofftransport in der gesättigten Zone oberhalb der Dräntiefe prägt und kein Transportungleichgewicht (z.B. MOHANTY ET AL., 1998) oder sie berücksichtigten das Transportungleichgewicht allerdings in eindimensionaler (1D) Betrachtung (z.B. LARSSON ET AL., 1999).

Für die vorliegende Studie wurde das 1D mobil-immobile Model (MIM) für vertikalen, instationären

Wasserfluss und nicht-reaktiven Stofftransport mit Wasser- und Stoffaustausch zwischen mobiler und immobil Region (ŠIMŮNEK ET AL., 2003) um die horizontale Dimension ergänzt. Das Ziel der Studie war, den Einfluss des dränage-typischen 2D-Fließfeldes und des physikalischen Transportungleichgewichts auf den Stoffaustrag aus einem strukturierten gedränten Böden zu untersuchen.

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Experiment

Auf drei Parzellen (N2, N4 und N8) des Versuchsstandorts Infeld (Niedersachsen), die unterschiedliche Dränabstände (16, 18 und 12 m) und -tiefen (1.28, 1.01 und 0.96 m) aufwiesen wurden Transportversuche mit Bromid (Br) durchgeführt. Nach der Br-Applikation im November 1999 wurden im Winter 1999/2000 Dränabflüsse und Br-Konzentrationen im Dränabfluss gemessen. Zusätzlich wurden physikalische Bodenparameter für 4 Horizonte der knickigen Brackmarsch in Feld- und Labormessungen erhoben.

### 2.2 Simulationen

Die angewendeten Modelle basieren auf der 1D und 2D Richards Gleichung für instationären Wasserfluss in entweder einfach porösen Medien (SPM) oder dual-porösen Medien (mobil-immobile Model, MIM), jeweils entsprechend kombiniert mit der Konvektions-Dispersions- oder der mobil-immobil-Stofftransport-gleichung. Die Modelle sind Teile des modifizierten HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK ET AL., 2003) und von HYDUS-2D (ŠIMŮNEK ET AL., 1999), das entsprechend modifiziert wurde.

Fünf Fälle wurden unterschieden:

**1D-SPM:** Modellparameter wurden unabhängig bestimmt

**2D-SPM:** Modellparameter wurden unabhängig bestimmt

**1D-MIM:** Stofftransferkoeffizienten 1.Ordnung wurden für 4 Horizonte mithilfe der N4-Daten invers geschätzt

**2D-MIM:** Wasser- und Stofftransferkoeffizienten 1.Ordnung wurden für 4 Horizonte mithilfe der N4-Daten invers geschätzt

**1D-MIMforward:** die mit 2D-MIM ermittelten Wasser- und Stofftransferkoeffizienten wurden eingesetzt.

Mit den fünf Ansätzen wurden zunächst die Daten von Parzelle N4 evaluiert. Die dabei ermittelten Parameter wurden genutzt, um die Messergebnisse von N2 und N8 zu prognostizieren.

## 3. Ergebnisse und Diskussion

Etwa 10 Tage nach der Br-Applikation begann bei den Parzellen N2, N4 und N8 die Dränabflusssaison 1999/2000. Br konnte bereits in den ersten Abflussproben detektiert werden. Die Br-

<sup>1</sup> Institut für Landnutzung, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Universität Rostock  
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18051 Rostock  
E-mail: sigrid.koehnc@uni-rostock.de

<sup>2</sup> Dept. of Environmental Sciences, University of California, Riverside, 900 University Avenue, A135 Bourns Hall, Riverside, CA 92521.

Durchbruchskurven der 3 Parzellen fluktuierten um eine Konzentration von 5 mg/L ohne spezifische Anzeichen präferentieller Transportphänomene, wie einen hohen Anfangspeak oder ereignisabhängige weitere Peaks, zu zeigen (s. Abb.1 bis 3).

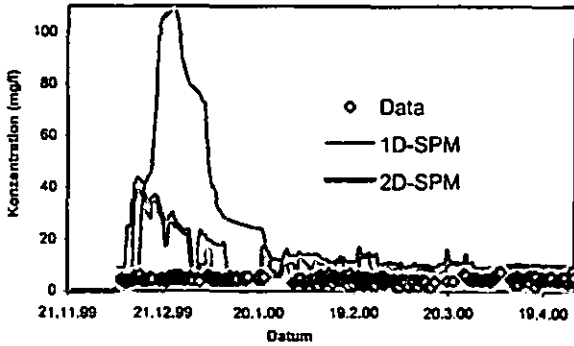


Abb. 1 Gemessene Br-Durchbruchskurve von Parzelle N4 vs. 1D- und 2D-SPM Simulationen.

Abb. 1 zeigt beispielhaft für Parzelle N4, dass der 1D und der 2D Modellansatz für einfach-poröse Böden (1D-SPM, 2D-SPM) die gemessene Durchbruchskurve weit überschätzten. Das 2D-SPM simulierte allerdings einen niedrigeren Peak und eine stark dispergierte Konzentrationskurve, weil es die stärker variierenden 2D-Transportwege und den Grundwasserzufluss berücksichtigte.

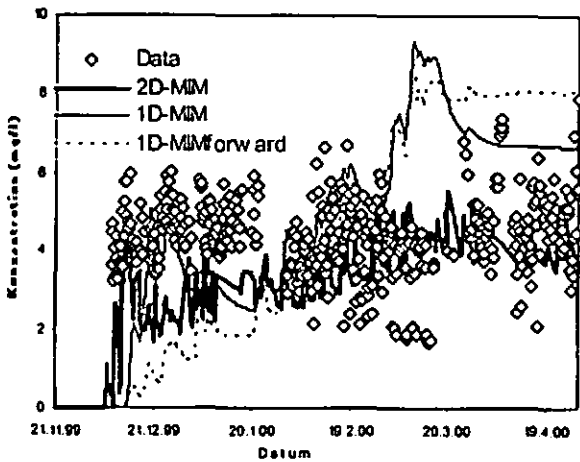


Abb. 2 Gemessene Br-Durchbruchskurve von Parzelle N4 vs. 1D- und 2D-MIM Simulationen.

Die Simulationen mit dem MIM-Ansatz trafen die gemessenen niedrigen Br-Konzentrationen sehr viel besser als die SPM Simulationen (s. Abb. 2). Dies wird durch den Transfer von ca. 67 % des applizierten Br in immobile Bodenwasserbereiche vornehmlich während der Infiltration im Herbst 1999 bewirkt (nicht gezeigt). Allerdings wiesen die 1D-MIM und 1D-MIMforward Simulationen gegenüber den Messdaten einen verspäteten Anstieg und ab März 2000 zu hohe Konzentrationen auf. Die 2D-MIM Simulation repräsentierten die gemessenen Daten am besten.

Die mit Hilfe von Parzelle N4 parametrisierten MIM-Ansätze wurden verwendet, um die Br-Durchbruchskurven der Parzellen N2 und N8, die

andere Dräntiefen und -abstände aufwiesen vorauszusagen. Abb. 3 zeigt die Prognosen am Beispiel der Parzelle N8.

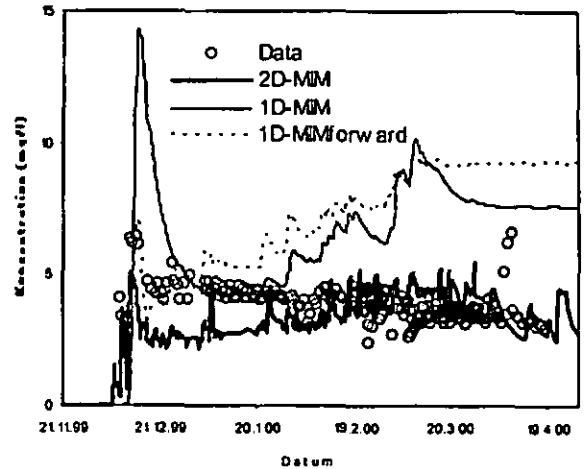


Abb. 3 Gemessene Br-Durchbruchskurve von Parzelle N8 vs. 1D- und 2D-MIM Simulationen.

Die Prognosen durch die 1D-MIM Modelle überschätzten die gemessenen Br-Konzentrationen. Lediglich das 2D-MIM zeigte konsistent eine gute Wiedergabe der gemessenen Durchbruchskurven.

#### 4. Schlussfolgerungen

Die MIM Simulation zeigte, daß über 60 % des applizierten Br in immobile Bodenwasserbereiche gelangte, was dazu führte, daß sehr niedrige Konzentrationen im Dränabfluß auftraten. Diese Studie weist darauf hin, daß bei physikalisch basierter Modellierung des Stofftransports in strukturierten, gedrähten Böden sowohl das dräninduzierte 2D Fließfeld, als auch physikalisches Ungleichgewicht, berücksichtigt werden sollten.

#### 5. Literatur

- GISH T.J., KUNG, K.-J.S., PERRY, D.C., POSNER, J., BUBENZER G., HELLING, C.S., KLADIVKO, E.T., STEENHUIS, T.S., 2004. Impact of preferential flow at varying irrigation rates by quantifying mass flux. *J. Environ. Qual.* 33, 1033-1040.
- LARSSON, M.H., JARVIS, N.J., TORSTENSSON, G., KASTEEL, R., 1999. Quantifying the impact of preferential flow on solute transport to tile drains in a sandy field soil. *J. Hydrol.* 215, 116-134.
- LENNARTZ, B., MICHAELSEN, J., WICHTMANN, W., WIDMOSER, P., 1999. Time variance analysis of preferential solute movement in a tile drained field site. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 39-47.
- MOHANTY, B.P., SKAGGS, T.H., VAN GENUCHTEN, M.Th., 1998. Impact of saturated hydraulic conductivity on the prediction of tile flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 1522-1529.
- ŠIMŮNEK, J., JARVIS, N.J., VAN GENUCHTEN, M.Th., GÄRDENÄS, A., 2003. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *J. Hydrol.* 272, 14-35
- ŠIMŮNEK, J., ŠEJNA, M., VAN GENUCHTEN, M.Th., 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiply solutes in variably saturated media. Version 2.0, IGWMC-TPS-53, International Ground Water Modelling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, p.202.

# Einfluss unterschiedlicher Beweidungsintensitäten auf Bodenstabilität, Bodenstruktur und Wasserhaushalt in der Inneren Mongolei, V.R. China

J. Krümmelbein\*, S. Peth\*, R. Horn\*

## 1 Einleitung

Steigende Beweidungsintensitäten (v.a. Schafe, Ziegen) in der Inneren Mongolei, V.R. China, haben zu einer ausgedehnten Degradation des Weidelandes, einhergehend mit erhöhter Bodenerosion und Desertifikation geführt. Im Rahmen der Forschergruppe MAGIM (Matter Fluxes in Grasslands of Inner Mongolia as influenced by stocking rate) werden von neun Teilprojekten die Auswirkungen unterschiedlicher Landnutzungssysteme auf Wasser-, Stickstoff- und Kohlenstoffhaushalt und auf Bodenerosion auf unterschiedlichen Raumskalen untersucht. In dem hier vorgestellten Teilprojekt soll der Einfluss unterschiedlicher Beweidungsintensitäten auf Bodenstabilität und Wasserhaushalt auf der Feldskala betrachtet werden.

## 2 Material und Methoden

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Inneren Mongolei, V.R. China, etwa 500 km nördlich von Beijing in der Nähe von Xilinhot. Bei den untersuchten Böden handelt es sich um Chernozeme unter *Leymus chinensis*- bzw. *Stipa grandis*- Steppe mit einem jährlichen Niederschlag von etwa 300 mm. Untersucht wurden vier Standorte mit unterschiedlichen Beweidungsintensitäten (unbeweidet seit 1979; unbeweidet seit 1999; Winterweide mit 1.3 Schafeinheiten/ha; kontinuierlich beweidet mit 1.3 Schafeinheiten/ha). Für die Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit wurden Stechzylinderproben von 100 cm<sup>3</sup> Volumen in den Tiefen 4-8 cm, 18-22 cm, 30-34 cm und 40-44 cm entnommen. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit wurde mit Hilfe eines Haubenpermeameters bestimmt. Zusätzlich wurde an in den ersten beiden Tiefen in horizontaler Richtung entnommenen Stechzylindern ebenfalls die gesättigte Wasserleitfähigkeit bestimmt, um eine mögliche Anisotropie der gesättigten Wasserleitfähigkeit erfassen zu können.

Die Vorbelastung wurde an ungestörten Stechzylinderproben (236 cm<sup>3</sup>, d = 10 cm, h = 3 cm) bestimmt, die in den Tiefen 5-8 cm und 18-21 cm vertikal entnommen worden waren.

Sie wurden auf -300 hPa vorentwässert und in einer Drucksetzungsapparatur (Spindeltrieb, Antriebssteuerung mit PC, wasser-spannungs-, setzungs- und zeitabhängige Messungen, Tensiometer mit Druckaufnehmer) einaxial mit Auflasten von 20 bis 400 kPa belastet.

## 3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.1. Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Die Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeit sind insgesamt am größten auf der seit 1979 unbeweideten Fläche, gefolgt von der seit 1999 unbeweideten Fläche, die weniger Zeit zur Regeneration hatte (Abb.1). Bei der beweideten Fläche ist besonders in der ersten Tiefe die gesättigte Wasserleitfähigkeit durch Schaftritt verringert.

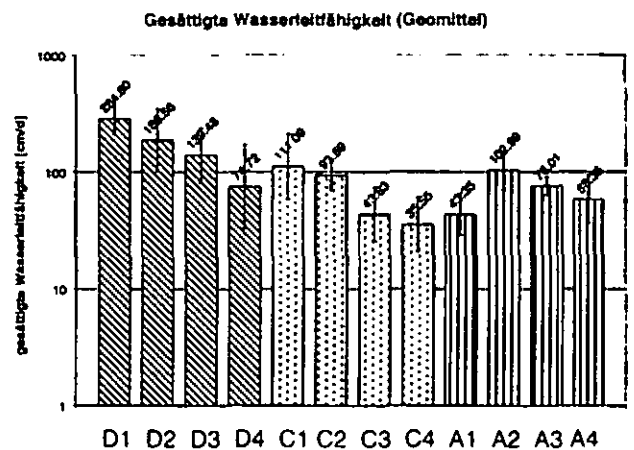


Abb. 1: Einfluss der Beweidung auf die Höhe der gesättigten Wasserleitfähigkeit (D = unbeweidet seit 1979, C = unbeweidet seit 1999, A = Winterweide mit 1.3 Schafeinheiten; 1 = 4-8 cm, 2 = 18-22 cm, 3 = 30-34 cm, 4 = 40-44 cm). Die Balken zeigen die Standardabweichung.

#### 3.1.1. Anisotropie der gesättigten Wasserleitfähigkeit

Auf der seit 1979 unbeweideten Fläche ist Anisotropie mit höheren Werten in vertikale Richtung fest zu stellen (Abb. 2), dies deutet auf hohe biologische Aktivität sowohl von Bodenflora als auch -Fauna hin. Des Weiteren findet eine Bodenauflockerung nach Verdichtung hauptsächlich lateral und nicht nach oben gerichtet statt, was durch die höhere gesättigte Wasserleitfähigkeit in vertikale Richtung ebenfalls zum Ausdruck gebracht wird.

Auf der Winterweide finden sich umgekehrte Zustände (Abb.3), die gesättigte Wasserleitfähigkeit ist in horizontale Richtung deutlich höher als in vertikale. Dies ist in verdichteten Böden mit Plattenstruktur festzustellen (ZHANG, 1996).

\*Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Olshausenstr. 40, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 24118 Kiel



Anisotrope gesättigte Wasserleitfähigkeit  
Unbeweidet seit '79; 4-8cm

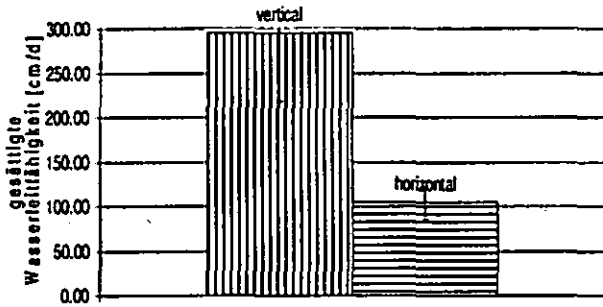


Abb. 2: Auswirkung eines Beweidungsschutzes (seit 1979) auf die Anisotropie der gesättigten Wasserleitfähigkeit. Die Balken zeigen die Standardabweichung.

Anisotrope gesättigte Wasserleitfähigkeit  
Winterweide; 4-8cm

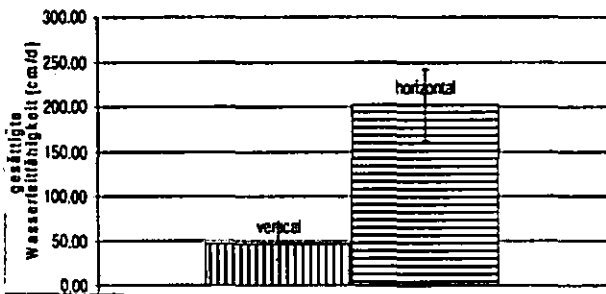


Abb. 3: Auswirkung einer Beweidung durch Schafe und Ziegen (1.3 Schafeinheiten/ha; Winterweide) auf die Anisotropie der gesättigten Wasserleitfähigkeit. Die Balken zeigen die Standardabweichung.

In der zweiten untersuchten Tiefe (18-22 cm) ist diese deutliche Anisotropie der Wasserleitfähigkeit bereits nicht mehr nach zu weisen. Die Auswirkungen des Schaftritts auf die Anisotropie der gesättigten Wasserleitfähigkeit beschränken sich auf etwa die oberen 10 cm des Bodens (ZHANG & HORN, 1996).

### 3.2 Vorbelastung

Die Vorbelastung zeigt auf den beiden unbeweideten Standorten in der Tiefe 3-5 cm deutlich geringere Werte als auf den beweideten Standorten, wobei die Vorbelastung auf der am längsten unbeweideten Fläche am geringsten ist (Abb.4). Die Werte auf den beweideten Flächen sind deutlich höher als auf den unbeweideten Flächen, der Boden gewinnt an mechanischer Stabilität (GREENWOOD et al., 1997). Die ermittelten Vorbelastungswerte stimmen gut mit den Kontaktflächendrücken, die von Ziegen und Schafen erzeugt werden (~80 kPa), überein.

Vorbelastung 5-8cm, Vorentwässerung -300hPa

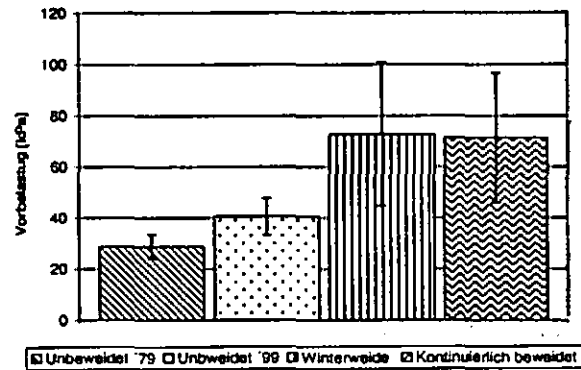


Abb. 4: Einfluss unterschiedlicher Beweidungsintensitäten auf die Werte der Vorbelastung in 5-8 cm Tiefe. Die Balken zeigen die Standardabweichung

### 4 Ausblick

Vergleicht man die Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeit, zeigt sich, dass diese durch Beweidung vermindert werden. Der größte Effekt von Beweidung bzw. Schutz vor Beweidung ist in der ersten Tiefe festzustellen. Die Anisotropie der gesättigten Wasserleitfähigkeit verweist auf eine Änderung der Struktur durch Beweidung hin zu einem plattigen Gefüge. Auch die Vorbelastungswerte, die durch Beweidung erhöht werden, deuten auf eine Veränderung der Struktur hin. Um die Auswirkung der Beweidung auf Bodenstabilität und Wasserhaushalt weiterhin einordnen zu können, sollen weitere mechanische und hydraulische Parameter wie der Scherwiderstand, das Verhalten bei zyklischen Belastungen, die ungesättigte Wasserleitfähigkeit sowie die Sorptivität; Benetzungshemmung und die Zugfestigkeit von Bodenaggregaten bestimmt werden.

#### Literatur.

- K.L. Greenwood, D.A. MacLeod and K.J. Hutchinson (1997): Long-term stocking rate effects on soil physical properties. *Austr. Journ. Of Experimental Agriculture*, 1997, 37, 413-419
- M.A. Naeth, R.L. Rothwell, D.S. Chanasky and A.W. Bailey (1990): Grazing Impacts on Infiltration in Mixed Prairie and Fescue Grassland Ecosystems of Alberta. *Can. J. Soil Sci.* 1990, 70, 593-605
- H.Q. Zhang (1996): Anisotrope Variation der gesättigten Wasserleitfähigkeit einer unterschiedlich beweideten Salzmarsch im Deichvorland. *Z. Pflanzenern. Bodenk.* 1996, 159, 129-135
- H.Q. Zhang and R. Horn (1996): Einfluß der Beweidung auf die physikalischen Eigenschaften einer Salzmarsch im Deichvorland (I): die gesättigte Wasserleitfähigkeit und das Bodengefüge. *Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung*, 1996, 37, 24-31

# Auswirkungen anthropogen verursachter Hydrophobizität im Oberboden auf Wasserbewegung und Stofftransport im Untergrund.

K. Lipsius und W. Durner<sup>1</sup>

## Einleitung

Präferentieller Transport kann zur beschleunigten Auswaschung von Schadstoffen in Böden führen und damit die Gefahr für Grundwasserkontamination erhöhen. Präferentieller Transport kann durch Hydrophobizität des Oberbodens hervorgerufen werden. Um die Auswirkungen heterogenen Wasserflusses auf das Auswaschen und den Verbleib von Kontaminanten im Boden sowie auf zu erwartende Ergebnisse bei Sickerwasserbeprobungen zu analysieren, wurden beobachtete Infiltrationsmuster in einem zwei-dimensionalen numerischen Simulationsmodell nachgestellt und Austrags-szenarien unter natürlichen Bedingungen gerechnet (Lipsius et al., 2004).

## Material und Methoden

Am Experimentalstandort wurde frisch imprägniertes Holz über einen Zeitraum von 70 Jahren offen gelagert. Abtropfende und abgelöste Imprägnierungsmittel führten zu einem Eintrag von Kupfer, Chrom, Arsen und Teerölen in den Boden, so dass dieser oberflächennah stark hydrophob wurde (Buczko, 2001). Der Boden ist ein anthropogen überprägter Podsol aus pleistozänem Flugsand mit einer Mächtigkeit von mehreren Metern. Der Grundwasserspiegel liegt etwa in 6 m Tiefe. Im Rahmen eines Monitoring-Programms waren am Untersuchungsstandort insgesamt 16 Saugrohre in den Tiefen von 1.5 und 2 Metern installiert an denen über einen Zeitraum von 2 Jahren Bodenlösung gewonnen wurde. Es ergab sich eine sehr hohe Variabilität sowohl der gewonnenen Wassermengen als auch der Schadstoffkonzentrationen (Hopp et al., 2005). Zur Visualisierung des Transportregimes in der Umgebung der Saugkerzen wurden im Sommer 2004 zum Abschluss der Untersuchungen Farbtracerexperimente durchgeführt. Eine Brilliant Blue FCF (BB)-Lösung wurde nach gründlicher Vorbefeuchtung des Geländes mit einer Beregnungshöhe von 50 mm auf die Kontrollfläche ausgebracht. Die Fläche wurde anschließend auf einer Länge von insgesamt 11 Metern aufgegraben und der Anteil gefärbter Fläche in zwei hintereinander liegenden Profilen durch Bildanalyse ausgewertet.

Die Hydrophobizität des Oberbodens verhinderte über die gesamte Profillänge eine flächige Infiltration und

führte zu einem punktuellen Eindringen von Wasser und BB in den Unterboden (Abb. 1). Die beobachteten Infiltrationsmuster zeigten oberflächennah eine Verteilungszone, darunter eine Transmissionszone gefolgt von einer Vermischungszone.

Der Färbeversuch wurde am Computer in einer zwei-dimensionalen Simulation nachgestellt. Durch Skalierung der hydraulischen Eigenschaften wurde dabei ein ähnliches Muster der simulierten BB-Konzentration erreicht (Abb. 2). Für diese nachgestellten Profile wurde das Austragsverhalten eines schwach sorbierenden Stoffs ( $k_p = 0.05 \text{ l kg}^{-1}$ ) gerechnet, der anfangs homogen im Gebiet verteilt ist. Über einen Zeitraum von 1500 Tagen wurden am oberen Rand standorttypische meteorologische Bedingungen, den Seiten des simulierten Gebiets no-flux Bedingungen, am unteren Rand freie Drainage angenommen.

## Ergebnisse und Diskussion

Im Vergleich zum homogenen Profil (Abb. 3 und 4) erfolgt durch den präferentiellen Transport zunächst ein verstärkter Austrag, der allerdings bald stark zurückgeht und – über die Fläche integriert – weitaus geringer wird als der Transport in einem homogenen Medium (Abb. 6). Die kontaminierten Bereiche unterhalb der hydrophoben Bereiche bleiben konserviert. Die gegenwärtig verfügbaren punktuellen Beprobungstechniken zur Sickerwassergewinnung führen zu zufälligen, stark unterschiedlichen Konzentrationen (Abb. 5), und können nicht verwendet werden, um zu einer repräsentativen Aussage über die Sickerwasserbelastung zu kommen. Die jeweils über 1m integrierten Austräge unterscheiden sich ebenfalls erheblich um mehr als Faktor 10 (Abb. 6).

## Dank

Das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen förderte Teile der Untersuchungen unter Projektnummer 55-8740.1-2000/BT.

## Literatur

- Buczko U., L. Hopp, W. Berger, W. Durner, S. Peiffer, and M. Scheithauer (2004): Simulation of chromium transport in the unsaturated zone for predicting contaminant entries into the groundwater, *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167: 284-292.
- Hopp, L., K. Lipsius, S. Peiffer, and W. Durner (2005). Spatial and Temporal Variability of Arsenic and Chromium in Soil Solution at a former Wood Impregnation Site. *J. Hydrol.* (in review).
- Lipsius, K., S.J. Mooney, and W. Durner (2004): Analysis of contaminant fluxes in a water repellent sandy soil., Proceedings of the EUROSIL 2004 Conference, Freiburg/Germany, Sept. 4-12, 1-9. [http://www.igoe.tu-bs.de/soil/pics\\_download/downloads/pubs/2004\\_Eurosoil.id412\\_Lipsius\\_full.pdf](http://www.igoe.tu-bs.de/soil/pics_download/downloads/pubs/2004_Eurosoil.id412_Lipsius_full.pdf).

<sup>1</sup> Technische Universität Braunschweig, Institut für Geoökologie, Langer Kamp 19c, 38106 Braunschweig. E-mail w.durner@tu-bs.de

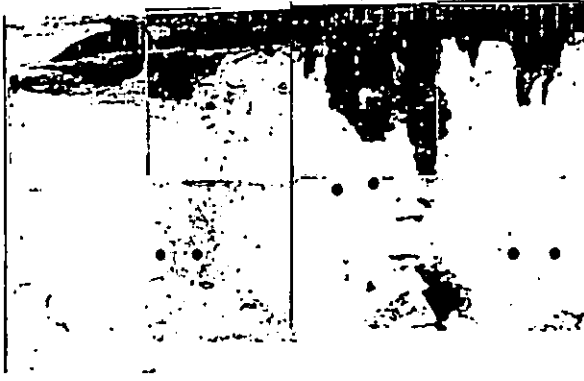


Abb. 1: BB-Infiltrationsmuster im Profil an einer der Längsseiten der Grube (Breite 4m, Höhe 2 m). Die Kreise in der unteren Bildhälfte markieren die Positionen der Saugröhren in den Tiefen 1 m und 1.5 m.



Abb. 2: Simuliertes BB-Infiltrationsmuster. Die Positionen der 6 Saugkerzen sind markiert. Am unteren Bildrand sind die Positionen und die in Abb 4 und 6 verwendete Linienart von vier 1m breiten Abschnitten angegeben, für welche die Stoffausträge bilanziert werden.

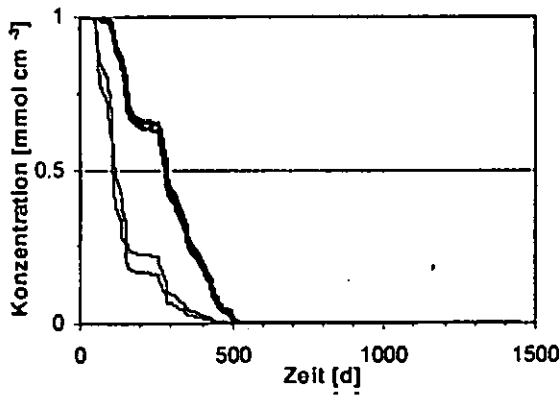


Abb. 3: Simulierte Konzentrationsentwicklung an den Beobachtungspunkten für das homogene Bodenprofil.

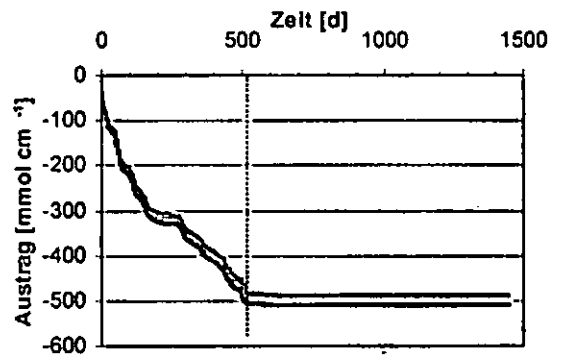


Abb. 4: Simulierte Austräge aus den 1m breiten Teilabschnitten am unteren Profilrand für das homogene Profil. Die Farben der Linien entsprechen denen in Abb. 2

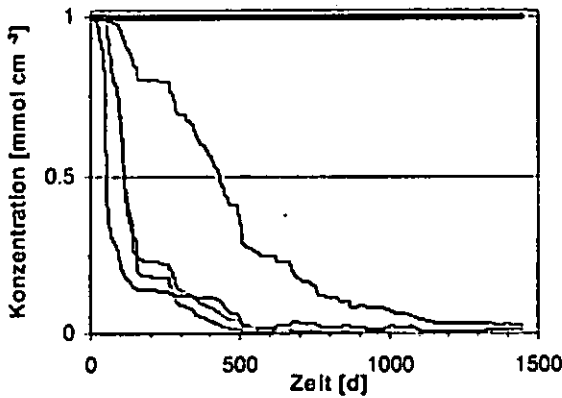


Abb. 5: Simulierte BB-Konzentrationsentwicklung an den Beobachtungspunkten für das heterogene Bodenprofil.

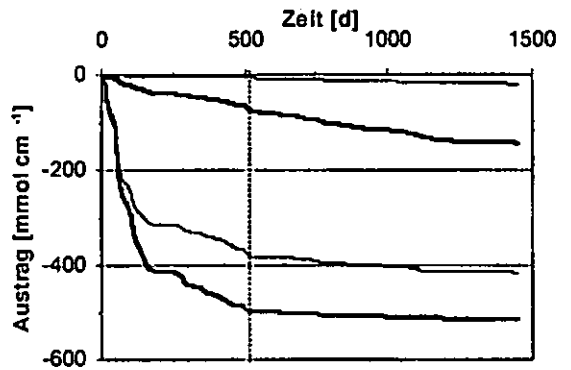


Abb. 6: Simulierte Austräge aus 1 m Teilabschnitten am unteren Profilrand für das heterogene Profil. Die Farben der Linien entsprechen denen in Abb. 2

**Einführung der Rheometrie in die Bodenmechanik: (Mikro-)Strukturelles Verhalten von Böden in Abhängigkeit von Salzkonzentration und Wassergehalt**

Wibke Markgraf, Rainer Horn, Stephan Peth

**Einleitung**

Die Rheologie als solche ist eine Wissenschaft, die dazu dient, das mechanische Verhalten von Fluiden und plastischen Körpern zu bestimmen. Die Rheometrie ist ein messtechnisches Mittel, rheologische Daten, basierend auf Grunderkenntnissen der klassischen Mechanik, zu erhalten. Bislang war die Rheometrie ein weitestgehend unbekanntes Gebiet der Bodenmechanik. Durch die Anwendung von Oszillationstests (Amplituden- und Frequenztests) ist es möglich, die (mikro)strukturelle Stabilität – hier am Beispiel von Na-Bentonit – in Abhängigkeit von der Salzkonzentration und dem Wassergehalt zu untersuchen.

**Material**

Die Messeinheit: Rotations-Rheometer (Platte-Platte-Messsystem) MCR 300, Paar Physica, Ostfildern (Abb. 1).

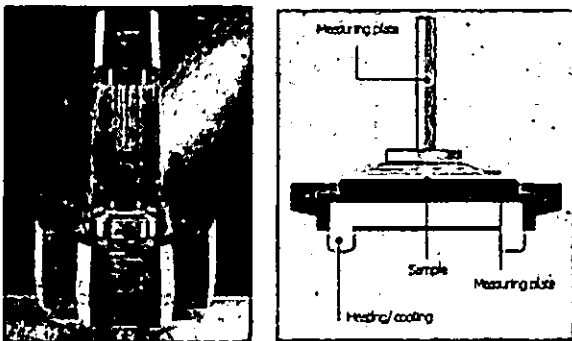


Abb. 1: Rheometer MCR 300

Abb. 2: Platte-Platte-Messsystem mit Peltier-Einheit

**Weitere Gerätedaten:**

Platten-Durchmesser: 25 mm, mit einer glatten Oberfläche  
 Plattenabstand zwischen rotierender und fest installierter Platte: 1 mm.

\* Dipl.-Geogr. Wibke Markgraf  
 Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
 Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde  
 Olshausenstr. 40, 24098 Kiel  
 w.markgraf@soils.uni-kiel.de

Peltier Einheit (Abb. 2): eine konstante Temperatur von 20 °C wird erzeugt.

Probenmaterial: Ibeco Seal – 80 (Na-Bentonit), u.a. in den Ingenieurwissenschaften als Deponieabdichtung bekannt.

Haupttonmineralbestand: Montmorillonit  
 Salzlösungen (NaCl + Aqua dest.) unterschiedlicher Konzentrationen werden angesetzt (Übersicht Tab. 1).

Güteklassen	C0	C1	C3
Salzkonz. [g/l]	0	0.08	0.96
EC [ $\mu$ S/cm] 25°C	-	121.7	1296
$\Psi_0$ [kPa]	-	- 4.38	- 46.66

Tab. 1: Eigenschaften der Salzlösungen (NaCl + Aqua dest.), EC= Elektrische Leitfähigkeit,  $\Psi_0 = -36 \cdot EC$  [dS/m] nach U.S.S.L. (1954)

Die elektrische Leitfähigkeit (EC) entspricht einem vergleichbarem Salzgehalt in [g/l].

250g (250 ml) NaCl + Aqua dest. werden zu 50g Ibeco Seal - 80 (= 1:5 W/F Relation) hinzugefügt und manuell verrührt (10 Min.), anschließend mit einem Drigalskispatel mechanisch gerührt. Die durchschnittliche Dichte beträgt 1.12 g/cm<sup>3</sup>.

**Methode**

Das Prinzip eines Oszillationstests ist in Abb. 3 dargestellt. Alle Arten von viskoelastischen Substanzen, wie auch Bodensubstrate, Pasten und Gele können gemessen werden.

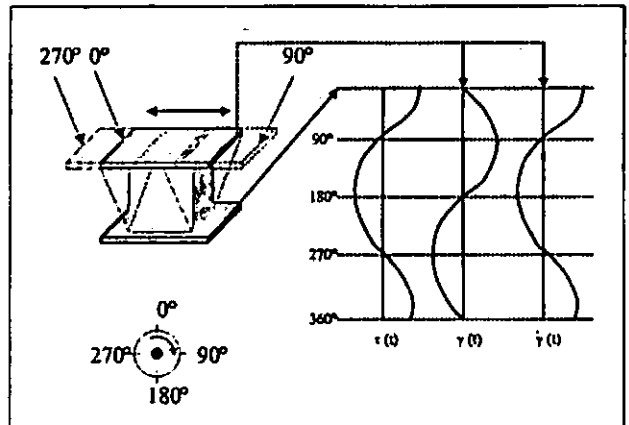


Abb.3: Prinzip eines Oszillationstests im LVE-Bereich nach Maxwell (nach Mezger, 2002).

Der rotierende Zylinder dreht sich bei einer Kraft  $F$  über der Einheitsfläche  $A$ . Da die untere Platte unbeweglich ist, ergibt sich aus der Bewegung eine Scherung des Probenmaterials. Voraussetzung ist der vollkommene Kontakt beider Platten mit der Probe.

$$\begin{array}{ll} \text{Scherspannung} & \tau \text{ [Pa]} = F \text{ [N]} / A \text{ [m}^2\text{]} \\ \text{Deformation} & \gamma \text{ [\%]} = s \text{ [m]} / h \text{ [m]} \end{array}$$

Die sog. LVE range (linear viscoelastic) - Analyse wird verwendet, um die Fließgrenze zu berechnen - abgeleitet aus Amplitudentests, die entweder die Deformation  $\gamma$  (controlled shear deformation, CSD) oder die Scherspannung  $\tau$  (controlled shear stress, CSS) als Vorgabe beinhalten. Im Fall der Frequenztests basieren die Berechnungen auf der *Carreau-Yasuda* Gleichung, die während der Tests automatisch erfolgen.

### Ergebnisse und Ausblick

Abbildung 4 zeigt Kurvenverläufe, die aus einem Amplitudentest (CSD) resultieren. Obwohl die Fließgrenze  $\tau_y$  in [Pa] (äußere Kräfte > interne/strukturelle Kräfte) als ein Bereich definiert ist, wird nur ein Punkt als Ergebnis angezeigt. Die Deformation  $\gamma$  (bei Erreichen der Fließgrenze) hängt vom Plattenabstand und deren Durchmesser ab. 100 % Deformation entsprechen 1 mm, 1 % entspricht 0.01 mm. Errechnete Deformationen bewegen sich in einem Bereich von 1 bis 4 % und sind als niedrig einzustufen.

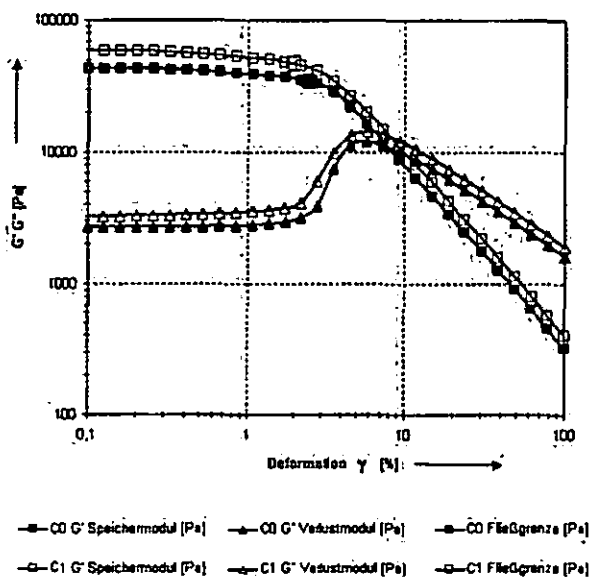


Abb. 4: Ergebnisse eines Amplitudentests mit controlled shear deformation (CSD), C0 und C1 im Vergleich, LVE range Berechnung.

Der Speichermodul  $G'$  in [Pa] repräsentiert das elastische Verhalten einer Probe, der Verlustmodul  $G''$  in [Pa] die viskose Komponente.  $G' > G''$ : Die elastische Komponente übersteigt die viskose.

$G' < G''$ : Ein Solzustand ist gegeben, die viskose Komponente übersteigt die elastische, Substanzen kriechen oder fließen.

Frequenztests (Abb. 5) liefern Informationen über Verlust- und Speichermoduli, die komplexe Viskosität ( $|\eta^*|$  in [Pa s]) sowie Kurzzeit- und Langzeitstrukturverhalten von Substraten.

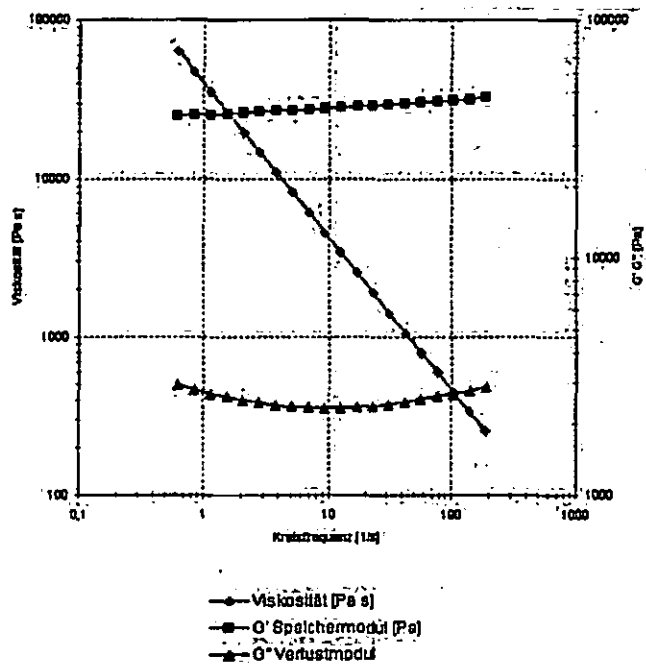


Abb. 5: Ergebnis eines Frequenztests, Ibeco Seal 80, C3 Salzgehalt, Deformation konst. = 0,1 %

Vorläufige Ergebnisse haben gezeigt, dass sich die Rheometrie dazu eignet, mechanische Auswirkungen unterschiedlicher Salkonzentrationen auf (mikro)struktureller Ebene, bis hinauf zur Aggregatebene, zu verfolgen. Weitere Untersuchungen an verschiedenen Substraten, mit Variationen von Salzen ( $MgCl_2$ ,  $CaCl_2$  u.a.), Salkonzentrationen und Wassergehalten werden neue Erkenntnisse bringen, vor allem im Hinblick auf den Einfluss des osmotischen Potentials  $\Psi_0$  auf die effektive Spannung  $\sigma^e$ .

Ghezzehei, T.A. and D. Or (2001): Rheological Properties of Wet Soils and Clays under Steady and Oscillatory Stresses. In: *Soils Sci. Soc. Am. J.* 65: 624-637.  
 Mezger, Th.G. (2002): *The Rheology-Handbook - for Users of Rotational and Oscillatory Rheometers*. Vincentz-Verlag, Hannover. ISBN 3-87870-745-2  
 U.S.S.L., Staff of (1954): *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils*. In: USDA Handbook no. 60. GPO: Washington, D.C.

## Verlagerung von Agrochemikalien und Enzymen durch Dränsysteme (Lysimeterexperimente)

Lothar Müller<sup>a</sup>, Stephan Wirth<sup>b</sup>, Jürgen Augustin<sup>b</sup>, Marion Tauschke<sup>b</sup>, Uwe Schindler<sup>a</sup>, Axel Behrendt<sup>c</sup>, Frank Eulenstein<sup>d</sup>, Ralph Meißner<sup>e</sup>

### Einleitung

Standorte mit Dränsystemen, oftmals Grundwasserstandorte, sind eutroph und fruchtbar, aber möglicherweise durch Umweltbelastungen infolge unkontrollierten Stoffaustuges geprägt. Es liegen immer noch deutliche Wissenslücken vor. Eine der wichtigsten Ursachen dafür ist das Fehlen geeigneter Untersuchungsmethoden, die auf die Spezifik der Standortverhältnisse zugeschnitten sind. Wir wählten Modell- Dränsysteme (Grundwasserlysimeter nach Abb. 1A und B), die typische, vom potentiellen Austrag extreme Drän-Bedingungen dieser Standorte repräsentieren. Besonderes Augenmerk richteten wir auf die Klärung folgender Fragen:

- Stellt die Cl-Tracermethode unter den gegebenen Standortverhältnissen im Vergleich zur Nitrat- oder zur <sup>15</sup>N-Nitratracermethode ein zuverlässiges Verfahren zur Abschätzung des N-Austrages dar?
- Welches Verlagerungsverhalten zeigen Agrochemikalien bei verschiedenen Substratvarianten?
- Sind bei Böden der Tiefpflug-Sanddeckkultur (TSDK, Schindler u. a., 1999) schnelle Durchbrüche von Agrochemikalien im Sandbalken zu erwarten und lassen sie sich durch eine Modifikation des Pflugprofils reduzieren?
- In welcher Größenordnung sind Enzymaktivitäten im Dränwasser nachzuweisen und lassen sie sich als Verlagerung von Enzymen deuten?

### Material und Methoden

Auf Grundwasserlysimetern unterschiedlicher Bodensubstrate wurden sowohl konventionelle Chlorid-Tracer (50 g Cl/m<sup>2</sup> als Calcium-Chlorid) sowie Nitrat (50 g N/m<sup>2</sup> als Calcium-Nitrat) appliziert. Um zu klären, ob der ausgewaschene Stickstoff aus der Düngung oder aus sonstigen, vor allem bodenbürtigen Quellen, stammt, wurde auf vier Lysimetern ein Tracerversuch mit dem stabilen Isotop <sup>15</sup>N vorgenommen. Zur Ermittlung des Verbleibs des applizierten Tracer-<sup>15</sup>N wurden im Verlauf des Experimentes nachstehende Wasser-, Boden- und Pflanzenfraktionen wie folgt auf ihren N- und <sup>15</sup>N-Gehalt untersucht: NH<sub>4</sub>- und NO<sub>3</sub>-N im Grundwasser: Kjeldahl-Destillation, danach emissionsspektrometrische Bestimmung der <sup>15</sup>N-Häufigkeit mit NO16-PC (FAUST et al. 1982); Austauschbares NH<sub>4</sub>- und NO<sub>3</sub>-N im Boden: Extraktion aus feuchten Bodenproben mit 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-Lösung, danach Bestimmungen analog zu NH<sub>4</sub>- und NO<sub>3</sub>-N im Grundwasser; Gesamt-N im getrockneten Bodensubstrat und der Sproßtrockenmasse: simultane Bestimmung des Stickstoffgehaltes und der <sup>15</sup>N-Häufigkeit mit Hilfe der Gerätekopplung Elementaranalysator VARIAN EL (N-Bestimmung nach Dumas-Prinzip) und NO16-PC (Meier und Schmidt, 1992).

Die verwendeten Grundwasserlysimeter (Typ A nach Abb. 1) hatten eine Oberfläche von 2,25 m<sup>2</sup> und eine Tiefe von 1,5 m. Der eingestellte GWF betrug 90-100 cm bei Ackerkulturen und 55-70 cm bei Gras. Wasser, Cl und N wurden über 5 Jahre bilanziert.

Darüberhinaus wurden in dieser Anlage sowie in überstauten Dränen des Typs B und an einigen Praxisdränanlagen des Typs C nach Abb. 1 Enzymaktivitäten analysiert. Die Modellanlagen A und B hatten den Vorteil, daß die Bodeneigenschaften und Enzymaktivitäten der Böden parallel ermittelt werden konnten.

Die Wasserproben wurden gekühlt bei 4°C, die Bodenproben luftgetrocknet, auf 2 mm abgesiebt und kühl gelagert. Analyse: 1 g Boden in 25 ml HEPES Puffer (0,5 M, pH 7), Inkubation: 60 min bei 20°C, Zentrifugieren (10 min, 10000 g, 4°C), kalorimetrische

Bestimmung bei 492 nm, Fluoresceindiacetat-(FDA) Hydrolase nach Wirth (1992, 2005), Endo-Cellulase kolorimetrisch (Miller et al., 1960), Bakteriengehalte auf Agar-Platten (Wirth, 1991), Urease, Ammoniumoxidation, Nitritoxidation, Nitratreduktase (Wolff und Remde, 1998).

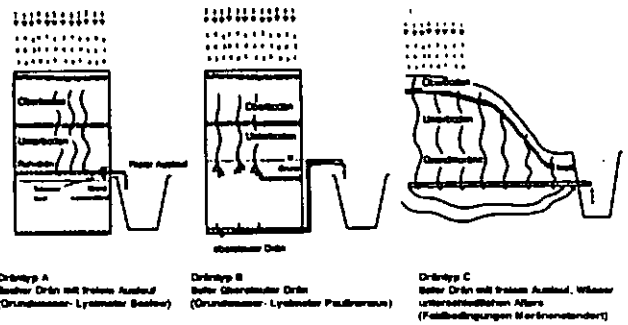


Abb. 1: Dräntypen

### Ergebnisse

#### Verlagerung von Chlorid und Stickstoff unter grundwasser-nahen Bedingungen

Die Bodensubstrate beeinflussten die Verlagerung von Chlorid maßgeblich. Grundwasserbeeinflusste Sandböden hatten mittlere Verlagerungsgeschwindigkeiten von 3-5 mm/mm Abfluß am Peak der Tracerkonzentration und 2-3 mm/mm bei 50% Austrag. Tonböden und Niedermoor wiesen mittlere Verlagerungsgeschwindigkeiten von 1-2 mm/mm Abfluß auf (Tabelle 1).

Tabelle 1: Verlagerung eines Chloridtracers bei verschiedenen Böden

Lysim.	Boden	Verlagerung bei 50 % Austrag	
		dm/Jahr	mm / mm Abfluß
1	Flachgründiges Niedermoor	2,6	1,0
2	TSDK	3,4	1,3
4	TSDK mit Sperrschicht	2,2	0,9
3/8	Sand-Gley	5,5	2,1
9/10	Tongley, sandunterlagert	2,6	1,4
11/12	Tongley, tiefgründig	1,9	1,3

TSDK= Tiefpflug-Sanddeckkultur

Die auf den Abfluß bezogenen relativen Verlagerungstiefen waren bei den Tonböden und der TSDK-Variante mit Sperrschicht deutlich geringer als erwartet. Maßgebliche Ursache dürften Versickerungsprozesse sein, die nicht unmittelbar abflußwirksam wurden (siehe Toleranzlevel nach Abb. 1 a) sowie Diffusionsprozesse. Somit befanden sich wesentliche Anteile des Chlorids im oberflächennahen Grundwasser und unterlagen einem wesentlich langsameren Austrag. Das ist kein Fehler in den Modellbedingungen, sondern typisch für Niederungsgebiete. Stoffe verbleiben lange im System.

Für das Verfahren der Tiefpflug-Sanddeckkultur wurde die Ausgangshypothese einer möglichen intensiven Stoffverlagerung durch den Sandbalken bestätigt. Horizontale Torfbalken im Unterboden können als Puffer und Sperre wirken

Chlorid und Stickstoff verhielten sich von Beginn an völlig unterschiedlich (Abb. 2). Es wurde weit weniger N als Cl ausgetragen. Der N-Austrag war zudem qualitativ unterschiedlich und überwiegend bodenbürtig, entstammte also nicht der unmittelbaren Düngung. Tabelle 2 enthält zwei durch Schrägstrich getrennte Teilbilanzen als Mittel von 5 Jahren. Die Zahlen der Reihe a) kennzeichnen die mit konventionellen Methoden ermittelte Bilanz. Negative Salden deuten auf Mineralisierung, positive Salden auf Immobilisation und/oder gasförmige Verluste hin.

Die Zahlen der Reihe b) sind eine Untermenge dieser Bilanz. Zwei Drittel der Düngergabe waren modellmäßig als markierte, einmalige hohe Gabe verabreicht worden. Die Salden des markierten N sind durchweg positiv. Nur etwa die Hälfte dieses Stickstoffs war beim Niedermoor und beim tiefgründigen Tongley in den ermittelten Abfuhrkomponenten wiederzufinden. Beim Sandgley war es sogar nur etwa ein Achtel. Die N- Auswaschung kann auf diesen Standorten nicht durch Cl abgebildet werden.

Leibniz - Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V., 15374 Müncheberg, Eberswalder Str. 84

<sup>a</sup> ZALF - Institut für Bodenlandschaftsforschung

<sup>b</sup> ZALF - Institut für Landschaftsstoffdynamik

<sup>c</sup> ZALF - Forschungsstation Paulinenaue

<sup>d</sup> ZALF - Institut für Landnutzungsforschung und Landschaftsökologie

<sup>e</sup> UFZ - Leipzig - Halle GmbH, Lysimeterstation, D- 39615 Falkenberg

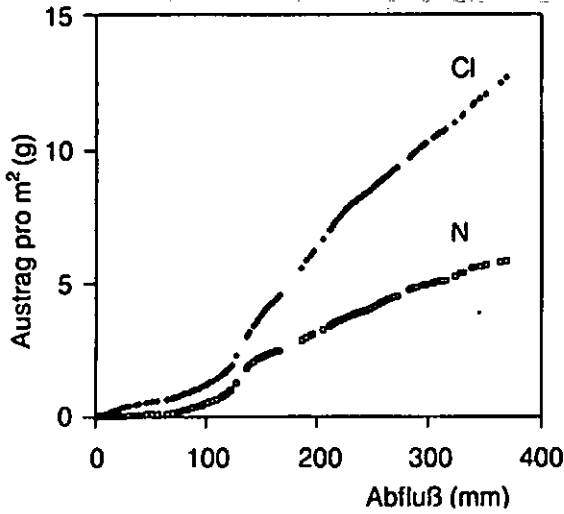


Abb. 2: Summenkurve des Austrages von Cl und N bei Lysimeter 11 während der ersten 3 Jahre

Tabelle 2: N-Teilbilanz (kg/ha-a)

Boden	Zufuhr		Abfuhr		Saldo
	Düngung	Sonst.	Entzug	Abfluß	
Niedermoor (Lys. 1)	150 <sup>a)</sup>	16	210	12	-56
	100 <sup>b)</sup>	0	54	1	+45
Sand-Gley (Lys. 8)	150	15	67	19	+79
	100	0	5	9	+86
Ton-Gley, flachgründig (Lys. 10)	150	15	118	4	+43
	100	0	36	1	+63
Ton-Gley, tiefgründig (Lys. 12)	150	15	165	4	-4
	100	0	45	2	+53

a) obere Zahl= mittlere Düngung im Bilanzzeitraum,  
b) untere Zahl = <sup>15</sup>N Teilmenge, Sonst = Deposition + Zufluß

Wassergesättigtes Milieu oberhalb der Dräns kann zu erhöhten Ammoniumgehalten im Grundwasser und Dränwasser führen. Maßgebliche Anteile oder Dominanz von Ammonium-N wurden bei der TSDK mit Sperrschicht und bei sandunterlagerten Tonböden gemessen. Durch anaerobe, reduktive Bedingungen im Kapillarsaum und im drännahen Raum wird die Oxydation mineralisierten Ammonium-N gehemmt. Darüberhinaus kann Umwandlung von Nitrat-N in Ammonium-N erfolgen. Redoxpotentiale des Abflusses lagen im Bereich von 30-180 mV bei schwach basischem Austragsmilieu. Daraus abgeschätzte rH-Werte (ISSS, 1994) lagen zumindest im Winter/Frühjahr unter 19 und wiesen auf reduktive Verhältnisse hin. Bei TSDK war das mit erhöhten organischen Austrägen verbunden. Stichpunktartige Messungen der Belastung des Dränabflusses (SAK, DOC) ergaben gegenüber den anderen Bodenvarianten deutlich erhöhte Werte.

Der konvektive wassergebundener N-Austrag war gering (Sandböden < 20 kg/ha-a, übrige Böden < 15kg/ha-a, zumeist < 10 kg/ha-a, Tabelle 2). Es war kein eindeutiger Zusammenhang zwischen N-Zufuhr bzw. N- Saldo und N-Austrag durch Abfluß vorhanden.

#### Enzymaktivitäten im Boden und Dränwasser

Enzyme sind sowohl im Boden also auch in Dränsystemen aktiv, so daß die Mehrzahl der gemessenen spezifischen Aktivitäten nicht als Austrag gedeutet werden konnte. Die Aktivitäten von FDA-Hydrolase als ein Maß der mikrobiellen Gesamtaktivität lagen für Böden aus Sand, Ton und Torf auf einem vergleichbaren Niveau. Die Enzymaktivitäten in den Abflüssen waren im Jahresverlauf weitgehend konstant. Ein signifikanter Anstieg der Aktivitäten von FDA-Hydrolasen und Cellulasen erfolgte im Mai 2001 nach Passage mit präferentieller Fluss in Kombination mit dem flachen Dränsystem mit freiem Auslauf (Abb.3, Typ A).

In Dränwässern des Typs C wurden die geringsten Enzymaktivitäten gemessen (Abb. 4). Die Populationsdichte der kultivierbaren Bakterien war mit 50 bis zu 300 Kolonien ml<sup>-1</sup> Dränwasser sehr gering.

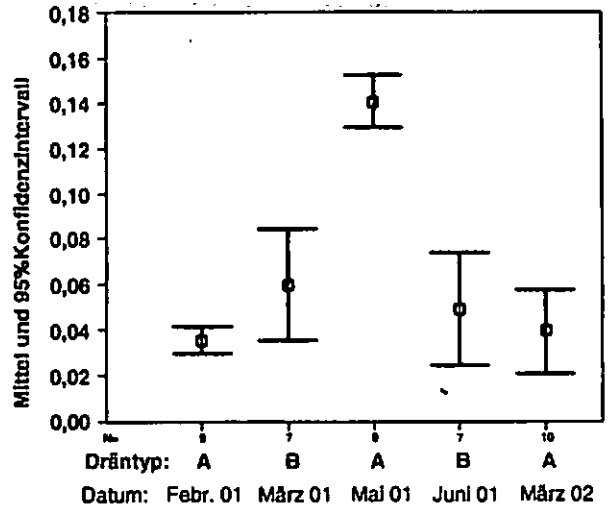


Abb. 3: FDA-Hydrolaseaktivität im Dränwasser zu unterschiedlichen Beprobungsterminen

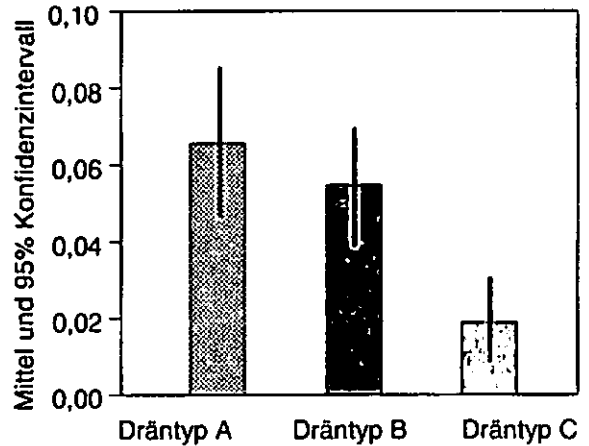


Abb. 4: FDA-Hydrolaseaktivität im Dränwasser verschiedener Dräntypen

#### Schlußfolgerungen

1. Das Verhalten / die Verlagerung von Dünger- Stickstoff kann aufgrund intensiver N-Transformationen nicht durch Chlorid-Tracer, sondern nur durch <sup>15</sup>N-Messungen erfaßt werden.
2. Das Bodensubstrat beeinflusste das Austragsverhalten von Agrochemikalien maßgeblich. Das Verlagerungs- bzw. Austragsrisiko auf grundwassernahen Standorten ist vor allem bei Ton- und Moorböden geringer als bisher angenommen.
3. Bei der TSDK sind schnelle vertikale Verlagerungen im Sandbalken analog zu Sandböden möglich. Das kann zwar durch Modifikation des Pflugprofils gebremst werden, führt jedoch zu erhöhten NH<sub>4</sub>-N-Konzentrationen im oberflächennahen Grundwasser.
4. Beim Abfluß nach Starkniederschlag, bei dem präferentieller Fluß und partikuläre Stoffausträge sehr wahrscheinlich waren., wurden signifikant erhöhte FDA-Hydrolase- und erhöhte Cellulase-Aktivitäten im Abfluß gemessen.

#### Literatur

Die Angaben können beim Erstautor angefordert werden (lmuller@zalf.de).

# Morphologische Gefügedifferenzierung bei „natürlichen“ und gestörten Lößböden auf der Grundlage röntgencomputertomographischer Untersuchungen

H. Rogasik<sup>1</sup>, I. Onasch<sup>1</sup>, O. Tomanova<sup>2</sup>, H.-J. Koch<sup>2</sup> und H. H. Gerke<sup>1</sup>

## 1. Einleitung

Die Umstellung von konventioneller auf konservierende Bodenbearbeitung führte zu Gefügeänderungen, die kleinräumig morphologisch charakterisiert und quantifiziert werden sollen.

## 2. Material und Methode

- Ungestört entnommene Bodensäulen von 785 cm<sup>3</sup> Volumen (h, d: 10 cm) aus konventionell und langjährig konservierend (Grubberarbeitstiefe: ca. 10 cm) bearbeitetem Ap-Horizont des Standortes Harste bei Göttingen (Tab. 1).

Tab. 1: Bodenphysikalische Kennzeichnung des Ap-Horizontes (10-20 cm Tiefe) bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung (Pseudovergleyte Parabraunerde aus Löß, Ut3), OS = organische Substanz,  $d_b$  = Lagerungsdichte, h = Matrixpotential,  $K(h)$  = ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit

Probe	Horizont	Gefügestufe	OS	$d_b$	h, cm Wassersäule		
					-10	-5	-1
		KA 4	g kg <sup>-1</sup>	Mg m <sup>-3</sup>	$K(h)$ , cm d <sup>-1</sup>		
konv.	Ap	bro	21	1,30	0,26	0,71	12,86
konserv.	Ap/Ah	bro/koh	21	1,47	0,31	0,46	2,35

- Kontinuierliches Scannen der Bodensäulen mit einer Schicht- und Pixelauflösung von 0,1 cm und 0,025 x 0,025 cm<sup>2</sup>

- Scheibenweise Berechnung der Lagerungsdichte sowie der Standardabweichung der Hounsfield-Einheiten (HE) der Basisvoxel, Röntgenschnittbildern gegenübergestellt

- Quantifizierung der morphologischen Bodengefügeeigenschaften durch einen in die zylindrische Bodensäule einbeschriebenen Referenzquaders von 7 x 7 x 9 cm<sup>3</sup> und Berechnung der relativen Varianz ( $\text{Varianz}/\text{SD}_{\text{max}}$ ) der HE-Werte der Voxel in unterschiedlicher räumlicher Auflösung und Parametrisierung des Verlaufs der normierten Kurve der Varianz versus log Voxelkantenlänge analog zur S-Form der van Genuchten Retentionsfunktion (van Genuchten et al., 1991) durch „ $\alpha$ “ und „ $n$ “ (Rogasik et al., 2003)

- Messung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit mit einem Disc-Infiltrimeter bei Matrixpotentialen von -10, -5 und -1 cm Wassersäule.

## 3. Ergebnisse

- Die Bodensäulen bei konventioneller BB sind bearbeitungsbedingt locker gelagert und durch einen hohen Anteil von Makroporen gekennzeichnet (Abb. 1).

- Bei konservierender BB ist der Übergangsbereich zwischen der Grubberarbeitstiefe (10 cm) und der dichter gelagerten Unterkrume scharf (Abb. 1) und durch einen Wechsel vom Bröckel- zum Kohärentgefüge gekennzeichnet. Die niedrige ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit wird durch das Kohärentgefüge hervorgerufen (Tab. 1).

- Das Bodengefüge bei konventioneller BB ist im Vergleich zur konservierenden BB durch fast doppelt so hohe Werte der maximalen relativen Varianz gekennzeichnet (Abb. 2). Die Gefügeelemente (Bröckel, Makroporen) sind vergleichsweise größer, was sich in einem niedrigeren  $\alpha$ -Wert dokumentiert (Abb. 3). Der  $n$ -Wert ist aufgrund der heterogeneren Größenverteilung der Gefügeelemente niedriger.

## 4. Schlussfolgerungen

Die Maximalwerte der Varianz bei höchster Auflösung und die abgeleiteten Parameter „ $\alpha$ “ und „ $n$ “ erlauben eine detaillierte Charakterisierung der Makrogefügeausprägung bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung.

<sup>1</sup> Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsfor- schung Müncheberg, Institut für Bodenlandschaftsforschung

<sup>2</sup> Institut für Zuckerrübenforschung Göttingen



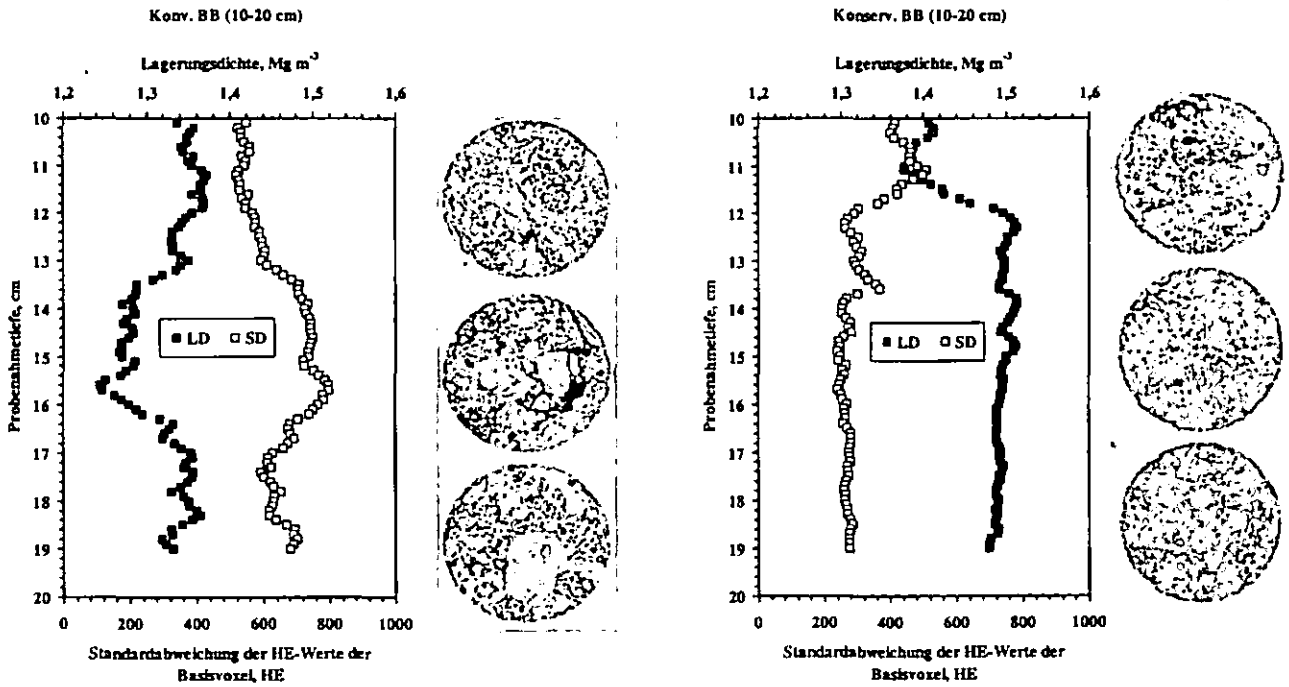


Abb. 1: Tiefenverteilung der Lagerungsdichten (LD) und Standardabweichungen der HE-Werte der Basisvoxel sowie ausgewählte Röntgenschnittbilder für konventionelle und konservierende Bodenbearbeitung

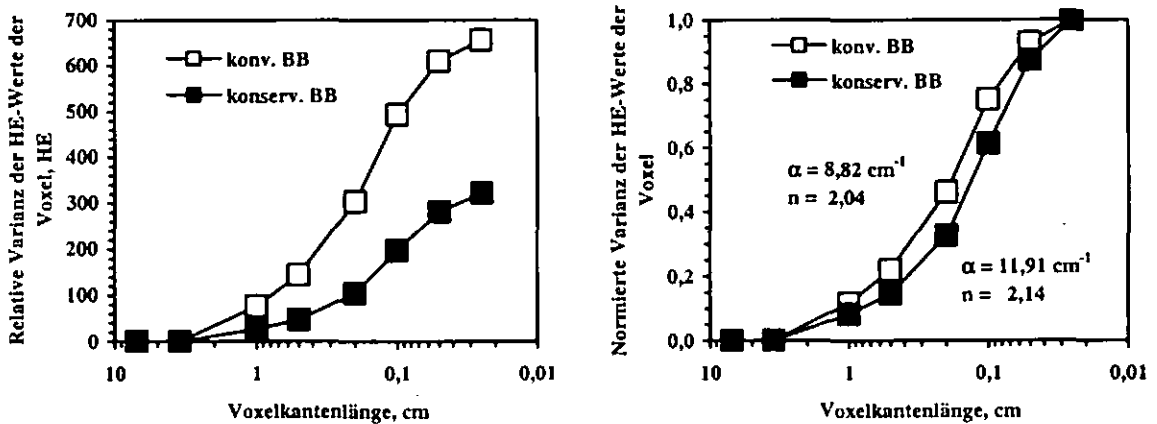


Abb. 2: Relative und normierte Varianzen der HE-Werte der Voxel in Abhängigkeit von der Voxelkantenlänge für konventionelle und konservierende Bodenbearbeitung

**Literaturverzeichnis**

Van Genuchten, M.T., F.J. Leij, & S.R. Yates. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. USEPA Rep. 600/2-91-065 (IAG-DW1293-3-934). U.S. Salinity Laboratory, USDA-ARS, Riverside, CA, USA, December 1991.

Rogasik, H., H.H. Gerke & I. Onasch. 2003. Varianz von CT-Daten unterschiedlicher räumlicher Auflösung zur Beurteilung des Bodengefüges und seiner Dynamik. Mitteiln. Dtsch. Bodenkdl. Ges. 101, 35-36.

# Säulenversuche zum Einfluss der kleinräumigen Verteilung kohligter Substanz auf den Stofftransport in Kippenböden

Wolfgang Schaaf<sup>1)</sup>, Birgit Wecker<sup>1)</sup>, Horst H. Gerke<sup>2)</sup> und Reinhard F. Hüttl<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung, BTU Cottbus\*, <sup>2)</sup>Institut für Bodenlandschaftsforschung, ZALF e.V. Müncheberg

## Einleitung

Kippböden des Lausitzer Braunkohlereviere sind gekennzeichnet durch variierende Gehalte an kohligter Substanz (Schaaf, 2004). Diese geogene organische Substanz kann feinverteilt in der ansonsten sandigen Matrix der Kippböden vorliegen, aber auch in der Skelettfraction >2 mm bis hin zu Brocken von mehreren cm Durchmesser mit Massen- und volumetrischen Anteilen bis über 40% (Schaaf et al., 2004).

In Säulenversuchen mit definierten Substratmischungen sollten folgende Hypothesen geprüft werden:

- Die geogene organische Substanz ist bedeutsam für den Stoffhaushalt von Kippböden.
- Die Anteile >2 mm bilden eine reaktive Skelettfraction in diesen Böden.
- Größe und Verteilung der kohligen Fragmente beeinflussen Stofftransport und Bodenentwicklung.

## Material und Methoden

Verwendet wurden 23 cm hohe Säulen mit 14,4 cm Durchmesser, gefüllt mit definierten homogenen Mischungen bestehend aus Quarzsand der Körnung 0,1 - 0,5 mm (mS) und kohligter Substanz der drei Größenklassen < 2 mm, 2 - 7 mm und > 7 mm. Die frisch gewonnene kohlige Substanz stammt aus dem 2. Hangendschluff des Tagebaus Jänschwalde bei Cottbus (Tab. 1). Die  $S_t$ -Gehalte und der hohe Kalkbedarf deuten auf Pyrit hin, der im frischen Material noch weitgehend unverwittert vorliegt (vgl. pH). Die Gesamtkohlenstoffgehalte waren in allen Säulen gleich (0,05 - 0,06 g  $C_t$  g<sup>-1</sup> TS).

In einer Klimakammer wurden die Säulen in je drei Wiederholungen bei konstant 10°C mit VE-Wasser (pH 4,5; mit HCl eingestellt) und bei zwei unterschiedlichen Flussraten beregnet (600 und 1200 mm a<sup>-1</sup> quasi-kontinuierlich viermal pro Tag). Das Perkolat wurde über einen Zeitraum von 670 Tagen kontinuierlich mit - 2 kPa am unteren Säulenrand abgesaugt und in ein- bis zweiwöchigen Intervallen hinsichtlich Menge und Zusammensetzung analysiert (pH-Werte mittels Glaselektrode SenTix 97T, elektrische Leitfähigkeit mittels WTW TetraCon 525 bzw. HANNA HI 8733, Hauptanionen am Dionex 500 und 120 IC, Hauptkationen am Unicam 939 ICP-AES und Unicam AAS sowie DOC am Shimadzu TOC-5000).

Tab. 1: Chemische Parameter der in den Säulenversuchen verwendeten kohligen Substanz (Mittelwerte, n = 4; Standardabweichung in Klammern).

pH (H <sub>2</sub> O)	5,58 (0,105)
EC [ $\mu$ S cm <sup>-1</sup> ]	802,75 (40,128)
C <sub>t</sub> [%]	18,15 (0,458)
N <sub>t</sub> [%]	0,30 (0,008)
S <sub>t</sub> [%]	2,58 (0,154)
Ca <sub>ges</sub> [mg g <sup>-1</sup> ]	11,34 (0,298)
Fe <sub>ges</sub> [mg g <sup>-1</sup> ]	21,88 (0,614)
Kalkbedarf [t CaO ha <sup>-1</sup> ]	718,94
KAK(akt) [cmol <sub>(c)</sub> kg <sup>-1</sup> ]	49,41 (4,569)
Basensättigung [%]	99,4 (0,133)
Gipsgehalt [%]	n.n.

## Ergebnisse und Diskussion

Die pH-Werte im Perkolat nehmen aufgrund der einsetzenden Pyritoxidation im Zeitverlauf in allen Säulen ab (Abb. 1). Die stärkste und rascheste pH-Abnahme kann bei den Säulen mit den kohligen Fragmenten < 7 mm beobachtet werden. Bei den Varianten mit kohligen Fragmenten > 7 mm nehmen die pH-Werte in allen Varianten langsamer ab. Bei hohem Wasserfluss verbleiben die pH-Werte im Perkolat der Säulen mit kohligter Substanz > 7 mm auf höherem Niveau und liegen noch nach 22 Monaten Versuchslaufzeit im Bereich der Beregnungslösung.

\* Universitätsplatz 3-4, 03046 Cottbus,  
E-Mail: schaaf@tu-cottbus.de

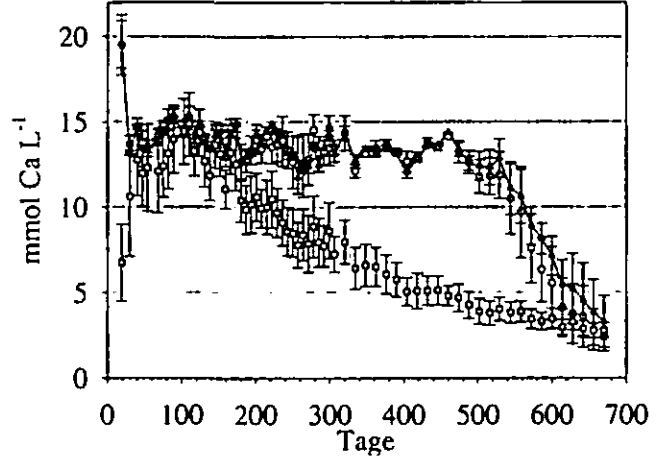
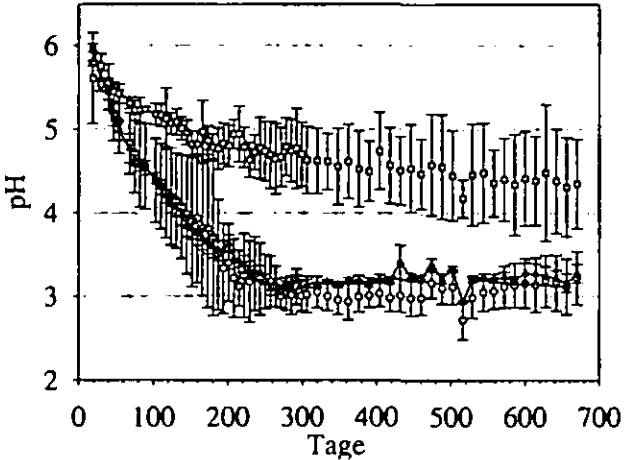
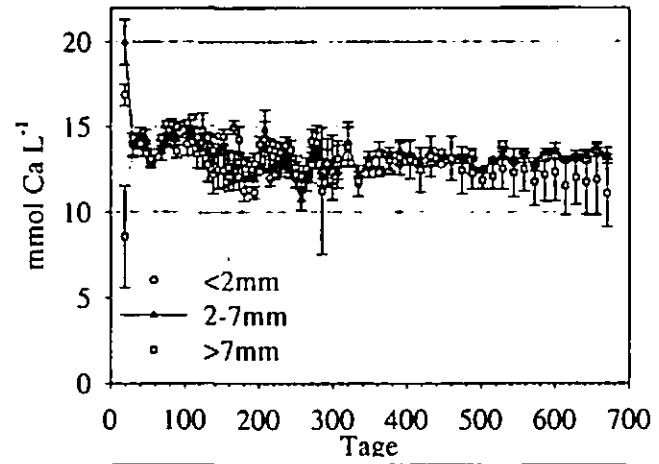
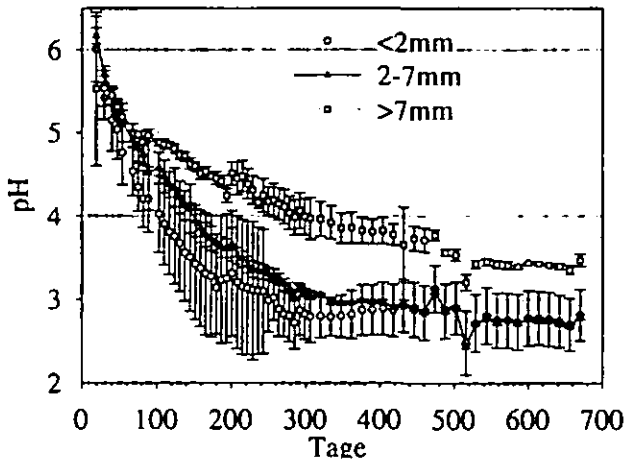


Abb. 1: pH-Werte im Perkolat bei geringer (oben) und hoher (unten) Beregnung

Abb. 2: Ca-Konzentrationen im Perkolat bei geringer (oben) und hoher (unten) Beregnung

Die Sulfatkonzentrationen liegen erwartungsgemäß hoch. Die Konzentrationen steigen mit abnehmender Größe der Kohlefragmente deutlich an. Bei der kleinsten Fragmentgröße ist zu Beginn der Perkolations ein Konzentrationspeak zu erkennen. Unterhalb pH 4 steigen die Fe-Konzentrationen im Perkolat an, erreichen bei pH 3 ein Maximum und sinken danach wieder. Bei den Varianten mit kohligten Fragmenten > 7 mm liegen die Fe-Konzentrationen im gesamten Versuchsverlauf sehr niedrig. Al zeigt ähnliche Verläufe wie Fe, die Anstiege erfolgen hier früher.

### Schlussfolgerungen

Die Säulenversuche bestätigen, dass das Vorkommen und die Verteilung geogener organischer Substanz bedeutende Komponenten im Stoffhaushalt von Kippböden darstellen. Auch die Skelettfraktion der Kippböden ist in hohem Maße an Stoffumsatz und -transport beteiligt. Die initialen Prozesse der Bodenentwicklung können dabei die kleinräumige strukturelle Heterogenität noch verstärken.

### Literatur

Schaaf, W., Gerke, H. H., Wecker, B., Einecke, M., Hüttl, R. F., 2004: Lokale Ungleichgewichte und damit verbundene bodenchemische und -hydrologische Prozessdynamik als Merkmale des Stoffhaushalts gestörter Standorte. In: R. F. Hüttl und W. Gerwin (Hrsg.). Entwicklung und Bewertung gestörter Kulturlandschaften. Fallbeispiel Niederlausitzer Bergbaufolgelandschaft. Cottbuser Schriften zur Ökosystemgenese und Landschaftsentwicklung, Band 2, 7-48.

Schaaf, W., 2004: Development of element cycling in forest ecosystems after anthropogenic disturbances – case studies at long-term atmospheric polluted and at post-mining sites. Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung 24, 1-163.

Die Ca-Konzentrationen liegen bei geringer Flussrate unabhängig von der Größe der kohlehaltigen Fragmente in einem Bereich von 15 mmol Ca L<sup>-1</sup> (Abb. 2), der durch die Gipslöslichkeit bedingt ist. Bei hohem Wasserfluss nehmen bei den Säulen mit kohligter Substanz > 7 mm die Konzentrationen nach etwa 200 Tagen kontinuierlich bis zum Versuchsende ab. In der Variante < 7 mm erfolgt der Rückgang erst nach etwa 500 Tagen.

## Sickerwasserabschätzung aus bodenhydrologischen Messungen im Vergleich mit Lysimeterergebnissen

Schindler, U.<sup>1</sup>, und L. Müller<sup>1</sup>

### 1. Zielstellung

Kenntnisse zur Sickerwasserbildung und Stoffauswaschung bilden eine wesentliche Grundlagen zur ökologischen Bewertung von Landnutzung und Landnutzungsänderungen (Frede und Dabbert, 1998, Schindler et al., 1999). Lysimeter bieten eine Möglichkeit, die Wechselwirkung zwischen Pflanze, Bodenwasser- und Stoffhaushalt zu untersuchen (Behrendt et al., 2003). Hohe Kosten und lysimeterspezifische Effekte, die eine direkte Übertragung der Ergebnisse auf natürliche Verhältnisse erschweren, schränken ihre Nutzung jedoch ein (Schindler et al., 2001). Bodenhydrologische Feldmessungen können auf einigen Standorten eine kostengünstige Alternative zur Abschätzung von Sickerwasserdynamik und wassergebundenem Stoffaustausch bieten (Schindler und Müller, 1998). Vergleichende Untersuchungen mit Lysimetern sollen Aufschluss zur Genauigkeit, zu Fehlerquellen und Einschränkungen dieser Methode bringen.

### 2. Ermittlung der Sickerwasserdynamik aus bodenhydrologischen Messungen

#### *i Messung von Wassergehalt und Saugspannung*

Saugspannung und Wassergehalt werden auf Ackerstandorten gewöhnlich in 3 m unter Wald in 5 m Tiefe gemessen. Damit soll gewährleistet werden, dass sich die Messtiefe unterhalb der hydraulischen Scheide (Renger et al., 1970) befindet. Messwertänderungen werden unter diesen Bedingungen ausschließlich von Veränderungen im Sickerwasserabfluss bewirkt. Auf Sandböden ist diese Messtiefe in aller Regel ausreichend. Auf Lehm und Lössböden hingegen kann die Pflanze teilweise auch Bodenwasserreserven darunter erschließen. Um unter diesen Bedingungen kapillaren Wasseraufstieg von Sickerwasser trennen zu können, ist ein darüber befindliches Tensiometer sinnvoll. Der hydraulische Gradient gibt Aufschluss über die Fließrichtung. Die große Messtiefe hat weitere Vorteile. Stochastische Effekte treten in geringerem Maße auf. Die Messwertänderungen erfolgen langsam und kontinuierlich und erlauben eine stationäre Betrachtung für Tagesintervalle (Schindler und Müller, 1998).

#### *ii Ermittlung der Wasserretentionsfunktion und Berechnung der relativen hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion*

Saugspannung und Wassergehalt werden gegeneinander aufgetragen. Die so konstruierte Wasserretentionsfunktion wird gefittet (van Genuchten, 1980) und die relative hydraulische Leitfähigkeit als Funktion des Wassergehaltes ( $K_r(wv)$ ) nach Mualem (1976) berechnet.

#### *iii Kalibrierung der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion zur Berechnung realer Sickerwasserraten*

Aus dem Wassergehaltsverlauf und der  $K_r(wv)$ -Funktion wird die relative Sickerwassermenge ( $V_r$ ) nach Darcy ( $v_r = K(wv) \cdot i$  mit  $i = 1$ ) in einer Winterperiode

(Kalibrierungszeitraum) für Tagesschritte berechnet. Die Annahme stationärer Bedingungen ist zulässig, da Wassergehaltsänderungen im Tagesintervall in dieser Tiefe vernachlässigbar gering sind. Die Zugrundlegung eines Einheitsgradienten hat sich insbesondere in Sandböden als geeignet erwiesen (Schindler und Müller, 1998).

Zur Transformation der relativen Sickerwasserraten auf ein reales Niveau wird zunächst die Sickerwassermenge  $V_b$  in der Winterperiode aus der Wasserbilanz ermittelt ( $V_b = \text{Niederschlag (P)} - \text{Evapotranspiration (ET)} + \text{Bodenspeicheränderung } (\Delta wv)$ ). Die Wasserspeicheränderung im Bodenprofil wird errechnet aus Bodenfeuchtemessungen im Profil zum Anfang und Ende der Kalibrierungsperiode. Die Winterperiode wird deswegen gewählt, weil der Fehler, der bei der Berechnung der Evapotranspiration gemacht wird, vergleichsweise gering ist. Der Matchingfaktor (M) zur Transformation der relativen  $K_r$ -Funktion in ein reales, an der Wasserbilanz kalibriertes Niveau  $K_b(wv)$  errechnet sich aus  $M = V_b/V_r$ . Die realen Sickerwasserraten können jetzt ausschließlich aus den gemessenen Wassergehaltswerten und der kalibrierten hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion  $K_b(wv)$  berechnet werden. Informationen zum Niederschlag, zur Landnutzung, zur Bodenbearbeitung u.a. sind nicht erforderlich.

### 3. Lysimeteruntersuchungen

Für den Vergleich der aus Saugspannungs- und Wassergehaltsmessungen berechneten mit gemessenen Sickerwasserraten wurde ein Lysimeter der Forschungsstation Dedelow mit einer Querschnittsfläche von 1 m<sup>2</sup> und 2 m Tiefe verwendet.

Boden und Horizontabfolge: Ap (Ss) 0-35 cm, Bv (S13) 35-115 cm, C (Ss) 115-200 cm. Der Vergleich wurde im Gesamtzeitraum vom 1. Nov. 2001 - 22. Dez. 2004 durchgeführt, mit:

Kalibrierungszeitraum: 01. Nov. 2001 - 15. Feb. 2002

Validierungszeitraum: 16. Feb. 2002 - 22. Dez. 2004

Die Fruchtfolge war 2001 (Winterweizen), 2002 (Zuckerrübe), 2003 (Winterweizen), 2004 (Winterraps).

In das Lysimeter wurden Tensiometer in 160 und 185 cm und eine TDR Sonde zur Wassergehaltsmessung in 185 cm Tiefe eingebaut. Die Daten wurden mit einem Datenlogger im Zeitintervall von vier Stunden aufgezeichnet. Für die weitere Verarbeitung wurden jedoch nur Tageswerte um 6.00 Uhr verwendet. Die Messwerte in 185 cm Tiefe waren Grundlage für die Berechnung der Sickerwasserraten. Das Tensiometer in 160 cm Tiefe sollte ergänzende Informationen zur Lage der hydraulischen Scheide liefern. Die Bodenwasserspeicheränderungen im Lysimeter wurde mit TDR Sonden (Handablesung) in den Tiefe 15, 30, 50, 70, 90, 130 cm erfasst.

Die Kalibrierung erfolgte sowohl am gemessenen als auch am aus der Wasserbilanz berechneten Sickerwasserabfluss.

1. Die Kalibrierung am gemessenen Sickerwasserabfluss ist der Idealfall für die Methodenprüfung, da Ungenauigkeiten bei der Sickerwasserabschätzung aus der Wasserbilanz entfallen.

2. Die Kalibrierung am Sickerwasserabfluss aus der Wasserbilanz ist die unter Feldbedingungen angewendete Verfahrensweise.

<sup>1</sup> Institut für Bodenlandschaftsforschung im ZALF e.V. Müncheberg

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Dynamik von Wassergehalt und Saugspannung

Wassergehalt und Saugspannung zeigten ein vergleichbares Prozessverhalten (Abb. 1). Messwertänderungen erfolgten kontinuierlich. Veränderungen der Sickerwasserbedingungen führten zeitlich gleichlaufend zu Saugspannungs- und Wassergehaltsänderungen. Sowohl aus dem hydraulischen Gradienten zwischen den Tensiometern in 160 und 185 cm Tiefe als auch der Saugspannung selbst, die zu keinem Zeitpunkt größer als 50 hPa war, kann der Nachweis erbracht werden, dass sich die hydraulische Scheide durchweg oberhalb der Messtiefe befand.

Aus den Saugspannungs- und Wassergehaltsmesswerten wurde entsprechend Abschnitt 2 die Wasserretentionsfunktion konstruiert, die Funktion gefittet und die relative hydraulische Leitfähigkeitsfunktion berechnet.

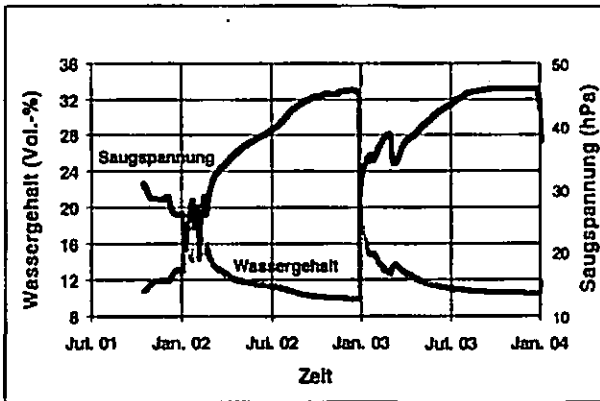


Abb. 1: Saugspannungs- und Wassergehaltsdynamik in 185 cm Messtiefe.

#### 3.2. Sickerwasserdynamik

Die berechneten und gemessenen Sickerwasserraten als auch der aufsummierte Sickerwasserabfluss (Abb. 2) zeigen eine gute Übereinstimmung sowohl im zeitlichen Verlauf als auch in der Höhe. Im Kalibrierungszeitraum betrug der gemessene Abfluss 77,4 mm. Im Validierungszeitraum vom 16. Feb. 2002 bis 22. Dezember 2004 wurden 490,9 mm Sickerwasserabfluss gemessen. Der berechnete Sickerwasserabfluss war nur um 4,6 mm geringer (486,3 mm).

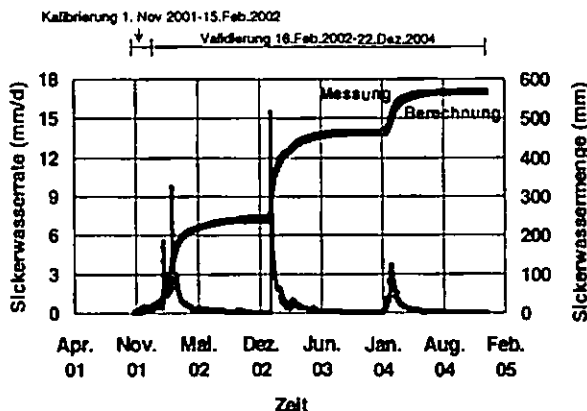


Abb. 2: Vergleich der Sickerwasserraten, gemessen und berechnet

Der Unterschied zwischen Messung und Berechnung war danach geringer als 1 %. Auch die maximalen und mi-

nimalen täglichen Sickerwasserraten stimmten gut sowohl zum Zeitpunkt als auch in ihrer Höhe überein. In der Zeit vom 15. Jan 2003 bis 9. Feb. 2003 konnten wegen Überflutung des Lysimeterkellers keine Sickerwasserabflüsse gemessen werden. In diesem Zeitraum wurden ersatzweise die Berechnungsergebnisse genutzt.

Die Sickerwasserberechnung auf der Basis einer an der Wasserbilanz kalibrierten hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion erbrachte um 10,9 % geringere Sickerwasserabflüsse (Kalibrierungszeitraum 69 mm, Validierungszeitraum 437 mm).

### 4. Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist, aus qualitativ hochwertigen Saugspannungs- und Wassergehaltsmessungen in nur einer Tiefe unterhalb der hydraulischen Scheide in Sandböden plausible Sickerwasserläufe zu berechnen. Voraussetzung ist eine exakte Kalibrierung der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion an der Wasserbilanz. Ungenauigkeiten schlagen sich direkt proportional auf das Berechnungsergebnis nieder. Für die Methodvalidierung wurde die Kalibrierung am Idealfall, dem Lysimeterabfluss, vorgenommen. Unter Feldbedingungen wird die Sickerwassermenge in der Kalibrierungsperiode aus dem Niederschlag, der Bodenspeicheränderung und der Verdunstung ermittelt. Die Genauigkeit dieser Abschätzung ist entscheidend für die Qualität der Sickerwasserberechnung.

### Literatur

- Behrendt, A., Schalitz, G., Müller, L. und U. Schindler (2003): Nährstoffdynamik auf extensiv genutzten Niedermoorweiden- Weide und Lysimeterversuche. 10 Gumpensteiner Lysimetertagung. 29.-30. April 2003. 129-132. 94.
- Frede, H.-G. und S. Dabbert (1998): Handbuch zum Gewässerschutz in der Landwirtschaft. Ecomed Verlagsgesellschaft. ISBN. 3-609-65270-5. 449 pp.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res., 12(3), 513-522.
- Schindler, U., Eulenstein, F. und L. Müller (1999): Nitratausträge unter verschiedenen Landnutzungssystemen auf sandigen Standorten Nordost-Deutschlands. 8. Gumpensteiner Lysimetertagung „Stoffflüsse und ihre regionale Bedeutung für die Landwirtschaft“ v. 13./14.4.1999. p. 81-85.
- Schindler, U., Wolff, M. und G. Kühn (2001): Lysimeterstudie zum Einfluss von Düngung und Bewirtschaftung auf die Ertragsbildung, den Wasserhaushalt und die Nährstoffauswaschung im Trockengebiet der Uckermark. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, (164) 697-703.
- Schindler, U. und L. Müller (1998): Calculating deep seepage from water content and tension measurements in the vadose zone at sandy and loamy soils in north-east Germany. Archives of Agronomy and Soil Science. 43. 233-243.
- Renger, M., Giesel, W., Strebel, O. und S. Lorch (1970): Erste Ergebnisse zur quantitativen Erfassung der Wasserhaushaltskomponenten in der ungesättigten Bodenzone. Z. f. Pflanzenern. und Bodenk. 1. 15-33.
- van Genuchten, M. Th., (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898.

## Beziehungen zwischen Gefügeentwicklung und bodenphysikalischen sowie -mechanischen Eigenschaften schluffiger Neulandböden im rheinischen Braunkohlenrevier

Raimund Schneider<sup>1</sup> u. Dietmar Schröder<sup>1</sup>

### 1. Einleitung

Im rheinischen Braunkohlenrevier wurden bisher rund 9 000 ha für landwirtschaftliche Zwecke rekultiviert. Als Rekultivierungssubstrat wird vornehmlich ein Löss-Lösslehmgemisch verwendet, das als 2 m mächtige Schicht aufgebracht wird. Die schluffreichen Lössneulandflächen bieten ideale Bedingungen, die initiale Bodenentwicklung bei unterschiedlicher Nutzung zu analysieren.

In die Untersuchungen wurden bis zu 30 Jahre alte Neulandflächen unter Acker, Grünland und Wald einbezogen. Zum Vergleich dienten ungestörte, ackerbaulich genutzte Parabraunerden der Umgebung. Von besonderem Interesse ist dabei die Entwicklung des Gefüges, dem eine zentrale Bedeutung bei allen ökologischen Funktionen ebenso wie der mechanischen Tragfähigkeit zukommt und die Frage, ob schadverdichtetes Lössneuland nachhaltig melioriert werden kann.

### 2. Boden und Substrat

Beim untersuchten Lössneuland im rheinischen Braunkohlenrevier handelt es sich um Pararendzinen aus Löss u. Lösslehm (Kipp-Kalkschluff). Die mittlere Bodenart ist schluffiger Lehm bis toniger Schluff (S: 5-10 %, U: 65-75%, T: 15-20 %). Die Böden sind karbonathaltig (4-8 Gew. %) und haben einen Kohlenstoffgehalt, der von 0,2-0,3 Gew.% bei jungem Neuland auf 0,4-0,5 Gew.% bei rund 30 Jahre alten Böden ansteigt.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Gefügeentwicklung bei unterschiedlicher Nutzung

Die Gefügeentwicklung hängt vorwiegend vom Alter, der Rekultivierungsqualität (Verdichtungsgrad ist bei jungem Neuland infolge verbesserter Rekultivierungstechnik geringer) sowie der Nutzungsart ab. Älteres ackerbaulich genutztes Neuland ist/war häufig durch rekultivierungs- und bewirtschaftungsbedingte Verdichtungen in seiner Gefügeentwicklung gehemmt (Foto 1). Hierfür sind kohärentes, plattiges und klumpiges Gefüge typisch. Je besser die Rekultivierungsqualität ist, desto stärker treten „Rollaggregate“ auf.

Diese sind das Ergebnis der Substratumlagerung (Abgrabung, Förderbandtransport, Schüttung), wobei stabile Aggregate (z.B. ehemalige Bt-Horizont-Aggregate) zwar abgerundet, jedoch nicht zerstört werden.

Bei neulandgerechter Bewirtschaftungsweise stellt sich unter Acker in der Krume anfangs ein Bröckel- und Klumpengefüge ein, das sich im Laufe der Zeit in ein Subpolyeder- und Krümelgefüge wandeln kann. Liegen keine Schadverdichtungen im Unterboden vor, wird dieser im Laufe der ersten 3 Jahrzehnte ebenfalls in die Gefügebildung und -entwicklung einbezogen. Durch eine waldbauliche Erstnutzung wird die Bildung und Entwicklung eines günstigen Gefüges deutlich forciert, wobei als Hauptgründe die Durchwurzelung, Humusakkumulation und damit begünstigte biologische Aktivität sowie fehlende Bearbeitung zu nennen sind (Foto 2). Wird Grünland intensiv als Weide genutzt, macht sich Viehtritt stark negativ bemerkbar (Knetung).



Foto 1: Acker



Foto 2: Wald

#### 3.2 Bodenphysikalische und -mechanische Eigenschaften bei unterschiedlicher Nutzung

Die bodenphysikalischen Eigenschaften spiegeln die vorgenannten nutzungs- und altersbedingten Unterschiede wider (Abb. 1-3). Das junge, ackerbaulich genutzte Neuland weist vor allem infolge verbesserter Rekultivierungsqualität günstigere physikalische Bedingungen auf als das ältere, rekultivierte Ackerland. Die Qualität der Altlandflächen wird nur selten erreicht. Die Weideflächen zeichnen sich durch die ungünstigsten Kennwerte aus. Für Grünland wurden die schlechten Flächenbereiche gewählt und starker Viehtritt verursacht weitere Schäden. Waldnutzung erweist sich auch hier als vorteilhaft. Eine zunehmende Auflockerung der Waldböden im Laufe der Zeit - von oben in den Unterboden hinein - schafft viele Grobporen und verstärkte Durchlässigkeiten für Luft und Wasser. Die mechanische Belastbarkeit (Vorbelastung) ist beim ackerbaulich genutzten Lössneuland eng mit der Bodendichte korreliert, solange noch keine stabilen Aggregate geschaffen wurden. Die Tragfähigkeit steigt mit der Dichte, gleichzeitig verschlechtern sich meist jedoch die ökologisch wichtigen Bodenfunktionen. Durch die Auflockerung unter Wald wird die Vorbelastung merklich herabgesetzt. Negative Effekte

<sup>1</sup> Universität Trier, FB VI, Bodenkunde, 54286 Trier, schneider@uni-trier.de, schroedd@uni-trier.de

sind aber nicht zu erwarten, da keine fortgesetzten Bewirtschaftungsmaßnahmen erfolgen.

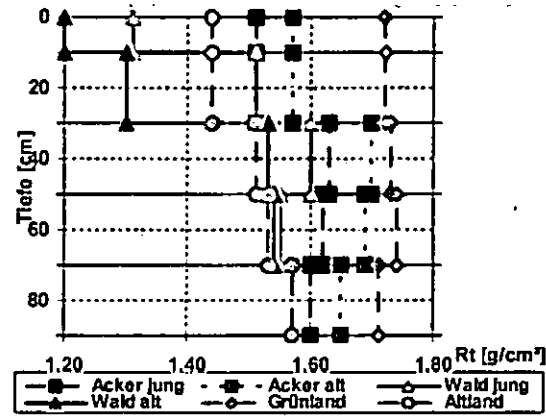


Abb. 1: Trockenrohdichte von Neu- u. Altland bei unterschiedlicher Nutzung (n=5)

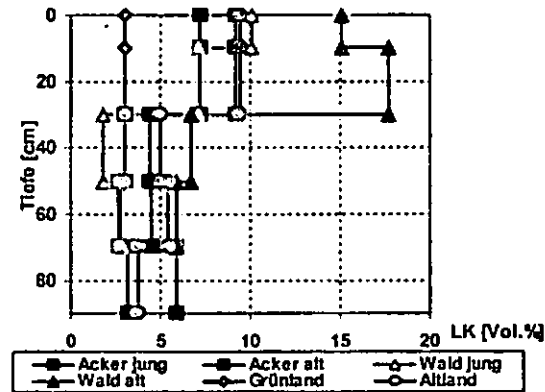


Abb. 2: Luftkapazität von Neu- u. Altland bei unterschiedlicher Nutzung (n=5)

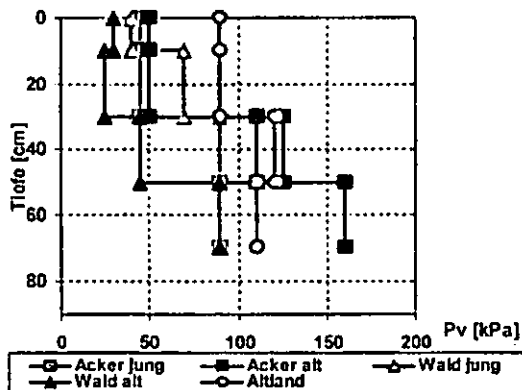


Abb. 3: Vorbelastung von Neu- u. Altland bei unterschiedlicher Nutzung (n=3)

### 3.3 Nachhaltigkeit von Meliorationsmaßnahmen

Tiefreichend schadverdichtetes Lössneuland gilt als meliorationsbedürftig. Kontroversen bestehen hinsichtlich der Frage, ob das schluffreiche, relativ tonarme, gefügelabile Neuland auch nachhaltig durch Tieflockerung (gegebenenfalls mit Bedarfsdrainage) melioriert werden kann. Die Untersuchungen belegen, dass eine nachhaltige Melioration selbst bei

Weiterführung der Fruchtfolge Zuckerrüben – Weizen – Gerste und bedingt bodenschonender Bewirtschaftungsweise möglich ist. Durch die Tieflockerung wurden die Bodendichten im gelockerten Bereich bis ca. 80 cm erheblich reduziert und durch die Schaffung von Grobporen (Abb. 4) die Durchlässigkeiten für Wasser und Luft stark erhöht. Daran hat sich auch 10 Jahre nach der Lockerung kaum etwas geändert. Eine leichte Rückverdichtungstendenz in der Krumbasis zeichnet sich ab, die Funktionstüchtigkeit der Böden leidet aber noch nicht darunter. Diese Effekte wirken sich auch deutlich positiv auf die Durchwurzelungstiefe und –intensität sowie damit gekoppelt die Erträge aus. Die mechanische Belastbarkeit der ungelockerten Böden ist aufgrund der hohen Dichte groß (Abb. 5). Durch die Tieflockerung wird die Tragfähigkeit stark herabgesetzt. Infolge einer leichten Rückverdichtungstendenz steigt die Vorbelastung in der Krumbasis wieder etwas an, was dem Unterbodenschutz dienlich ist.

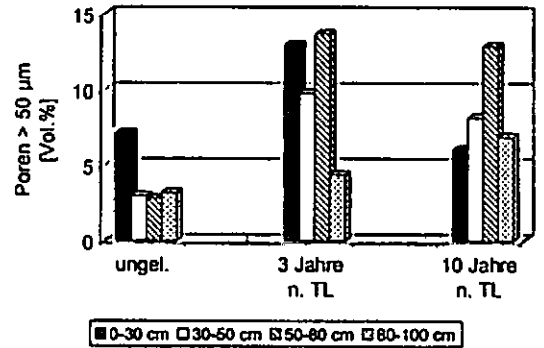


Abb. 4: Poren > 50µm von gelockertem und ungelockertem, altem Lössneuland (n=5)

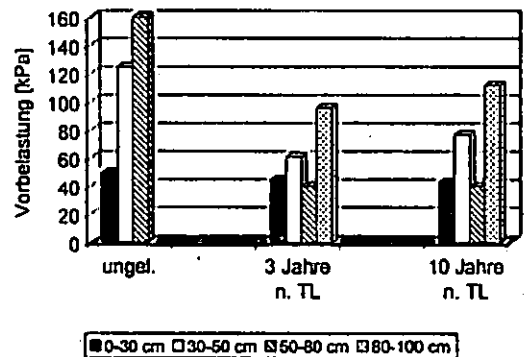


Abb. 5: Vorbelastung von gelockertem und ungelockertem, altem Lössneuland (n=5)

### 4. Fazit

Die Entwicklung des Gefüges und der bodenphysikalischen und –mechanischen Eigenschaften kann durch die Art der Nutzung des Neulandes beeinflusst werden. Waldbauliche Erstnutzung bringt vielfältige (boden-) ökologische Vorteile. Tiefreichende Schadverdichtungen (rekultivierungs- und/oder bewirtschaftsbedingt sind nachhaltig durch eine Kombination aus Tieflockerung, Bedarfsdrainage und bodenschonende Folgebewirtschaftung behebbar.

## Prävention gegen Bodenschadverdichtungen

Dietmar Schröder<sup>1</sup> u. Raimund Schneider<sup>1</sup>

### 1. Einleitung

In der BMVEL-Schrift (2002, S. 18) „Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion“ steht: „Erst durch überproportionale Reifenverbreiterung (Terra-Reifen) lässt sich mit erheblich reduziertem Kontaktflächendruck auch die Tiefenwirkung verringern“ und „Unterbodenschadverdichtungen sind deshalb bei zunehmender Radlast nur mit einer überproportionalen Reduzierung des Kontaktflächendrucks vorzubeugen“.

Die Schrift spricht damit den Kern der Gefahren von anthropogen verursachten Unterboden-Schadverdichtungen an, zeigt aber keine unmittelbare Lösung für das vorgenannte Problem auf.

Ein konkreter Lösungsvorschlag besteht in der „angemessenen“ Reduzierung der Kontaktflächendrücke bei steigenden Radlasten. Hierzu haben Schröder und Schneider 2003 und 2004 bereits Vorschläge unterbreitet, die weiter konkretisiert und unterlegt werden sollen.

### 2. Randbedingungen

1. Zulässige Radlasten sind vor allem von den Boden- und Feuchteverhältnissen abhängig. Böden besitzen unterschiedliche Tragfähigkeiten. Bei mittleren Texturen sind sie dennoch relativ ähnlich, so dass keine Differenzierung vorgenommen werden muss, zumal die Streuung innerhalb jeder Bodeneinheit groß ist. Zudem hilft eine starke Differenzierung im praktischen Betrieb nicht weiter, da jeder Betrieb mehrere Böden, selbst innerhalb eines Schrages bewirtschaftet und daher mit der Gerätewahl nicht reagieren kann.
2. Der zweite Aspekt betrifft die Bodenfeuchte. Sehr häufig liegt sie im Frühjahr und Herbst nur wenig unterhalb der Feldkapazität (pF-Werte um 2). Das bedeutet, dass die Belastung an diese Situation angepasst werden muss.
3. Zu schützen ist vor allem der Unterboden, da er nur geringe Selbstheilungskräfte hat. Doch auch der Oberboden muss bei hohen Radlasten durch Druckminderung in den Reifen vor Gefügeschädigungen bewahrt werden.

4. Reduzierte Bodenbearbeitung erhöht die Tragkraft, ist aber auch auf Vermeidung von Oberbodenverdichtungen angewiesen.
5. Böden können Unterbodenverdichtungen aufweisen, die die Tragfähigkeit zwar erhöhen, die Bodenfunktionen aber beeinträchtigen. Eine Literaturauswertung ergab, dass für verschiedene Böden in 25-50 cm Tiefe bei pF-Werten von 1,8 bzw. 2,5 durchschnittlich eine Vorbelastung von rund 130 kPa (Spanne: 80-200 kPa) gemessen wurde. Dieser Tragfähigkeit stehen bei gleicher Feuchtesituation für eine Bodentiefe von 40 cm gemessene Bodendrücke von rund 100 kPa (Spanne: 10 - 170 kPa) gegenüber.

Daher muss im Rahmen der Bodenschutzgesetzgebung entschieden werden, ob die Unterbodenverdichtungen tolerierbar sind oder beseitigt werden müssen.

Mit Tab. 1 wird ein Vorschlag für tolerierbare Radlasten in Abhängigkeit von Feuchte, Bodenverhältnissen, Vorverdichtung, Radlasten, Aufstandsfläche und Reifeninnendruck gemacht.

### 3. Ergebnisse

Der Tab. 1 liegt die Annahme zugrunde, dass der Unterboden unter den o.g. Bedingungen hinreichend geschützt wird, wenn der Kontaktflächendruck 100 kPa nicht übersteigt. Mit zunehmender Radlast muss allerdings eine Minderung des Kontaktflächendrucks erfolgen. Für vorverdichtete Böden wurden 2,5% Reduktion des Kontaktflächendrucks je Tonne Radlastzunahme unterstellt, für unverdichtete 5%. Ebenfalls wurde der empfohlene Luftdruck mit zunehmender Radlast abgesenkt. Dadurch sollte es gelingen, Bodenschadverdichtungen weitgehend zu vermeiden. Die gemachten Annahmen beruhen auf umfangreichen Literaturauswertungen zum Bodendruck, der Vorbelastung, empfohlenen/tolerierbaren Kontaktflächendrücken, Radlasten und Reifeninnendrücken sowie Berechnungen der Druckfortpflanzung nach Newmark (Tab. 2) für die in Tabelle 1 vorgeschlagenen Varianten.

### 4. Schlussfolgerungen

Radlasten von mehr als 5 t sind in der Regel selbst mit Breitreifen nicht bodenschonend abzustützen. Höhere Radlasten werden aber auch bei Nutzung heutiger Technik nicht benötigt, wenn eine Begrenzung der Schlaglängen auf 500 m erfolgt. Schlaglängenbegrenzungen in Verbindung mit den in Tab. 1 empfohlenen Daten führen zur besten fachlichen Praxis, die die gute oder gar schlechte fachliche Praxis ablösen sollte.

### Literatur

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ; ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (Hrsg.) (2002): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenverdichtungen und Bodenerosion.- Berlin

<sup>1</sup> Universität Trier, FB VI, Bodenkunde, 54286 Trier, schroedd@uni-trier.de, schneider@uni-trier.de



SCHRÖDER, D. U. SCHNEIDER, R. (2003): Kontaktflächendruck-bezogene Radlasten als Indikator des vorsorgenden Boden(verdichtungs)schutzes.- Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 101, 45-46

SCHRÖDER, D., SCHNEIDER, R. (2004): Beurteilung und Vermeidung von anthropogenen Boden(schad)verdichtungen, Berichte über Landwirtschaft, 82, H 2, S. 173 - 187

DVWK (DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V. (1995): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden - Teil I: Mechanische Belastbarkeit.- Bonn

Tab. 1: Vertretbare, degressiv Kontaktflächendruck-bezogene Radlasten für vorverdichtete und unverdichtete Böden mittlerer Tragfähigkeit bei einem pF-Wert von ca. 2,0

KF [m <sup>2</sup> ]	RL [t]	KFD [kPa]	Variante 1				Variante 2			
			KF [m <sup>2</sup> ]	KFD akzeptabel <sup>1,2</sup> [kPa]	RL zulässig <sup>2</sup> [t]	Pi empfohlen <sup>3</sup> [kPa]	KF [m <sup>2</sup> ]	KFD akzeptabel <sup>1,2</sup> [kPa]	RL zulässig <sup>2</sup> [t]	Pi empfohlen <sup>3</sup> [kPa]
0,1	1	100	0,1	100	1,0 <sup>4</sup>	—	0,1	100	1,0 <sup>4</sup>	—
0,2	2	100	0,2	97,5	2,0 <sup>4</sup>	—	0,2	95	1,9 <sup>4</sup>	—
0,3	3	100	0,3	95	2,9	200	0,3	90	2,7	200
0,4	4	100	0,4	92,5	3,7	180	0,4	85	3,4	180
0,5	5	100	0,5	90	4,5	160	0,5	80	4,0	160
0,6	6	100	0,6	87,5	5,3	140	0,6	75	4,5	140
0,7	7	100	0,7	85	6,0	130	0,7	70	4,9	130
0,8	8	100	0,8	82,5	6,6	120	0,8	65	5,2	120
0,9	9	100	0,9	80	7,2	110	0,9	60	5,4	110
1,0	10	100	1,0	77,5	7,8	100	1,0	55	5,5	100

KF: Kontaktfläche, RL: Radlast, KFD: Kontaktflächendruck, Pi: Reifeninnendruck

- 1 Minderung um 2,5 bzw. 5 kPa / t Radlastzunahme (zwecks Umsetzbarkeit).
- 2 - Zulässige Radlast, die sich aus akzeptablem Kontaktflächendruck ergibt.
- 3 Maschinen, die diese Werte einhalten, können die Auszeichnung „entspricht gP“ erhalten
- 4 Ergänzende Bodenschutzmaßnahme
- 4 Bis 2 t Radlast keine Vorschriften/Kontrollen.

Tab. 2: Vertikaler Bodendruck (Pz) nach DVWK (1995) in Abhängigkeit von Kontaktfläche, Kontaktflächendruck, Radlast und Konzentrationsfaktor

KF [m <sup>2</sup> ]	KFD konstant			Variante 1 (vorverdichtet/Pflugsohle)				Variante 2 (unverdichtet/anzustreben)			
	KFD [kPa]	RL [t]	Pz* v = 3   v = 5 [kPa]	KFD akzeptabel [kPa]	RL zulässig [t]	Pz* v = 3   v = 5 [kPa]	KFD akzeptabel [kPa]	RL zulässig [t]	Pz* v = 3   v = 5 [kPa]		
0,1	100	1	24 37	100,0	1,0	24 37	100,0	1,0	24 37		
0,2	100	2	39 57	97,5	2,0	39 55	95,0	1,9	38 54		
0,3	100	3	50 69	95,0	2,9	48 67	90,0	2,7	45 62		
0,4	100	4	58 77	92,5	3,7	54 71	85,0	3,4	50 65		
0,5	100	5	65 82	90,0	4,5	58 74	80,0	4,0	52 66		
0,6	100	6	69 86	87,5	5,3	61 75	75,0	4,5	52 65		
0,7	100	7	73 89	85,0	6,0	62 76	70,0	4,9	51 62		
0,8	100	8	76 91	82,5	6,6	63 75	65,0	5,2	49 59		
0,9	100	9	79 92	80,0	7,2	63 74	60,0	5,4	47 55		
1,0	100	10	81 94	77,5	7,8	62 73	55,0	5,5	44 51		

KF: Kontaktfläche, RL: Radlast, KFD: Kontaktflächendruck, Pz: vertikaler Bodendruck,  
 v = 3: Konzentrationsfaktor für Böden mit mittlerer bis hoher Tragfähigkeit  
 v = 5: Konzentrationsfaktor für Böden mit geringer bis mittlerer Tragfähigkeit  
 \* nach DVWK (1995)

# Wasser- und Stoffflüsse in künstlich entwässerten kleinen Einzugsgebieten – experimentelle Untersuchungen und Modellansätze

Bärbel Tiemeyer<sup>1</sup>, Petra Kahle und Bernd Lennartz

## Abstract

In einem landwirtschaftlich geprägten kleinen Einzugsgebiet im nordostdeutschen Tiefland wurden Abflüsse und Stoffkonzentrationen auf verschiedenen Maßstabsebenen untersucht. Dabei zeigte sich, dass die künstliche Entwässerung das Gebietsverhalten entscheidend beeinflusst. Erste Modelluntersuchungen mit dem flächendifferenzierten Modell MHYDAS-DRAIN lieferte befriedigende Ergebnisse und belegte den Einfluss des Dränsystems.

## 1. Einleitung

Dränmaßnahmen verkürzen den Aufenthalt des Sickerwassers in der biologisch aktiven ungesättigten Zone und stellen gleichzeitig einen bedeutenden Pfad für den nach wie vor hohen und zumeist aus der Landwirtschaft stammenden diffusen Eintrag von Nährstoffen in Fließ- und Küstengewässer dar (BEHRENDT & BACHOR, 1998; STAMM et al., 1998). Darüber hinaus können präferenzielle Fließbedingungen den Durchgang von Wasser und Stoffen durch die ungesättigte Zone zusätzlich beschleunigen (LENNARTZ et al., 1999). Die Kombination von präferenziellem Fluss und künstlicher Entwässerung stellt somit eine direkte Verbindung zwischen häufig hoch belasteten Oberböden und Fließgewässern her (STAMM et al., 1998). Wenn lysimeterähnliche Bedingungen angenommen werden können, erlauben Dränflächen eine integrative Untersuchung der in der Dränparzelle ablaufenden Prozesse und damit eine Quantifizierung des Stofftransports auf Feldebene (LENNARTZ et al., 1999). Obwohl die Einzugsgebietsebene beispielsweise als Bewirtschaftungseinheit der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie bei der Beurteilung der Umweltauswirkungen von landwirtschaftlicher Nutzung von besonderem Interesse ist, existieren im Gegensatz zu der Vielzahl an Untersuchungen zu Stoffausträgen aus einzelnen Dränansammlern (z.B. LENNARTZ et al., 1999; STAMM et al., 1998) nur sehr wenige Studien zum Anteil der Dränsysteme am Wasser- und Stoffhaushalt eines Einzugsgebietes. Um die Auswirkungen der Dränung auf den Wasser- und Stoffhaushalt beurteilen zu können, sind demnach eine Untersuchung der Fortpflanzung des Dränsignals über verschiedene Maßstabsebenen und flächendifferenzierte Modellansätze notwendig.

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Messprogramm

In der Nähe der Ortschaft Dummerstorf (ca. 15 km südöstlich von Rostock, Mecklenburg-Vorpommern) wurde im Jahr 2001 ein hierarchisches Monitoringprogramm aufgebaut und 2003 erweitert. Die klimatischen Bedingungen am Untersuchungsstandort sind durch Jahresmitteltemperaturen von 8,2 °C, mittlere Jahresniederschlagsmengen von 665 mm sowie eine potenzielle Evapotranspiration nach Turc-Wendling von 561 mm charakterisiert. Jungpleistozäne Substrate bestimmen die Pedogenese der auf den Ackerstandorten vorherrschenden Mineralböden. Dort treten meist die Bodentypen Pseudogley und Parabraunerde auf, während im Grünland flachgründige degradierte Niedermoore und Humusgleye vorherrschen. An einer Dränmessstation (I) wird ein Sammler einer konventionell bewirtschafteten Ackerfläche (4,2 ha) beprobt. Der Sammler mündet in einen ebenfalls beprobten Graben (II), der ca. 180 ha Ackerland (80 % Rohrdränung) entwässert. Die zweite Grabenmessstation (III) besitzt ein durch Grünlandnutzung geprägtes Einzugsgebiet (ca. 48 ha) mit Grabenentwässerung und unregelmäßiger Rohrdränung. Messstation IV befindet sich schließlich an der Zarnow (Einzugsgebiet 16 km<sup>2</sup>), einem Nebenfluss der Warnow. Das Einzugsgebiet der Zarnow ist – typisch für Mecklenburg-Vorpommern – landwirtschaftlich geprägt; punktförmige Stoffquellen sind nicht zu verzeichnen. Das Messprogramm umfasst hoch aufgelöste Durchflussmessungen, tägliche Probenahme (Mischproben), Grundwasserbeobachtungen, eine Klimastation, Bodenuntersuchungen sowie die Geländeaufnahme mittels GPS. Laboranalytische Untersuchungen der Wasserproben mittels Ionenchromatographie erfassen NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> und Mg<sup>2+</sup>.

### 2.2 Modellentwicklung

Zur Abschätzung der Anteile von Dränabfluss und präferenziellem Fluss am Gesamtabfluss wurde der deterministische Modell MHYDAS (MOUSSA et al. 2002) fortführende räumlich differenzierte Modellansatz MHYDAS-DRAIN entwickelt, der eine explizite Abbildung anthropogener Strukturen in landwirtschaftlich genutzten kleinen Einzugsgebieten ermöglicht. Das Modell beruht auf aus der Überschneidung von Landnutzungsdaten, Dränkarten, Topographie und Bodeneigenschaften abgeleiteten hydrologischen Einheiten, die mit dem Graben- und Sammlernetz verbundenen sind. Es wird angenommen, dass der Dränabfluss aus den Komponenten

<sup>1</sup> Institut für Landnutzung, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Universität Rostock  
Justus-von-Liebig-Weg 6 18051 Rostock  
E-mail: baerbel.tiemeyer@uni-rostock.de

präferenzierter Fluss – mit einer Transferfunktion modelliert – und Matrixfluss besteht. Zusätzlich ist in Gräben grundwasserbürtiger Basisabfluss vorhanden. Der Durchflussverlauf in Sammlern und Gräben wird mit dem Diffusionswellansatz berechnet.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

Am Dränsammler wurden in den Jahren 2001 bis 2004 Nitratkonzentrationen zwischen 0 und 127 mg/l<sup>-1</sup> gemessen, deren 90 %-Perzentil mit 83 mg/l<sup>-1</sup> deutlich über dem Trinkwassergrenzwert von 50 mg/l<sup>-1</sup> liegt. Im Winterhalbjahr 2003/04 galt dies auch für die höheren Maßstabsebenen. Die Nitratkonzentrationen auf allen Maßstabsebenen waren stark durchflussabhängig. Diese, im Falle des Dränsammlers nahezu lineare, Korrelation zwischen NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Konzentration und Abfluss kann als Indiz für eine hohe Nährstoffanreicherung im Boden gedeutet werden. Auffallend hohe NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Konzentrationen wurden trotz negativer Flächenbilanzen im Graben des Grünlands gefunden und zeigen somit die hohe Nitratfreisetzung durch Torfdegradierung (Abb. 1 c). Sowohl die im Winter 2003/04 gemessenen Abflüsse als auch die Nitratkonzentrationen verhalten sich auf allen Skalenebenen – Sammler, Gräben und Bach – synchron, was auf eine hohe Bedeutung der Dränung für das Gebietsverhalten hindeutet. Dies spiegelt sich auch in den Nitratfrachten wieder (Abb. 1 a bis d).

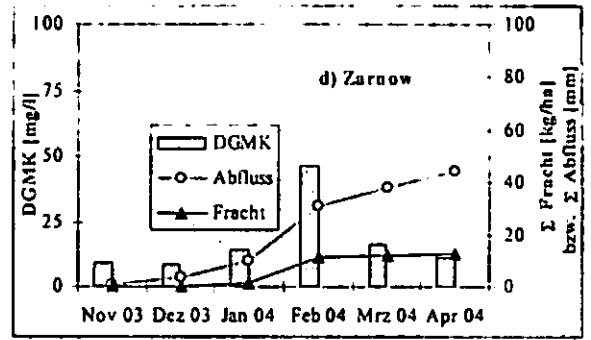


Abbildung 1: Durchflussgewichtete mittlere Nitratkonzentrationen (DGMK), kumulativer Abfluss und kumulative Frachten des Winterhalbjahres 2003/04 auf den Maßstabsebenen Dränsammler (a), Graben Acker (b), Graben Grünland (c) und Bach (d)

Die niedrigeren Frachten in der Zarnow können durch eine geringer belastete Grundwasserkomponente, Stoffumsetzungen im Gewässer oder aber auch durch eine ungenaue Einzugsgebietsabgrenzung erklärt werden. Die höchsten Stoffausträge aus einer Dränfläche (168 kg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) traten im bisher feuchtesten Jahr 2001/02 (P = 695 mm) auf.

Bisher wurde die Modellierung zweier Dränflächen (zusammen ca. 10 ha) realisiert. Einzelne Abflussereignisse sowie die gesamte Abflussperiode 2003/04 konnten erfolgreich simuliert werden (Nash-Sutcliffe Koeffizient = 0,88). Der mit dem Modell abgeschätzte präferenzuelle Fluss machte nur wenige Prozent des Gesamtabflusses aus, kann aber dennoch für den Stofftransport von Bedeutung sein.

### 4. Schlussfolgerungen

Aus den bisherigen Untersuchungen lässt sich ableiten, dass die künstliche Entwässerung das Einzugsgebietsverhalten maßgeblich bestimmt. Dabei traten auf allen Maßstabsebenen bei hohen Abflüssen hohe Nitratkonzentrationen auf und belegen somit einen hohen Nährstoffvorrat des Bodens. Der gewählte Modellansatz MHYDAS-DRAIN ist erfolgsversprechend und sollte um eine Stofftransportkomponente erweitert werden.

### Dank

Die Landesgraduiertenförderung Mecklenburg-Vorpommern unterstützte dieses Projektes finanziell. Marianne Kietzmann analysierte die Wasserproben.

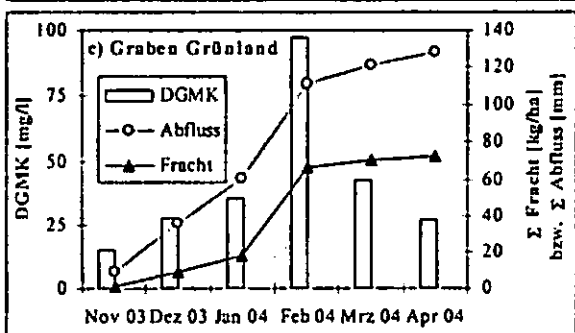
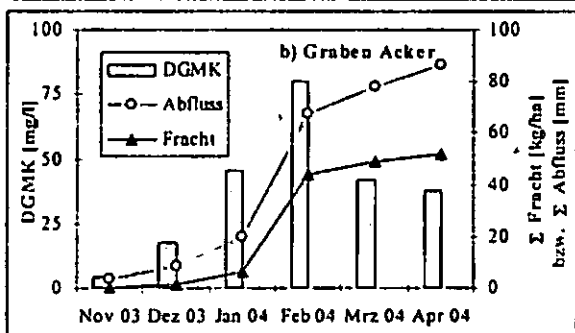
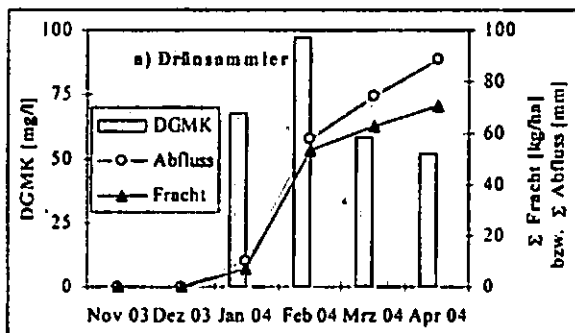
### Literatur

BEHRENDT, H. & A. BACHOR, 1998: Point and diffuse load of nutrients to the Baltic Sea by river basins of North East Germany (Mecklenburg-Vorpommern). *Wat. Sci. Tech.* 38 (10): 147-155.

LENNARTZ, B., MICHAELSEN, J., WICHTMANN, W. & P. WIDMOSER, 1999. Time variance analysis of preferential solute movement at a tile-drained field site. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 39-47.

MOUSSA, R., VOLTZ, M. & P. ANDRIEUX, 2002. Effects of spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrol. Proc.* 16: 393-412.

STAMM, C., FLÖHLER, H., GÄCHTER, R., LEUENBERGER, J. & H. WUNDERLI, 1998. Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils. *J. Environ. Qual.* 27: 515-522.



## **Bodenwasserhaushalt und Sickerwasserbildung in der Trier-Bitburger Mulde**

Elisabeth Tressel<sup>1</sup> u. Raimund Schneider<sup>2</sup>

### **1. Einleitung**

Im Vordergrund der Untersuchungen stand die Überprüfung des Einflusses von unterschiedlichen Nutzungsarten sowie ihren Wechselwirkung mit den Bodeneigenschaften und Witterungsverhältnissen auf die Dynamik von Wasserflüssen im Boden und den dynamischen Prozess der innerjährlichen Sickerwasserbildung. Auf der Basis zeitparalleler Betrachtungen wichtiger Wasserhaushaltskomponenten wird versucht, die Bodenfeuchte als mögliche Indikatorgröße für die regionale Abflussdynamik der Bäche abzuleiten.

### **2. Untersuchungsgebiet**

Der geologische Untergrund des Untersuchungsgebietes wird dominiert von den mesozoischen Sedimenten des Buntsandsteins, Muschelkalks und Keupers. Diese sind weitflächig von quartären Lockersedimenten (Löss, Lösslehme und Flugsande) überdeckt. Das Relief zeichnet sich im Wesentlichen als eine (flach-)wellige Hügellandschaft aus, die jedoch durch die zur Mosel hin entwässernden und z. T. stark eingetieften Flussläufe (u. a. Kyll) in einzelne plateauartig erscheinende Hochflächen zerschnitten wird. Entsprechend wird der Landschaftscharakter durch eine hohe räumliche Variabilität in der Ausbildung der Böden sowie einer vielfältigen Nutzungsdifferenzierung geprägt.

### **3. Methodik**

Seit 1994 werden meteorologische und bodenhydrologische Messungen sowie pedologische Untersuchungen auf 14 Intensivmessfeldern mit den Nutzungsvarianten Acker, Grünland und Wald durchgeführt. Unter Verwendung der Lysimetrie wird die innerjährliche Sickerwasserdynamik auf Standorten in ebener Lage unter natürlichen Witterungsverhältnissen standortspezifisch erfasst. Zur Analyse der raum-zeitlichen Variabilität der Bodenfeuchte als Funktion von Witterung, Bodeneigenschaften und Nutzungsarten werden Niederschlag sowie Bodenwassergehalte in definierten Bodentiefen erfasst.

### **4. Ergebnisse und Diskussion**

Die zeitparallele Betrachtung von Niederschlag und gemittelten Bodenwassergehalten für zwei Tiefenstufen (1.04.1994 - 31.03.1998) an der Acker-Station Zemmer (so) in Abbildung 1 lassen folgende Aussage zu:

- Die Ausprägung des Jahresganges der Wassergehalte zeichnet den Jahresgang der Niederschläge relativ gut nach.
- Es zeigen sich graduelle Unterschiede in den gemittelten Wassergehalten beider Tiefenstufen, insbesondere während der Winterhalbjahre sowie eine deutliche Wassergehaltsabnahme mit zunehmender Tiefe.
- Der starke Anstieg der Bodenwassergehalte in 0-30 cm Ende Januar 1995 korreliert eng mit extremen Niederschlägen. Der Bereich von 30-80 cm zeigt dagegen eine abgeschwächte Reaktion auf den Niederschlagseintrag (gehemmte Infiltration bzw. Perkolation).
- Die „Ausreißer“ der Wassergehalte (Feb. 1996 u. Jan./Feb. 1997) für den Bereich 0-30 cm lassen sich - trotz geringerer Niederschlagsmengen - auf eine eingeschränkte Infiltration nach vorausgegangener Frostperiode zurückführen.
- Niederschlagsreiche Perioden während der HSHJ haben nur kurzfristige Auswirkungen auf die Bodenwassergehalte (Juli 1994 u. Juni/Juli 1997).

Die Abbildung 2 zum Jahresverlauf von Niederschlag, Abfluss und Bodenfeuchte (1.04.1994 bis 31.3.1996) für die Acker-Station Zemmer (so) belegt das komplexe Zusammenwirken dieser drei Komponenten des Wasserhaushaltes.

- Die zeitliche und mengenmäßige Verteilung der Niederschläge korrelieren mit dem Abflussgang.
- Die winterlichen Extremabflüsse im Januar 1995 waren die Folge zweier unmittelbar aufeinander folgender Niederschlagsperioden in Kombination mit einsetzender Schneeschmelze, woraus eine Aufsättigung der oberen Bodenschichten, verstärkter Abfluss und im Moseltal erhebliche Hochwasserschäden resultierten.
- Ungünstige Perkulationsbedingungen infolge gefrorenem Boden bedingten im Febr. 96 sehr hohe Wassergehalte in den oberen Bodenschichten und einen sprunghaften Anstieg des Abflusses.
- Während der Wintermonate stellt sich in einer Tiefe zwischen 20-30 cm eine deutliche Feuchtefront ein, die mit der Lage der Pflugsohle korrespondiert.
- Stärkere Niederschlagsereignisse in den beiden Sommerhalbjahren zeigen i.d.R. keine größeren Auswirkungen auf die Abflussbildung und die Bodenfeuchtedynamik (⇒Evapotranspiration).

Die Überprüfung der Nutzungsdifferenzierung (Acker / Grünland / Wald) bei jeweils vergleichbaren Bodeneigenschaften zeigt, dass in sandigeren Böden die Sickerwassermenge mit zunehmender Bodenbedeckung

<sup>1</sup> Universität Trier, FB VI, Phys. Geogr., FBR-Ref., 54286 Trier, tressel@uni-trier.de

<sup>2</sup> Universität Trier, FB VI, Bodenkunde, 54286 Trier, schneider@uni-trier.de

abnimmt, während in tonig-lehmigen Böden die zunehmende Bodenbedeckung offensichtlich nicht zu einer mengenmäßigen Differenzierung bei der Sickerwasserbildung führt. Hier wird der Nutzungseinfluss von den Bodeneigenschaften überdeckt. Offensichtlich trägt der Makroporeneffekt (u. a. Wurmgänge, Wurzelbahnen) in tonig-lehmigen Böden zusätzlich zu einer Verbesserung der Wasserwegsamkeit bei.

### 5. Schlussfolgerung und Ausblick

Durch die räumliche Verteilung der Intensivmessfelder konnte nachgewiesen werden, dass der Versickerungsanteil der Niederschläge im Boden sowohl durch die Nutzungsart (Acker, Grünland, Wald) als auch die Bodeneigenschaften in unterschiedlichster Weise gesteuert werden. Über die Analyse wichtiger Wasserhaushaltskomponenten wird deutlich, dass die Bodenfeuchte als mögliche Indikatorgröße für die regionale Abflussdynamik der Bäche dienen kann.

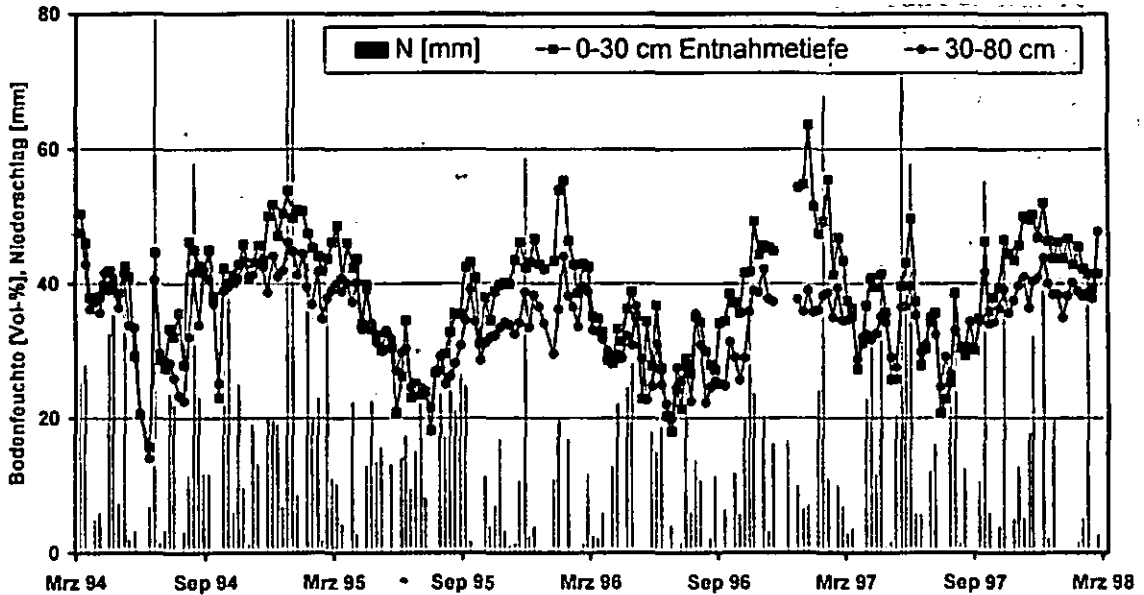


Abb. 1: Niederschlag und gemittelte Wassergehalte für zwei Tiefenstufen (1.04.1994 - 31.03.1998), Station Zemmer (Acker; so)

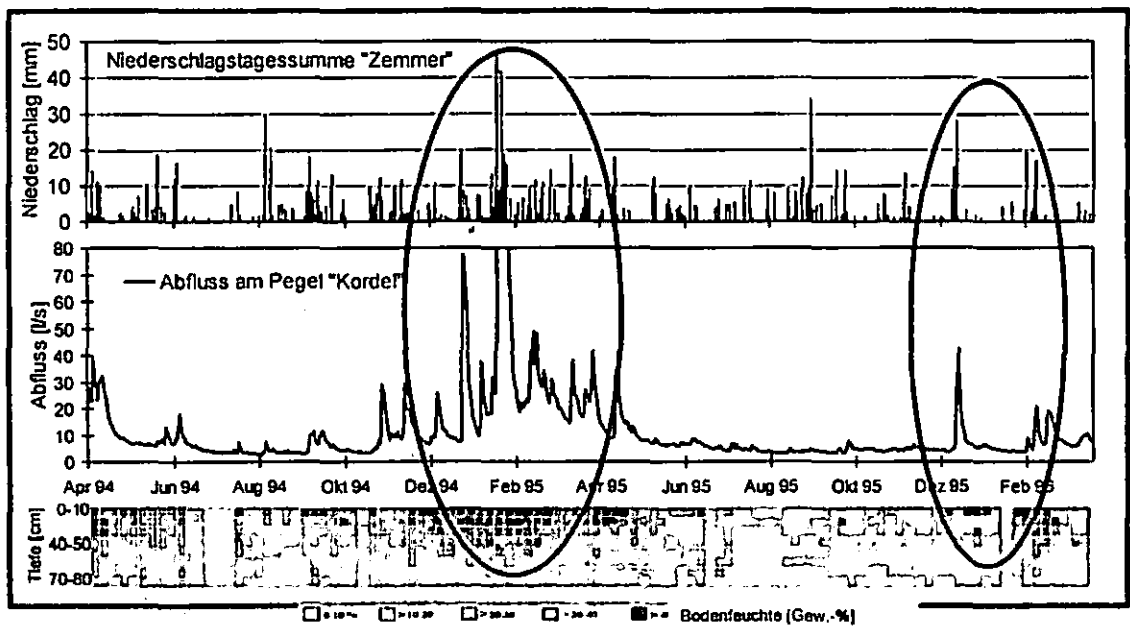


Abb. 2: Jahresverlauf von Niederschlag – Abfluss - Bodenfeuchte (1.04.1994 bis 31.3.1996), Station Zemmer (Acker; so)

# Bilanzierung und Modellierung des Schwefelhaushaltes eines landwirtschaftlich genutzten Trinkwassereinzugsgebietes mit hoher Sulfatkonzentration im Sickerwasser

WILLMS, M.<sup>1</sup>, F. EULENSTEIN<sup>1</sup>, J. OLEJNIK<sup>2</sup>, K.W. BECKER<sup>3</sup>, B. MEYER<sup>3</sup>, A. WERNER<sup>1</sup>

## 1 Problemstellung

Steigende Sulfatgehalte im Grundwasser sind für viele Wasserwerke ein Problem. Ab 2003 gilt in der EU für Trinkwasser ein Indikatorwert für Sulfat von 250 mg/l. Wird dieser überschritten, ist zu klären ob dieser anthropogen oder geogen verursacht wird. Im Falle der anthropogenen Verursachung ist eine Sanierung durchzuführen.

Für das Untersuchungsgebiet Mockritz, östlich von Leipzig, wurden für landwirtschaftlich genutzte Flächen Schwefelbilanzen erstellt und anschließend die Sulfatkonzentration im Sickerwasser mit Hilfe des Modells SULFONIE simulativ berechnet.

## 2 Landwirtschaftliche Flächennutzung

Der zeitliche Verlauf der landwirtschaftlichen Nutzung des Untersuchungsgebietes lässt sich in zwei Perioden gliedern. Bis 1989 wurde das Untersuchungsgebiet von der Landwirtschaftlichen Produktionsgenossenschaft (LPG) Zinna bewirtschaftet. Für die heute im Gebiet wirtschaftenden Betriebe wurden die Daten für den Zeitabschnitt 1995–2000 erhoben (Tab. 1).

Tab. 1: Kennzahlen der Erhebungsperioden des Untersuchungsgebietes Mockritz

Zeitspanne	Fläche	Fläche	Betriebe	Betriebe
Bilanz	Betriebsbil.	Flächenbil.	Betriebsbil.	Flächenbil.
	ha	ha	Anz.	Anz.
1977–1989	—	3 108	—	1
1995–2000	3 024	3 690	4	10

Vollständige Betriebsbilanzen konnten für 4 Betriebe erstellt werden. Diese Betriebe bewirtschaften 85 % der Fläche, die in der Flächenbilanzierung berücksichtigt wird.

Die Flächenanteile der in den beiden Untersuchungsperioden angebaute Fruchtarten haben sich stark geändert (Abb. 1). Durch die 1995–2000 betriebene Landwirtschaft wurde der Anteil des Wintergetreides stark ausgeweitet, während der Anbau von Sommergetreide keine Rolle mehr spielt. Insbesondere hat sich der Winterweizen-Anteil mehr als verdoppelt. Der Umfang des Maisanbaues hat sich dagegen kaum verändert, der Anbau von Kartoffeln ist weggefallen und der Zuckerrübenanbau ist auf 30 % des vor-

herigen Umfanges verringert worden. Neu hinzugekommen ist der Anbau von Raps sowie die Flächenstilllegung.



Abb. 1: Flächenverhältnis wichtiger Fruchtarten des Untersuchungsgebietes Mockritz. Mittelwert der Bilanzierungsperioden 1977–1989 und 1995–2000 auf Basis der Flächenbilanzierung

## 2.2 Nährstoffbilanzen

Der Bilanzsaldo für Schwefel ist im Mittel der Jahre 1995–2000 negativ (Tab. 2). Der Bilanzsaldo für Stickstoff beträgt im gleichen Zeitabschnitt 28 kg/(ha·a).

Tab. 2: Betriebsbilanz für Stickstoff und Schwefel des Untersuchungsgebietes Mockritz. Aggregierte Daten von 4 landwirtschaftlichen Betrieben mit insgesamt 3 024 ha, flächengewichtete Mittelwerte der Bilanzierungsperiode 1995–2000

Bilanzposten	N		S	
	kg/(ha·a)	%	kg/(ha·a)	%
+ Dünger	100	83	4	70
+ Futtermittel	20	17	2	29
+ Vieh	1	< 1	< 1	1
<b>Import gesamt</b>	<b>+ 120</b>	<b>100</b>	<b>+ 5</b>	<b>100</b>
- Marktfrüchte	85	92	6	93
- Tierische Produkte	7	8	< 1	7
<b>Export gesamt</b>	<b>- 92</b>	<b>100</b>	<b>- 6</b>	<b>100</b>
<b>Nährstoffsaldo</b>	<b>+ 28</b>		<b>- 1</b>	

In Abb. 2 wird die nach Betriebserhebung zur Betriebsbilanz eingekaufte Menge an Düngemittel-Nährstoffen der ausgebrachten Menge an Handelsdünger-Nährstoffen der Flächenbilanz gegenübergestellt. Entscheidend für die gute Übereinstimmung der auf unterschiedlichem Wege ermittelten Daten ist, dass von fast allen Betrieben Ackerschlagkarteien geführt worden sind.

Zur Überprüfung der Angaben der Landwirte werden Betriebs- und Flächenbilanz miteinander abgeglichen. Dabei muss z. B. die Menge der verkauften Marktfrüchte der Menge der geernteten Marktfrüchte entsprechen. Ebenso sollte die Menge der auf allen Schlägen ausgebrachten Dünger (Datenherkunft: Flächenbilanz) der eingekauften Düngermenge entsprechen (Datenherkunft: Betriebsbilanz).

<sup>1</sup> Leibniz-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung e.V. ZALF, Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg

<sup>2</sup> Agrometeorology Department of Agricultural University of Poznan, 60-660 Poznan, Poland

<sup>3</sup> Universität Göttingen, Inst. f. Bodenwissenschaft, v. Sieboldstr. 6, 37075 Göttingen

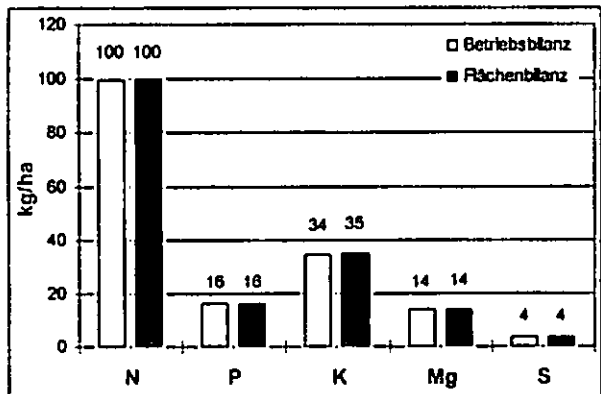


Abb. 2: Vergleich der Mengen an zugekauften Düngernährstoffen im Untersuchungsgebiet Mockritz: a) nach Erhebung zur Betriebsbilanz, b) nach Erhebung zur Flächenbilanz dieser Betriebe. Berechnet für das Mittel der Jahre 1995–2000

### 3 Simulative Berechnung von Schwefel- und Stickstoffausträgen

Mit Hilfe der Simulationsmodelle SULFONIE und HERMES sind die potenzielle Verdunstung nach Haude, die reale Verdunstung, die Rate des Sickerwassers und der Austrag von Schwefel und Stickstoff berechnet worden (Abb. 3).

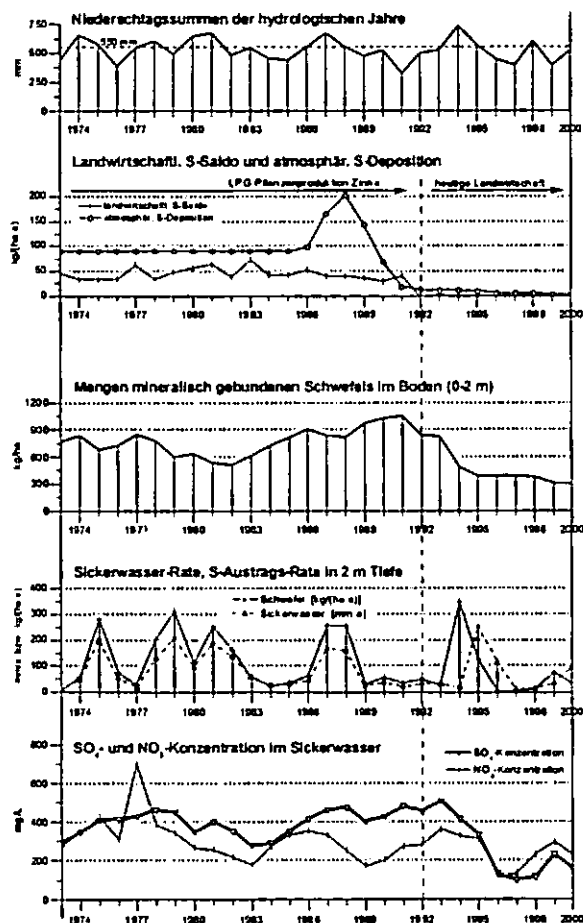


Abb. 3: Verlauf der jährlichen Werte für Niederschlag, atmosphärische Deposition, landwirtschaftlichen Schwefelsaldo sowie ausgewählter Werte der Simulations-Rechnungen 1973–2000 in Mockritz. Werte berechnet als flächengewichtete Mittelwerte des Untersuchungsgebietes

Die simulativ berechneten Werte werden als flächengewichtete, jährliche Mittelwerte bzw. als Mittelwerte des simulierten Zeitabschnittes berechnet. Dabei werden die Werte für das gesamte Untersuchungsgebiet als flächengewichtete Mittelwerte berechnet. Die simulativ berechnete Sulfatkonzentration des Sickerwassers in 2 m Tiefe beträgt für die Böden der Aue und der Grundmoräne im Mittel 393 mg/L.

### 4 Schlussfolgerung

Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass derzeit Sulfat in erheblichen Mengen unter den landwirtschaftlich genutzten Flächen ausgewaschen wird. Dieses stammt jedoch weder aus der derzeitigen Form der Landnutzung noch aus der atmosphärischen Deposition. An Hand der vorliegenden Daten, die bis in das Jahr 1977 zurückreichen, konnte gezeigt werden, dass in der Zeit vor 1989 Sulfat in erheblichem Maße eineingetragen worden ist. Dabei sind 2/3 auf atmosphärische und 1/3 auf landwirtschaftliche Einträge zurückzuführen. Mit Hilfe der simulativen Modellberechnung konnte gezeigt werden, dass sich in Auenböden aus Lehm und Ton noch Sulfat befindet, welches aufgrund der geringen Sickerwasserraten noch nicht ausgewaschen worden ist. Diese Vorräte werden auch in den nächsten Jahren noch eine erhöhte Sulfatkonzentration im Sickerwasser verursachen.

### 5 Literatur

EULENSTEIN, F. ; OLEJNIK, J. ; WILLMS, M. ; KERSEBAUM, K.-C. ; WERNER, A. (2003): Simulation des Stofftransports in der ungesättigten Zone. - In: Handbuch Wasserversorgung und Sulfatbelastung des Grundwassers unter land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen: 110-117; Karlsruhe (Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft).

EULENSTEIN, F. ; WILLMS, M. ; OLEJNIK, J. ; KERSEBAUM, K.-C. ; MEYER, B. ; WERNER, A. (2003): Schwefel in der Landwirtschaft. - In: Handbuch Wasserversorgung und Sulfatbelastung des Grundwassers unter land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen: 65-82; Karlsruhe (Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft)

HERLITZIUS, J. ; WILLMS, M. ; EULENSTEIN, F. ; MACHELEIDT, W. ; NESTLER, W. (2003): Nachhaltige Grundwasserwirtschaft an landwirtschaftlich genutzten Standorten am Beispiel der Elbaue bei Torgau. - In: Diffuser Eintrag von Chemikalien in Boden und Grundwasser : Bewertung & Management : Workshop. 26.-28. Februar 2003, Dresden: 1-14; Dresden (Technische Universität).

NESTLER, W., HERLITZIUS, J., KNOELLER, K., WILLMS, M., RICHTER, G., MACHELEIDT, W., TRETTIN, R., EULENSTEIN, F., OLEJNIK, J., KERSEBAUM, K. C., MEYER, B., 2003: Wasserversorgung und Sulfatbelastung, Fallbeispiel Mockritz, 30 S. In: NESTLER, W., GRISCHEK, T. (Hrsg.): Handbuch der Wasserversorgung und Sulfatbelastung des Grundwassers unter land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen, BMBF-Forschungsbericht.

# Ausprägung von physikalischen Unterschieden in der Bodenmatrix durch bodenkonservierende und konventionelle Landwirtschaft

B. Wöllecke<sup>1</sup>, U. Buczko<sup>1</sup>, O. Bens<sup>1</sup>, R.F. Hüttl<sup>1</sup>

## Einleitung

Ein Ziel des Bodenschutzes ist es, die Funktion des Bodens nachhaltig in seiner Leistungsfähigkeit zu erhalten oder wiederherzustellen. Dazu zählen u. a. an Agrarstandorten durch die agrarische Nutzung induzierte Beeinträchtigungen der Bodenfunktion zu minimieren. Als sinnvolle Alternative zur klassischen Pflugwirtschaft erweist sich die konservierende (pfluglose) Bodenbearbeitung, dank ihrer geringen Eingriffsintensität in die Struktur des Bodens. In vorliegendem Beitrag werden Studien zur Wasseraufnahme und Wasserspeicherfähigkeit von agrarisch genutzten Sand- und Lössböden in der norddeutschen Tiefebene vorgestellt. Verglichen wird der Einfluss der konventionellen mit der pfluglosen (konservierenden) Bodenbewirtschaftung auf bodenphysikalische Parameter. Bei beiden Untersuchungsstandorten erfolgte die konventionelle und konservierende Bearbeitung auf parallelen Teilflächen und mit gleicher Fruchtfolge. Den Untersuchungen lagen folgende Fragestellungen zu Grunde:

- 1) Welche bodenphysikalischen Parameter werden durch die unterschiedliche Bodenbewirtschaftung beeinflusst?
- 2) Fallen die Einflüsse der Bewirtschaftungsformen auf die bodenphysikalischen Eigenschaften bei Sand- und Lössböden gleich aus?
- 3) Wie wird die Wasseraufnahme und Wasserspeicherung durch die unterschiedliche Bodenbewirtschaftung beeinflusst?

## Untersuchungsgebiet und Methoden

Adenstedt liegt ca. 60 km südlich von Hannover, im Leine-Bergland. Die Ackerfläche wird seit 1990 parallel konservierend und konventionell bearbeitet.

Lietzen befindet sich ca. 60 km östlich von Berlin auf dem Seelower Höhenzug. Seit 1996 wird parallel konservierend und konventionell bearbeitet.

Die Standortcharakteristika zeigen Tabelle 1 und 2.

Tab. 1: Standortcharakteristika des Standortes Lietzen

Höhenlage	~ 55 m ü. NN
Bodenart	Lehmiger Sand
Bodentyp	Parabraunerde auf Geschiebedecksand
Vegetation	1996 Winterweizen, seit 1997 Winterroggen
mittl. Jahresniederschlag	500 mm
mittl. Jahrestemperatur	8,6 °C

Tab. 2: Standortcharakteristika des Standortes Adenstedt

Höhenlage	~ 185 m ü. NN
Bodenart	schluffiger Lehm
Bodentyp	Parabraunerde aus Löss
Vegetation	Fruchtfolge Zuckerrübe-Winterweizen-Winterweize
mittl. Jahresniederschlag	700 mm
mittl. Jahrestemperatur	8,0 °C

Die Bodenprofile wurden in folgenden Tiefenstufen beprobt: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 und 30-50 cm. Die Bestimmung der pH-Werte erfolgte mittels Elektrode in einem Eluat aus Feinerde und 1:2,5 verdünnter 1M KCl-Lösung. Der Gehalt an organischer Substanz wurde durch vermuffeln bei 430°C bestimmt. Ermittlung der Entwässerungskurven an 100 cm<sup>3</sup> Stechzylinderproben in 6-facher Wiederholung mittels stufenweiser Entwässerung bei folgenden Druckstufen -32, -62, -100, -320, -630, 1000 und 15000 hPa. Bestimmung der Lagerungsdichte an 100 cm<sup>3</sup> Stechzylinderproben in 6-facher Wiederholung (Schlichting et al. 1995). Das Wasseraufnahmevermögen wurde an unbehandelten, luftgetrockneten Mischproben mit dem Enslinversuch (in Anlehnung an DIN 18132) ermittelt. Aus den Ergebnissen des Enslinversuchs wurde nach Philip (1957) die Sorptivität nach 1 Minute Wasseraufnahme errechnet. Der Kontaktwinkel wurde mit der Kapillaren Aufstiegsmethode bestimmt (Goebel et al. 2004). Die Bestimmung des Makroporenverlaufs und -anteil erfolgte mittels Färbeversuch mit Methylblau (vgl. Hangen et al. (2002)).

## Ergebnisse

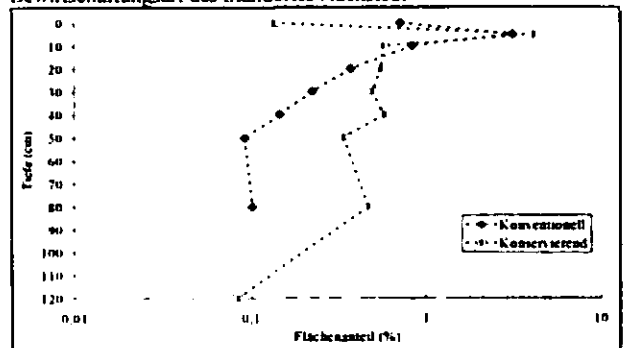
Tab. 3: Lagerungsdichten, Kohlenstoffgehalte und pH-Werte am Standort Lietzen (kons. = konservierende -, konv. = konventionelle Bodenbearbeitung)

Bodentiefe [cm]	kons. Lag.-dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	konv. Lag.-dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	kons. Corg [%]	konv. Corg [%]	kons. pH <sub>KCl</sub>	konv. pH <sub>KCl</sub>
0-5	1,4	1,5	0,7	0,7	5,2	5,3
5-10	1,5	1,4	0,5	0,8	5,3	5,5
10-20	1,4	1,4	0,6	0,8	5,5	5,5
20-30	1,4	1,4	0,5	0,7	5,4	5,7
40-50	1,6	1,6	0,1	0,1	5,7	5,8

Tab. 4: Lagerungsdichten, Kohlenstoffgehalte und pH-Werte am Standort Adenstedt (kons. = konservierende -, konv. = konventionelle Bodenbearbeitung)

Bodentiefe [cm]	kons. Lag.-dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	konv. Lag.-dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	kons. Corg [%]	konv. Corg [%]	kons. pH <sub>KCl</sub>	konv. pH <sub>KCl</sub>
0-5	1,1	1,3	1,7	1,0	6,3	6,2
5-10	1,3	1,2	1,9	0,9	6,4	6,5
10-20	1,3	1,2	1,5	1,0	6,6	6,5
20-30	1,2	1,3	1,4	1,0	6,8	6,5
40-50	1,4	1,3	1,2	0,6	6,8	6,6

Abb. 1.: Makroporosität als Funktion der Tiefe und Bewirtschaftungsart des Standortes Adenstedt



Am Sandstandort Lietzen konnten bei beiden Bewirtschaftungsweisen keine durchgängigen Makroporen nachgewiesen werden. Der Farbracer ist auf der konventionell bearbeiteten Fläche bis in 20 cm Bodentiefe eingedrungen und bei der konservierend bearbeiteten Fläche bis in 5 cm Bodentiefe.

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung, BTU Cottbus, Postfach 10 13 44, 03013 Cottbus, E-Mail: britta@woellecke.de



Abb. 2: Tiefenverlauf der Kontaktwinkel am Standort Lietzen

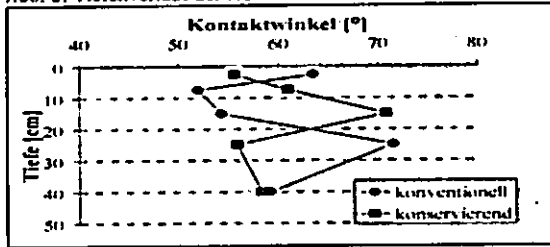


Abb. 3: Tiefenverlauf der Kontaktwinkel am Standort Adenstedt

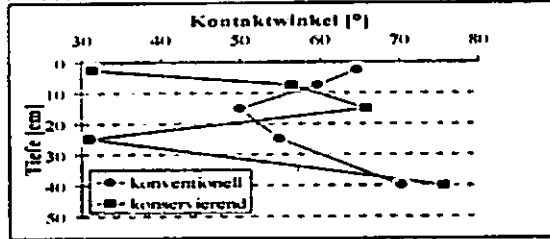


Abb. 4: Wassergehalte in Abhängigkeit vom Matrixpotential in unterschiedlichen Bodentiefen am Standort Lietzen

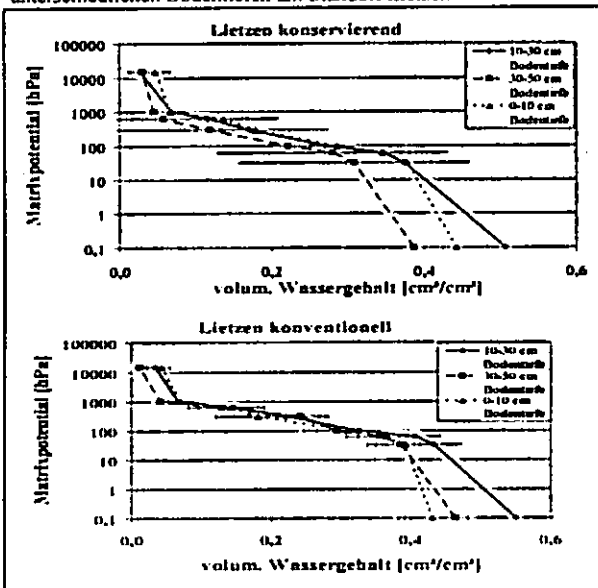
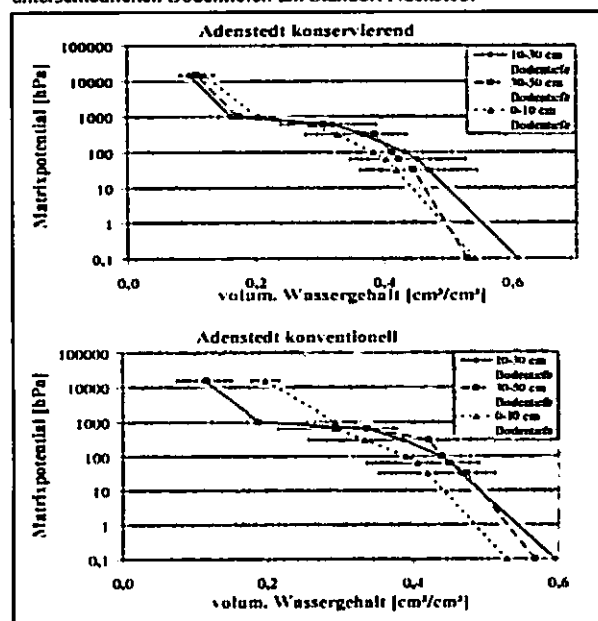


Abb. 5: Wassergehalte in Abhängigkeit vom Matrixpotential in unterschiedlichen Bodentiefen am Standort Adenstedt



Mittels Rangkorrelationsberechnungen nach Spearman konnte folgende höchst signifikante Zusammenhänge festgestellt werden: Sandgehalt-Sorptivität mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,81, pH-Wert - Kontaktwinkel mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,73. Zwischen dem Kohlenstoffgehalt und dem Kontaktwinkel und dem Kohlenstoffgehalt und der Sorptivität lässt sich kein signifikanter Zusammenhang erstellen.

**Folgerungen**

Am Lössstandort Adenstedt führt die konservierende Bodenbearbeitung zu einer Anreicherung von Humus, welcher für die Bodenstruktur und -qualität von großer Bedeutung ist, wogegen es am Sandstandort Lietzen zu einer leichten Humusabnahme bei der bodenkonservierend bearbeiteten Fläche kommt. Die Humusanreicherung bis in 50 cm Bodentiefe bei der konservierend bearbeiteten Fläche in Adenstedt geht auf die hohe Aktivität der Bodentiere zurück. Das gleiche gilt für die höhere Anzahl und tiefer reichenden Makroporen. Im Vergleich dazu war auf dem Sandstandort Lietzen keine nennenswerte Aktivität von Bodentieren zu erkennen. Bei Regenwürmern besteht auf den hiesigen Böden eine positive Beziehung zum Ton- und Schluffgehalt (vgl. Joschko 1999). Bei den Lagerungsdichten lässt sich beim Löss- und beim Sandstandort kein Unterschied in der Bearbeitungsweise feststellen, beim Sandstandort fällt eine leichte Erhöhung der Lagerungsdichte in 30 - 50 cm Bodentiefe auf, was auf eine Verdichtung in der Pflugsohle schließen lässt.

Unter konservierenden Bodenbearbeitung sind sowohl bei den Sand- als auch bei den Lössböden die Kontaktwinkel niedriger, d. h. Niederschlagswasser kann rascher in den Boden eindringen und dort gespeichert werden. Erst unterhalb der Pflugsohle gleichen sich die Kontaktwinkel der konventionell und konservierend bearbeiteten Flächen an. Bei der Entwässerungscharakteristik ist an den Sandstandorten kein Unterschied zwischen den Bewirtschaftungsformen zu erkennen, bei den Lössstandorten ist bei der konventionellen Bewirtschaftung eine schnellere Entwässerung der oberen 10 cm gegeben, bei der konservierenden Bearbeitung sind die Wassergehalt insgesamt etwas höher und es gibt keine signifikanten Unterschiede der Bodentiefen. Die höchste Sorptivität weist die konservierend bewirtschaftete Fläche in Adenstedt auf. Die Korrelationen zwischen pH-Wert und Kontaktwinkel sowie Bodenart und Sorptivität weisen darauf hin, dass nicht die Quantität, sondern die Qualität der organischen Substanz und die Korngrößenzusammensetzung die entscheidenden Größe bei der Wasseraufnahme von Böden sind (vgl. Woche et al. 2005).

Die positiven Effekte der konservierenden Bodenbearbeitung treten am Lössstandort deutlicher hervor, als auf Sand. Dieses kann darauf zurückgeführt werden, dass der Lössstandort bereits länger konservierend bearbeitet wird sowie auf die feinere Textur am Lössstandort.

**Literatur**

Goebel, M.-O., et al. (2004): Water Potential and Aggregate Size Effects on Contact Angle and Surface Energy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 383-393  
 DIN 18132 (1995): Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens nach Einslin.  
 Hangen, E., et al. (2002): Infiltration patterns into two soils under conventional and conservation tillage: influence of the spatial distribution of plant root structures and soil animal activity. *Soil & Tillage Research*, 63: 181-186.  
 Philip, J. R. (1957): The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.* 84: 257-264.  
 Schlichting, E., Blume, H.-P., Star, K. (1995): *Bodenkundliches Praktikum (Pareys Studentexte: 81)*, 2. Aufl., Blackwell Wiss.-Verl., Wien.  
 Joschko, M. (1999): Einfluß konservierender Bodenbearbeitung auf Regenwürmer und Enchytraëen. In: Seyfarth, W. et al. (Hrsg.): *Bodenökologische und pflanzenbauliche Effekte konservierender Bodenbearbeitung auf sandigen Böden*, ZALF-Bericht Nr. 39, Münchenberg.  
 Woche, S. K. et al. (2005): Contact angle of soil as affected by depth, texture, and land management. *Europ. J. of Soil Sci.* (in press)

**MITTEILUNGEN  
DER  
DEUTSCHEN BODENKUNDLICHEN  
GESELLSCHAFT**

**REFERATE  
des gemeinsamen Workshops des  
Instituts für Geographie der Friedrich-Schiller-Universität Jena  
und der AG  
Informationssysteme in der Bodenkunde der DBG  
„Methoden zur Datenaggregation und –regionalisierung  
in der Bodenkunde, der Bodengeographie und in Nachbardisziplinen“  
15. und 16. März 2005, Jena**

Band 106

2005



## Verbesserung und Erweiterung digitaler Bodenkarten unter Verwendung des *Transferable Belief Models*

Eike Stefan Dobers

### Problemstellung

Die Erstellung und Nutzung von digitalen Bodenkarten findet eine immer weitere Verbreitung in verschiedenen Arbeitsgebieten. In vielen Fällen handelt es sich bei diesen Karten um die digitalisierten analogen Datenquellen und es sind keine zusätzlichen Informationen enthalten. Moderne geographische Informationssysteme (GIS) bieten aber die Möglichkeit, in Form von Metadaten weitere Daten bereit zu stellen, die bei der Be- und Verarbeitung der eigentlichen Sachinformation genutzt werden können. Dies kann zum Beispiel bei der Überarbeitung von Bodenkarten von Bedeutung sein, wenn zusätzliche Datenquellen genutzt werden (andere Karten, Ergebnisse von neuen Untersuchungen, Fernerkundungsdaten, etc.).

Bei der Kombination verschiedener Datenquellen im GIS zur Beseitigung von räumlichen oder inhaltlichen Ungenauigkeiten in Bodenkarten stellen sich aber zwei Probleme: erstens besitzen die neuen Daten eine meist unterschiedliche Aussagekraft für die bzw. 'Trennschärfe' zwischen den einzelnen Karten-Einheiten, und zweitens können auch die Datenquellen als solche unterschiedlich gut geeignet sein, das Kartierziel zu unterstützen. Aus diesem Grund besitzt auch die resultierende Karte variierende Glaubwürdigkeiten bezüglich der dargestellten Information. Da diese Probleme nicht grundsätzlich zu beseitigen sind, werden geeignete Verfahren benötigt, um Unsicherheit zu repräsentieren und explizit zu machen. Das *Transferable Belief Model* (SMETS & KENNES 1994) stellt eine solches Verfahren dar. Es wird im Folgenden in seinen Grundlagen vorgestellt und an einem einfachen Beispiel illustriert.

### Das *Transferabel Belief Model* (TBM)

Das TBM ist eine Interpretation der Dempster-Shafer Theorie und repräsentiert die aktuelle Vorstellung über die Realität als eine Menge von möglichen Hypothesen, z.B. verschiedene Bo-

denformen in einer bestimmten Systematik, die durch quantifizierte 'Überzeugungen', *masses of belief* (*mob*), im Intervall  $[0,1]$  gewichtet werden. Die Menge der Hypothesen kann sich aufgrund von Wissenszuwachs graduell oder durch einen Paradigmenwechsel grundlegend verändern. Die zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  zur Verfügung stehenden Daten stellen den *evidential corpus* dar. Jede Datenquelle in diesem *corpus*, die *source of evidence* (SOE), kann aufgrund von Erfahrungswissen oder bekannter Zusammenhänge dahingehend interpretiert werden, inwieweit sie überzeugende Hinweise für einzelne Hypothesen oder Gruppen von diesen liefert. In einem gesonderten Schritt werden die verwendeten Datenquellen noch hinsichtlich ihrer Glaubwürdigkeit, *reliability* ( $r$ ), im Intervall  $[0,1)$  gewichtet, und die *mob* entsprechend angepasst.

Steht eine neue SOE zur Verfügung, wird sie ebenfalls hinsichtlich der bekannten Hypothesen interpretiert und die *mob* abgeleitet. Dann können diese unter Verwendung von *Dempster's rule of conditioning* mit den bereits existierenden *mob* kombiniert, und aktualisierte *mob* gewonnen werden. Die Hypothese mit dem neuen maximalen *mob* stellt die überzeugendste Hypothese über die 'Wahrheit' dar und bildet die neue Karteninformation. Für die Repräsentation konfligierender Datenquellen, d.h. wenn die SOE unterschiedliche Hypothesen unterstützen und die Schnittmenge leer ist ( $\{\emptyset\}$ ), existieren zwei Möglichkeiten im TBM: bei Annahme der *closed world assumption* wird die *mob* $\{\emptyset\}$  genutzt, um die restlichen *mob* zu normalisieren, so dass die Summe alle *mob* wieder 1 ergibt. Die Normierungskonstante findet dann Niederschlag im *weight of conflict* (*woc*) und ist somit ein quantitativer Hinweis auf Konflikte in den Datenquellen. Unter Annahme der *open world assumption* findet keine Normierung statt, und Konflikte in den SOE wirken sich in reduzierten *mob* und der leeren Menge als mögliche 'überzeugendste' Hypothese aus. Die leere Menge weist damit auf eine nicht ausreichende Vorstellung über die Realität dar. Im hier betrachteten Fall könnte es eine unbekannte oder im Gebiet noch nicht beschriebene Bodenform sein.

### Material & Methoden

Für ein landwirtschaftlich genutztes Feld im Sandlöss-Gebiet des Fläming (Brandenburg) standen die Karten der Bodenschätzung (RBS),

---

<sup>1</sup> PROLAND – EU Centre of Excellence  
Institute of Soil Science and Plant Cultivation  
ul. Czartoryskich 8  
PL – 24-100 Puławy (Polen)  
eMail: edobers@gmx.de

der Messwerte der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens im Frühjahr (ECa) (EM38-Sensor, Vertikalmodus), von DGPS-Ertragsdaten der Winterraps-Ernte 1999 (Yld99) sowie generelle Informationen über die im Gebiet vorkommenden Bodenformen zur Verfügung (DOBERS 2002). Für die räumlichen Daten wurden Hypothesen bezüglich der korrespondierenden Bodenformen aufgestellt (Tab.1). Die abgeleiteten *mob* wurden mit angenommenen Glaubwürdigkeiten für die Daten von 0.50 (RBS), 0.95 (ECa) und 0.85 (Yld99) korrigiert, und anschliessend mit dem TBM kombiniert.

Tab.1: Interpretation der Datenquellen hinsichtlich korrespondierender Bodenform (BF)

BF	Substrat	RBS	ECa	YLD99	Lössdecke
[-]	[-]	[-]	[mS*m <sup>-1</sup> ]	[dt*ha <sup>-1</sup> ]	[cm]
BB1	p-s/f-s	S 4 24	< 18	<15	fehlt
BB2	p-s/p-ls	Sl 4 32	18-22	15-25	fehlt
LF1	p-sö/f-s	Sl 4 32	20-24	25-35	40-50
LF1	p-sö/f-s	IS 4 41	20-24	25-35	40-50
LF2	p-sö/f-s	SL 4 49	24-28	35-40	60-70
LF3	p-sö/f-s	SL 3 57	>28	40-45	>80
YK	o-u/p-sö	SL 3 57	18-24	>45	>100

Exemplarisch wird die Berechnung für eine typische Situation vorgestellt: ein ertragsschwacher Ort innerhalb eines Polygons der Bodenschätzungskarte und Aktualisierung durch Integration der ECa- und Yld99-Daten: 'SL4 49'-Polygon; 20 mS\*m<sup>-1</sup>; 20 dt\*ha<sup>-1</sup>.

## Ergebnisse & Diskussion

### => Schritt 1: Integration der ECa-Daten

	SOE <sub>1</sub> "ECa" (r = 0.95)	
	<i>mob</i> {BB <sub>2</sub> , YK}	<i>mob</i> {Ω}
SOE <sub>1</sub> "RBS" (r = 0.50)	= 0.95	= 0.05
<i>mob</i> {LF <sub>2</sub> } = 0.50	{Ø} = 0.475	{LF <sub>2</sub> } = 0.025
<i>mob</i> {Ω} = 0.50	{BB <sub>2</sub> , YK} = 0.475	{Ω} = 0.025

Normalisierungskonstante: K<sup>-1</sup> = 1 - *mob*{Ø} = 0.525

neue *mob* nach 1. Integrationsschritt (=> SOE<sub>1,2</sub>):

<i>mob</i> {LF <sub>2</sub> }	= 0.048
<i>mob</i> {BB <sub>2</sub> , YK}	= 0.904 (neue Hypothese)
<i>mob</i> {Ω}	= 0.048
<i>woc</i> = - log (K <sup>-1</sup> )	= 0.280

### => Schritt 2: Integration der Yld99-Daten

	SOE <sub>2</sub> "Yld99" (r = 0.85)	
	<i>mob</i> {BB <sub>2</sub> }	<i>mob</i> {Ω}
SOE <sub>1,2</sub> "RBS x ECa"	= 0.85	= 0.15
<i>mob</i> {BB <sub>2</sub> , YK} = 0.904	{BB <sub>2</sub> } = 0.768	{BB <sub>2</sub> , YK} = 0.136
<i>mob</i> {LF <sub>2</sub> } = 0.048	{Ø} = 0.041	{LF <sub>2</sub> } = 0.007
<i>mob</i> {Ω} = 0.048	{BB <sub>2</sub> } = 0.041	{Ω} = 0.007

Normalisierungskonstante: K<sup>-1</sup> = 1 - *mob*{Ø} = 0.9592

neue *mob* nach 2. Integrationsschritt:

<i>mob</i> {LF <sub>2</sub> }	= 0.008
<i>mob</i> {BB <sub>2</sub> , YK}	= 0.141
<i>mob</i> {BB <sub>2</sub> }	= 0.843 (neue Hypothese)
<i>mob</i> {Ω}	= 0.008
<i>woc</i> = - log (K <sup>-1</sup> )	= 0.018

Anhand der Neuverteilung der *mob* und des resultierenden *woc*-Wertes im ersten Schritt der Datenintegration ist erkennbar, dass die SOE deutlich verschiedene Hypothesen unterstützen. Zudem zeigt die Interpretation der ECa-Daten, dass an diesem Ort zwei Hypothesen unterstützt werden, die vorerst nicht weiter getrennt werden können. Die neue Hypothese an diesem Ort wäre nach der Kombination {BB<sub>2</sub>, YK}. Die Integration der Ertragsdaten überträgt den Großteil der *mob* auf die eindeutige Hypothese {BB<sub>2</sub>}, insgesamt tritt nur ein sehr kleiner *woc* auf, was auf eine relativ gute Übereinstimmung der SOE für diesen Punkt hinweist. Durch eine Verarbeitung der Daten für das gesamte Feld läßt sich somit eine Karte der Bodenformen-Hypothesen, der jeweils korrespondierenden maximalen *mob*- und *woc*-Werte erstellen und im GIS als neue Bodeninformation bereitstellen.

Die Festlegung der *mob* und der *r* kann, muß aber nicht auf Häufigkeitsverteilungen beruhen. Dies ist in zweifacher Hinsicht wichtige für die Anwendung, da einerseits selten vollständige Informationen über derartige Verteilungen vorliegen. Andererseits entsteht dadurch die Schwierigkeit der Interpretation der *mob*. SMETS & KENNES (1994) lösen dieses Problem durch Einführung einer *pignistic transformation*, die aus den *mob* Wahrscheinlichkeiten erzeugt, und damit Eingangsdaten für Risikoanalysen und Entscheidungsfindung bereitstellt. Auf diesem Gebiet des TBM ist jedoch weitere Forschung notwendig. Ebenso ist die Interpretation der *woc* bislang nicht befriedigend gelöst.

## Zusammenfassung

Das TBM bietet eine Erweiterung heutiger GIS für die Informationsverarbeitung unter Berücksichtigung von unsicheren Daten und subjektiven Beurteilungen der Datenqualität. Die bislang im GIS verwendeten Daten können mit Werten der Verlässlichkeit belegt werden und werden explizit als 'Hypothesen' über die Realität ausgewiesen. Durch die Kombinationsregel lassen sich neue Datenquellen nachvollziehbar integrieren und Expertenwissen quantifiziert für die Gewinnung einer zusammenfassenden Hypothese verarbeiten.

## Literatur:

- DOBERS (2002): Methoden der Standorterkundung als Grundlage des DGPS-gestützten Ackerbaus. Göttinger Bodenkundliche Berichte 115
- SMETS & KENNES (1994): The transferable belief model. Artificial Intelligence 66: 191-234

## Anwendung geostatistischer Methoden - Wichtige Aspekte im Vorfeld

Lorenz Dobler<sup>1</sup>

möglicherweise mit höheren gesundheitlichen und ökonomischen Risiken verbunden sind.

### Datenqualitätsziele Konzept des räumlichen Prozesses

#### Einleitung

Die flächendeckende Modellierung bodenkundlicher Parameter aus Punktdaten mit Hilfe mathematisch-statistischer Verfahren ist wegen der Heterogenität des Mediums eine besondere Herausforderung. Insbesondere bei kleinen Maßstäben ist eine räumliche Schätzung von Bodenparametern mit einfachen Interpolationsmethoden (d.h. ohne Berücksichtigung von Zusatzinformationen) mit großen Unsicherheiten verbunden oder nicht möglich.

Im Folgenden werden einige wichtige Aspekte beschrieben, die bei der Durchführung einer räumlich-statistischen Analyse im Vorfeld der Anwendung konkreter Interpolations- bzw. Schätzverfahren zu beachten sind. Sie sollen helfen, geeignete Daten und Verfahren auszuwählen, um gravierende Fehler bei der Anwendung von Regionalisierungsalgorithmen zu vermeiden.

Es wird dabei deutlich, dass insbesondere im Bodenschutz die Anforderungen an die Interpolationsergebnisse sehr ähnlich zu den ursprünglichen, montanwirtschaftlich geprägten Fragestellungen aus den Anfängen der Geostatistik sind.

#### Regionalisierung und Bodenschutz

Im Rahmen der Umsetzung des Bodenschutzrechts werden besondere Anforderungen an die räumlichen Informationsgrundlagen gestellt. Räumlich-statistische Analysen müssen hier objektive, technisch fundierte, verständliche und sichere Aussagen über Ausdehnung und Ausmaß schädlicher Bodenveränderungen als Grundlage für Entscheidungsprozesse liefern. Insbesondere bei der Anordnung konkreter Maßnahmen, d.h. bei Planungen im großen Maßstab, müssen belastbare Aussagen nicht nur für einzelne Schätzwerte sondern auch für bestimmte Flächen („flächenscharf“) vorliegen. Im praktischen Vollzug der Bodenschutzgesetze sind zum Beispiel nur solche Gebiete von Bedeutung, in denen Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte bestimmter Stoffe überschritten werden. Rechtlich verbindliche Entscheidungen über konkrete Maßnahmen können jedoch nur bei einer ausreichend hohen statistischen Aussagesicherheit angeordnet werden. Deswegen sind bei der Entscheidungsfindung auf Grundlage flächendeckender Schätzwerten insbesondere deren Aussagesicherheit ausschlaggebend. Auch wenn die berechneten Schätzvarianzen minimal sind, kann es dabei unter Umständen zu Fehleinschätzungen kommen, die

Für die Auswahl geeigneter Daten und Verfahren ist im Vorfeld einer Analyse eine konzeptionelle Vorstellung über das zu erwartende räumliche Muster und über mögliche räumliche Prozesse seiner Entstehung sowie über die wichtigen Einflussfaktoren zu entwickeln. Eine große Hilfe ist dabei die Erstellung einer Konzeptkarte, in der relevante und bereits vorhandene räumliche Informationen zusammengefasst und visualisiert werden. Im Rahmen des Bodenschutzes sind zum Beispiel die räumliche Variabilität von Geologie, Böden, Relief und Nutzung im Untersuchungsgebiet sowie spezifische Informationen über mögliche Quellen, Pfade, Senken und lineare „Störungen“ des zu untersuchenden Parameters von großer Bedeutung. Die Konzeptkarte ist darüber hinaus für die Plausibilitätsprüfung und fachliche Validierung der Ergebnisse unbedingt notwendig.

Sollen mittels mathematisch-statistischer Regionalisierungsverfahren räumliche Entscheidungsgrundlagen geschaffen werden, müssen Fragestellung und Zielsetzung (Datenqualität, Maßstab) im Vorfeld der Analyse definiert werden (z.B. U.S.EPA 1993).

#### Stützung

Eine der größten Fehlerquellen bei der Verwendung von Regionalisierungsalgorithmen ist die mangelnde (Prozess-)Repräsentativität der primären Datengrundlage. Hierbei ist v.a. auf eine ausreichende Anzahl von Stichproben und eine geeignete Geometrie sowohl des Messnetzes als auch der einzelnen Proben zu achten.

Bei geostatistischen Interpolationsverfahren ist grundsätzlich die Frage der geeigneten „Stützung“ zu klären, da diese die Varianz von Proben- und Schätzwerten und damit auch die Aussagesicherheit direkt beeinflusst. Unter dem Begriff „Stützung“ versteht man hierbei die Geometrie, d.h. die Form und das Volumen der einzelnen Proben aber auch der geschätzten Werte (Punkt, Fläche, Block). Weichen die Stützungen von Proben deutlich voneinander ab, muss vor der Analyse eine Homogenisierung bzw. Korrektur der Stützungen durchgeführt werden (u.a. AKIN & SIEMES 1988).

Das Problem unterschiedlicher Stützungen von Ausgangsdaten und Schätzwerten wird in der Geostatistik durch das Prinzip des Block-Kriging gelöst. Damit können aus einer kleinen Stützung der Ausgangsdaten (z. B. Punkte) gemittelte Schätzwerte und entsprechende Schätzvarianzen für beliebig größere Stützungen der Schätzwerte (z.B. Flächen oder Volumen) berechnet werden.

<sup>1</sup> Münchner Str. 6b, 82024 Taufkirchen  
email: LenzDobler@freenet.de

#### Messnetz

Für die Anwendung räumlicher Interpolationsverfahren wird die Repräsentativität neben der Stützung auch durch das Messnetz bestimmt. Vor der Durchführung einer Interpolation sollte daher geprüft werden, ob das Untersuchungsgebiet annähernd gleichmäßig von Stichproben überdeckt wird, ob wichtige Einflussgrößen durch das Messnetz wiedergegeben werden und ob es engmaschig genug ist, um damit räumliche Zusammenhänge des Prozesses erkennen und modellieren zu können. Sind die Stützpunkte zu weit voneinander entfernt, sind sie räumlich voneinander unabhängig, so dass die Anwendung räumlicher Interpolationsverfahren im Allgemeinen nicht mehr sinnvoll ist.

Die Gleichmäßigkeit eines Messnetzes kann mittels GIS leicht überprüft und anhand der statistischen Verteilungen der theoretisch zu erwartenden und der tatsächlichen Punktabstände oder der Größen der Thiessenpolygone quantifiziert werden. Die Repräsentanz des Messnetzes bezüglich wichtiger Einflussgrößen kann ebenfalls durch Vergleich der statistischen Verteilungen von Punkt- und Flächendaten der jeweiligen Zusatzinformation abgeschätzt werden.

### Zusatzinformationen

Lineare lokale Interpolationsverfahren können im Prinzip nur für stationäre Prozesse verwendet werden. In der zu erwartenden Wertebereich dürfen also weder ein systematischer (kontinuierlicher) Trend noch plötzliche Sprünge („Effekte“) auftreten.

Bei bodenkundlichen Fragestellungen ist davon auszugehen, dass mit der Flächengröße die Komplexität räumlicher Prozesse und die Anzahl der Einflussfaktoren überproportional zunehmen. In größeren Untersuchungsgebieten ist es wegen der Inhomogenität des Untersuchungsmediums Boden daher notwendig, nicht-stationäre Komponenten vor der Interpolation aus dem Datensatz zu filtern. Alternativ kann sowohl das Untersuchungsgebiet als auch die dazugehörige Datengrundlage in unterschiedliche stationäre Prozesse/Gebiete unterteilt und getrennt analysiert werden (=> homogene Raum-/Stichprobeneinheiten). Klassische Bodenkarten geben hierbei Aufschluss über die Verbreitung „permanenter“ Bodeneigenschaften und können als Zusatzinformationen zur Ableitung „dynamischer“ Bodeneigenschaften mittels Interpolation herangezogen werden. Bei komplexeren geostatistischen (Hybrid-)Methoden können Trends und Effekte mit Hilfe flächendeckender Zusatzinformationen innerhalb des Interpolationsverfahrens berücksichtigt werden. Neben der Filterung räumlicher Trends und Effekte können Zusatzinformationen auch dazu verwendet werden, nicht ausreichend dicht beprobte bzw. nur mit großem Zeit- und Kostenaufwand zu erhebende Variablen mit Hilfe einer dichter beprobten bzw. kostengünstiger zu erhebenden Variable zu schätzen. Zusatzinformationen sind dann geeignet, wenn sie, zum Beispiel bei Vorliegen einer starken Korrelation, entscheidend zur Erklärung der räumlichen Struktur der Zielvariable beitragen können.

### Variogramm

Das Variogramm ist auch außerhalb der Anwendung geostatistischer Techniken ein hervorragendes Instrument zur Abschätzung räumlicher Zusammenhänge und Prozesse.

Das wichtigste Prüfkriterium ist dabei die Höhe des relativen Nugget-Effekts. Je höher der Anteil des Nugget-Effekts an der räumlichen Variabilität desto weniger geeignet sind einfache räumliche Interpolationsverfahren für den zu modellierenden Prozess. Beträgt der relative Nugget-Effekt 100 Prozent ist das globale Mittel der beste Schätzwert für alle Punkte im Untersuchungsgebiet.

Die Reichweite des Variogramms zeigt an bis zu welcher Entfernung Punkte im Raum miteinander korreliert sind und ist damit ein wichtiger Hinweis zur notwendigen Umfang der Suchnachbarschaft für lokale Interpolationsverfahren.

Neben den genannten Aspekten gibt das Variogramm aber auch Hinweise auf die Reichweiten geschachtelter Prozesskomponenten und räumlicher Trends. Als vielseitiges „Data-Mining“-Tool sollte es bei der explorativen Analyse räumlicher Daten daher zum Standardwerkzeug eines jeden Bearbeiters gehören.

### Literatur

- Akin, H.; Siemes, H. (1988): Praktische Geostatistik - Eine Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften. - Berlin [u.a.]: 304 S..
- DOBLER, L. (IN VORBEREITUNG): Interpolation bodenkundlicher Parameter im Bodenschutz.. Grundlagen deterministischer und geostatistischer Interpolationsmethoden. Anwendungsbeispiele unter Berücksichtigung flächendeckender Zusatzinformationen.- GLA FACHBERICHT, MÜNCHEN.
- DOBLER, L.; HINTERDING, A.; MÖLLER, A.; GERLACH, N. & GABEL, F. (2004): Geostatistische und statistische Methoden und Auswertverfahren für Geodaten mit Punkt- bzw. Flächenbezug. Teil 3, Abschlussbericht. - BUND-LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ (LABO) [HRSG.]
- U.S. EPA. (1993): Guidance for the data quality objectives process. - EPA QA/G-4. Washington, DC.

## **Übertragbarkeit von Bodenformengesellschaften des Pfälzer Waldes in das Mittlere Saaletal mit Künstlichen Neuronalen Netzen**

Helga Förster, Thorsten Behrens und  
Thomas Scholten\*

### **Einleitung**

In zunehmendem Maße werden für den Hochwasserschutz, die Umsetzung von Wasser-rahmenrichtlinien und Planungsaufgaben von Ländern und Kommunen hochauflösende Bodenkarten benötigt. Andererseits sinken die finanziellen Mittel für die bodenkundliche Landesaufnahme stetig. In diesem Spannungsfeld müssen neue Strategien und Methoden entwickelt werden, um möglichst kosteneffektiv zu hochauflösenden Flächenaussagen zu kommen.

Aufbauend auf Studien zur Prognose von Bodenformengesellschaften im Pfälzer-Wald mit Verfahren des prädiktiven Data Minings (Behrens et al. 2005; Behrens und Scholten 2005), soll in dieser Studie der Versuch unternommen werden, die im Pfälzer Wald mit Künstlichen Neuronalen Netzen erlernten Zusammenhänge zwischen Relief, Geologie und Nutzung sowie den Bodenformengesellschaften auf das Mittlere Saaletal zu übertragen und somit eine Prognose in entfernte, jedoch ähnlich situierte Landschaften zu versuchen.

### **Untersuchungsgebiete**

Für das überwachte Training wurden Bodenkarten (1:50.000) aus dem Pfälzer Wald verwendet. Die Übertragung erfolgte auf einen Ausschnitt des Mittleren Saaletals bei Jena. Diese zwei Schichtstufenlandschaften gleichen sich in der geomorphologischen Prozessdynamik sowie in der Stratigraphie der Trias.

Trotz dieser prinzipiellen Gemeinsamkeit treten lokale Unterschiede in der lithologischen Ausprägung des Muschelkalks und des Buntsandsteins auf, die sich in der Bodengenese niederschlagen. So führte der hohe Kalkgehalt des Unteren Muschelkalks im Mittleren Saaletal vorrangig zur Bildung von Rendzinen während sich im mergeligen Unteren Muschelkalk des Pfälzer Waldes Pararendzinen, Regosole, Pseudogleye und Braunerden entwickelt haben. Da-

gegen fehlen im Pfälzer Wald die Tonsteine des Röt, die im Mittleren Saaletal zur Bildung von Pelosolen geführt haben (Behrens et al. 2005; Förster 2004).

Bei der mesoskaligen Betrachtung fällt die klimatische Differenz zwischen den Gebieten auf. Der Pfälzer Wald liegt höher als das Mittlere Saaletal, ist niederschlagsreicher und stärker bewaldet. Entsprechend haben im Unterschied zum Pfälzer Wald die mächtigen Lößvorkommen im Mittleren Saaletal kombiniert mit dem geringen Niederschlagsaufkommen zur Ausbildung von Parabraunerde-Pseudogley-Gesellschaften und lokal Parabraunerde-Tschernosem-Gesellschaften geführt (Schramm 1995).

### **Vorgehensweise**

Die prinzipielle Vorgehensweise entspricht der eigentlichen Erstellung von Digitalen Bodenkarten im Pfälzer Wald (Behrens et al. 2005). Dort wurden vorwärtsgerichtete Resilient Backpropagation Netze (Riedmiller und Braun 1992) mit dreischichtigen Netzwerktopologien eingesetzt, um in ausgewählten Trainingsflächen des Pfälzer Waldes die bodengeographischen Strukturen anhand der vorhandenen Bodenkarten zu trainieren bzw. zu erlernen. Für das Training standen Reliefparameter (vgl. Behrens 2003), geologische Einheiten (GK25) und Landnutzungsklassen (ATKIS) zur Verfügung. Die geologischen Einheiten wurden nach Substraten reklassifiziert, die neben der bodentypologischen Kategorie eine weitere Grundlage zur Bildung von Bodenformengesellschaften darstellen.

Um eine Übertragung in das mittlere Saaletal zu ermöglichen, müssen für beide Gebiete identische Basisdaten (Relief, Geologie und Nutzung) vorliegen. Dies erfordert zum einen eine Parallelisierung der lithologisch reklassifizierten geologischen Einheiten. Dazu wurden die geologischen Einheiten des Mittleren Saaletals expertenbasiert nach lithologischen Gesichtspunkten den Einheiten des Pfälzer Waldes zugeordnet. Dabei konnten jedoch nicht alle stratigraphischen Einheiten des Mittleren Saaletals einer lithologischen Einheit des Pfälzer Waldes zugeordnet werden. Zum anderen mussten die Reliefparameter auf denselben Wertebereich normiert werden, wie er für den Pfälzer Wald vorliegt.

\* Friedrich-Schiller-Universität Jena, Physische Geographie und Bodenkunde,  
Löbdergraben 32, 07743 Jena, Helga.Foerster@uni-jena.de



Im Anschluss an das Preprocessing können dann die im Pfälzer Wald gelernten Bodenformengesellschaften in das Mittlere Saaletal prognostiziert werden.

### Ergebnisse und Validierung

Die Validierung der Bodenprognosekarte mit vorhandenen Bodenkarten ermöglicht die Abschätzung der Güte der Übertragung. Die dazu verwendeten Gütemaße werden aus einer Kreuztabelle abgeleitet. Sie beschreibt das Verhältnis der kartierten und prognostizierten Flächeneinheiten zueinander. Dabei ist die Trefferquote ein Maß für die Unterschätzung der Flächeninhalte innerhalb einer Lerneinheit. Die Trefferquote beschreibt also die Nachahmungsfähigkeit des KNN. Die Präzision beschreibt die flächenhafte Überschätzung der Lerneinheit. Der F1-Wert ist das harmonische Mittel aus den beiden Fehlermaßen und stellt ein aussagekräftiges Gütemaß zu Bewertung von Prognosen dar.

Bei der Validierung der Bodenprognosekarte des Pfälzer Waldes ergaben sich mit Medianwerten von 90 % für die Trefferquote, 89 % für die Präzision und 84 % für den F1-Wert im Mittel sehr gute Ergebnisse.

Die im Pfälzer Wald erfolgreich eingesetzten und auf geologisch-lithologischen Einheiten basierenden Netze konnten im Ausstrich der nicht zugeordneten Einheiten im Mittleren Saaletal folglich keine Prognose von Bodenformengesellschaften liefern. Dadurch entstanden Datenlücken, sodass die Flächendeckung für das Mittlere Saaletal 76 % beträgt. Die fehlenden 24 % umfassen Flächen auf denen Terra Fusca auf Muschelkalk, Pelosole auf Tonsteinverwitterung (Röt) und Parabraunerde-Braunerdegesellschaften auf Löss entwickelt sind. Infolgedessen wurde eine erneute Prognose, die nur auf Relief- und Landnutzungsinformationen basiert, durchgeführt und somit eine flächendeckende Prognosekarte berechnet.

Die Validierung erfolgte anhand gezielter Bohrungen im Gelände. Die hierbei erzielten Medianwerte liegen bei 53 % für die Trefferquote, 93 % für die Präzision und 66 % für den F1-Wert. Diese Ergebnisse zeigen, dass eine reliefgestützte Prognose von Bodenformengesellschaften auch bei der räumlichen Übertragung eines erlernten Regelwerks über große Distanzen eine beachtliche Güte erreichen kann und somit die Erstellung von Bodenkonzept-

karten erheblich erleichtert und vor allem homogenisiert.

### Schlussfolgerungen

Die Studie hat gezeigt, dass die Basisdaten Relief und Landnutzung geeignete Datengrundlagen für eine verallgemeinerungsfähige Ableitung der Verbreitungsstrukturen von Bodenformengesellschaften in Schichtstufenlandschaften darstellen. In Landschaften mit stark strukturell geprägter Oberflächengestalt, wie den Schichtstufenlandschaften, nimmt daneben die Geologie bei der Prognose mit KNN eine zentrale Rolle ein. Zur Lösung des methodischen Problems der Parallelisierung geologischer Einheiten mit unterschiedlichen Lithologien besteht weiterer Forschungsbedarf.

Bei der Übertragung über große Distanzen hinweg sind zudem klimatische Faktoren in die Prognose einzubeziehen, um die unterschiedliche Ausprägung der Bodengenese entlang eines Klimagradienten berücksichtigen zu können. Die methodische Umsetzung einer Berücksichtigung des Klimaeinflusses auf die Bodengenese ist daher dringend notwendig.

### Literatur

Behrens, T., 2003. Digitale Reliefanalyse als Basis von Boden-Landschafts-Modellen – am Beispiel der Modellierung periglaziärer Lagen im Ostharz. Dissertation, Giessen.

Behrens, T., Förster, H., Scholten, T., Steinrücken, U., Spies, E.-D. and Goldschmitt, M., 2005: Digital soil mapping using artificial neural networks.- J. Plant Nutr. Soil Sci. 168(1), 21-33.

Behrens, T. and Scholten, T., 2005. A Comparison of Data Mining Techniques in Predictive Soil Mapping. In: Lagacherie, McBratney and Voltz (eds.) Elsevier Developments in Soil Science Series. Accepted.

Förster, H., 2004. Erstellung von digitalen Bodenprognosekarten mit Künstlichen Neuronalen Netzen am Beispiel des Pfälzer Waldes und des Mittleren Saaletals. Unveröff. Diplomarbeit, Inst. f. Geogr., FSU Jena.

Riedmiller, M. and Braun, H., 1992. RPROP A Fast Adaptive Learning Algorithm. Proceedings of the 1992 International Symposium on Computer and Information Sciences VII, November, Antalya, Turkey.

Schramm, A., 1995. Böden.- In: Seidel, G.: Geologie von Thüringen.- E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart: 495-512.

## Ableitung von Bodenkzeptkarten unter Berücksichtigung unscharfer Grenzen auf der Grundlage der Fuzzy-Set-Theorie

Jens Hannemann \*

### 1. Problemstellung

Bodenkarten bilden mehr oder weniger gut den n-dimensionalen Merkmalsraum des Bodenkörpers ab. Sowohl die Komplexität der abzubildenden Merkmale und deren Zusammenwirken als auch die Fülle der zu ihrer Erstellung zur Verfügung stehenden Informationen erfordert eine Schwerpunktsetzung in der Repräsentation der Inhalts-Raum-Beziehungen der Bodenkompartimente. Allein die Verschneidung der Informationsebenen Geologie und Bodenschätzung macht klar, dass eine scharfe Abgrenzung von Bodenarealen ohne die stärkere Gewichtung der einen oder anderen Informationsebene und der daraus ableitbaren Merkmale (Zielkategorien) kaum möglich scheint. Neben dieser inhaltlich-informellen Unschärfe existiert also auch eine räumliche.

### 2. Lösungsansatz

Für die einzelnen Informationsebenen erfolgt eine Merkmalsseparation. Diese Merkmale werden über Zugehörigkeitsgrade gewichtet bodenformenrelevanten Zielkategorien statistisch und / oder empirisch zugeordnet (Tabelle 1). Nach der „Verpunktung“ erfolgt die Interpolation (Inverse Distanzwichtung, Kriging) der Punktzwischenwerte, die gewissermaßen die scharfen Polygongrenzen „aufweichen“ und Merkmalsprünge verhindern soll. Die anschließende Verschneidung führt über die Addition der Zugehörigkeitsgrade der zugewiesenen Flächen der Objektebenen (Bodenschätzung, Geologie, Relief etc.), der Bestimmung der maximalen Zugehörigkeit pro Zielkategorie und der Normierung der Pedogenesen und der Bindigkeit zu einem „Stapel“ der interpolierten Zugehörigkeitsebenen der Zielkategorien. Bindigkeit wird hier als silikatische Bindigkeit im Sinne der kontinuierlichen Reihe Sand-Ton, d.h. ohne Kalk und Humus verstanden. Letztere bilden eigene Zielkategorien. Danach erfolgt eine Arealagggregation durch die Anwendung von Gruppierungs- bzw. Segmentierungsverfahren.

Ableitungsobjekte, Datenkategorien und Datenherkunft	Zielkategorien (Bodenformenrelevanz)																																	
	Pedogene Merkmale (Pedogenesen)													Substratmerkmale																				
	Humus			Wasser						Bodenart				Genese																				
	HY_Antropogener Humus	HT_Terrigener Humus	HH_Hydrogener Humus	RQ_Rohboden	BB_Verbraunung	PP_Podsolierung	LF_Lessivierung	Ton-Bänderung	Sand-Bänderung	Carbonat	GG_Grundvergleitung	SS_Stauvergleitung	rGG_Relikvergleitung	Kies	Lehm	Sand	Schluff	Ton	Bodenart (silik. Bindigkeit)	a_Flug...	og_organisch	ff_Fluss...	q_Wiesenmangel	f_limnisch	fu_Urstrom...	pkk_kryoturba	pf_l_kryofless...	pas_Abschläm...	fg_glazifluvial	fg_glazilimnisch	gm_Grundmoräne	uk_kolluvial	Teufen (Mächtigkeiten)	
Talsand <sup>F1</sup>				0.5	0.6					0.8	1							0.1																
SI 4D <sup>F2</sup>				0.6		0.7	0.3							0.3	0.7			0.4					1	0.5		0.3					0.8			
KdS 6 <sup>F3</sup>			1							0.3																								
Senke <sup>F4</sup>	0.9																	0.3															1	
Graben <sup>L5</sup>		0.8								1																								
GWSt <sup>F6</sup>										1																								
2 <sup>F7</sup>				0.3	0.9						0.1	0.1	0.8	0.2				0.6						1	1								1	
D II a <sup>F8</sup>				0.2	0.8													0.7						1	1									1
RQ: a-ss <sup>P9</sup>			1												1				1															

*Indexbedeutung:*  
 F: Flächendatum, L: Liniendatum, P: Punktdatum  
 1: GK25, 2: Bodenschätzung, 3: Forst, 4: DGM, 5: Topografie, 6: Hydrogeologische Karte, 7: Legendeneinheit einer Bodenkarte, 8: Mittelmaßstabige Landwirtschaftliche Standortkartierung, 9: Punktbodenform (LBGR)  
 \* d R Intervalle

Tab. 1: Zugehörigkeitsgrade\* als Intensitätsmaß der Pedogenese und ihre Mächtigkeiten als Basis der Fuzzy-Regel-Datenbank

### 3. Aspekte der Inhalt-Raum-Analyse

#### 3.1 Schwellenwertwahl der Zugehörigkeitsgrade

Die Wahl der Schwellenwertbereiche für eine Ableitung von Bodenformen nach KA4/5, d.h. der bodensystematischen und substratsystematischen Einheit (hier jedoch reduziert auf Bindigkeit) gestaltet sich insofern als schwierig als dass der Verlauf der Zugehörigkeitsfunktion für jede Zielkategorie unterschiedlich sein kann. Mögliche Bereiche zeigen die Tabellen 2 und 3.

Schwellenwertbereiche	Bodenartengruppen (ohne Schluff !)		
	Bindigkeit	Kürzel	verbal
$1 \geq \mu \leq 0.8$	extrem	tt <sup>1</sup>	Ton
$0.8 > \mu \leq 0.7$	sehr hoch	lt	Lehmton
$0.7 > \mu \leq 0.6$	hoch	tl	Tonlehm
$0.6 > \mu \leq 0.4$	mittel	ll	Lehm
$0.4 > \mu \leq 0.3$	gering	sl	Sandlehm
$0.3 > \mu \leq 0.2$	sehr gering	ls	Lehmsand
$0.2 > \mu \leq 0$	keine	ss	Sand

Tab. 2: Schwellenwertbereiche von Zugehörigkeitsgraden der Zielkategorie „silikatische Bindigkeit“ als Komponente der Substratsystematischen Einheit ( <sup>1</sup> Abweichung von der KA4/5)

\* Landesamt für Bergbau, Geologie u. Rohstoffe Brandenburg (LBGR), Bereich Geologie, Stahnsdorfer Damm 77, 14532 Kleinmachnow; email: hannemann@lgrb.de

Schwellenwertbereiche	Verbraunung (Bodensystematische Einheit)	
	Kürzel	verbal
$1 \geq \mu \leq 0,8$	BB	Braunerde
$0,8 > \mu \leq 0,6$	XX-BB	z.B. Fährerde-Braunerde
$0,6 > \mu \leq 0,4$	BB-XX	z.B. Braunerde-Fährerde
$0,4 > \mu \leq 0,3$	b4XX-XX	z.B. stark verbrauchter Fährerde-Podsol
$0,3 > \mu \leq 0,2$	b3XX-XX	z.B. mittel verbrauchter Fährerde-Podsol
$0,2 > \mu < 0$	b2XX-XX	z.B. schwach verbrauchter Fährerde-Podsol

Tab.3: Schwellenwertbereiche von Zugehörigkeitsgraden der Zielkategorie „Verbraunung“ für die Ableitung der Bodensystematischen Einheit

### 3.2 Tiefenfunktionsbezogene Aggregation

Die Gruppierung der Zugehörigkeitsebenen nach dem Ähnlichkeitsprinzip (der Pixel) erfordert eine Gewichtung des Merkmals oder der Merkmalsgruppe, die die Arealrayonierung auch teufenbezogen schwerpunktmäßig bestimmen. Die Grundlage dafür bilden die Zugehörigkeits-Tiefenfunktionen der Merkmale. Von den durch diese Funktion aufgespannten Flächen werden die Schwerpunkte berechnet. Die Schwerpunktberechnung kann für einzelne oder mehrere „Merkmalsflächen“ durchgeführt werden, je nach dem welches Merkmal letztlich die Arealrayonierung bestimmt bzw. bestimmen soll. Dazu wird der Wert eines vertikalen Centroidindex verwendet, der das Verhältnis von Zugehörigkeitsgrad ( $\mu$ ) des Merkmals zur Teufe ( $t$  in dm) beschreibt und wie folgt berechnet wird:

$$CI_v = \mu / t$$

Das heißt je höher die Zugehörigkeitswerte in geringer Teufenlage sind, desto stärker wird das Merkmal die Arealrayonierung beeinflussen (Abbildung 1).

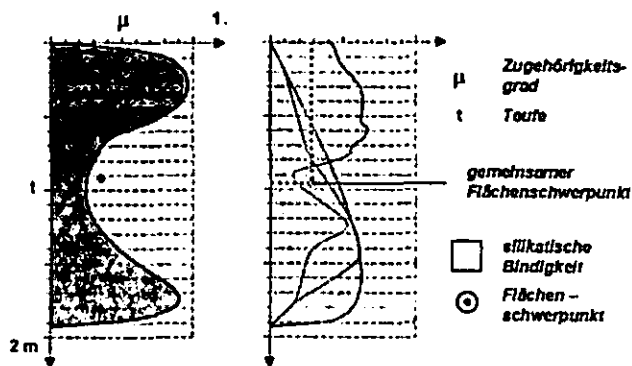


Abb.1: Flächenschwerpunkte eines (hier Bindigkeit) oder einer Merkmalsgruppe (z.B. Bindigkeit, Kalk und Humus)

### 3.3 Unschärfe Clusterung

Die Algorithmen des Fuzzy-Clusterings gehören zu den possibilistischen Clusteranalyseverfahren. Jedem Datum wird ein Zugehörigkeitswert zugeordnet, inwieweit das Datum zum betreffenden Cluster gehört. Es dient der pixelbasierten, unscharfen Ähnlichkeitsanalyse des „Stapels“ der Zugehörigkeitsebenen der Zielkategorien und

erlaubt die Erfassung von Kernbereichen (hohe Zugehörigkeitsgrade) und Übergangszonen (mittlere und geringe Zugehörigkeitsgrade). Problematisch ist hier jedoch die rein inhaltliche Gruppierung, weshalb Verfahren, wie z.B. die Segmentierung, die auch die nachbarschaftliche Ähnlichkeit der Pixel berücksichtigen, als geeigneter eingeschätzt werden.

### 3.4 Segmentierung

Die Segmentierung ist ein Teilgebiet der digitalen Bildverarbeitung. Sie führt zur Erzeugung von inhaltlich-räumlich zusammenhängenden Regionen durch Zusammenfassung benachbarter Pixel oder Voxel entsprechend einem Homogenitätskriterium. Die verwendete Software eCognition® erlaubt dabei eine Gewichtung der eingeladenen, interpolierten Zugehörigkeitsebenen. Dabei werden die Pixel (Voxel, i.w.S. Bodenformen bzw. Horizont-Substrat-Abfolgen) entsprechend ihrer inhaltlichen Ähnlichkeit und räumlichen Nähe zusammengefasst.

### 4. Ausblick

Es werden sämtliche für den Untersuchungsraum zur Verfügung stehenden Informationen verwendet. Das ermöglicht eine hohe inhaltliche und räumliche Datendichte und somit eine fuzzifizierte Informationsverschneidung und die Anwendung von Interpolations- und Gruppierungsverfahren.

Hauptziel der Methode ist die Erfassung der kontinuierlichen Eigenschaften und graduellen Differenzierungen der Bodendecke. Die Ausweisung von Bodenarealen erfolgt dabei unter Berücksichtigung von Kern- und Übergangsbereichen. Hierzu werden Gruppierungsverfahren, die eine inhaltliche und räumliche Ähnlichkeitsanalyse ermöglichen, verwendet.

Bodenareale bilden natürliche Mengen von Bodenformen in bestimmten Inhalt-Raum-Beziehungen. Sie sind deshalb nicht eindeutig, d.h. scharf abgrenzbar. Dafür ist eine Schwerpunktkategorie festzulegen.

Neben der eigentlichen Fachaussage ist die Angabe der Aussagesicherheiten unbedingt erforderlich (hier nicht behandelt).

### 5. Literatur

Ad-hoc-ARBEITSGRUPPE BODEN der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland (2004): Bodenkundliche Kartieranleitung.-5.Auflage; Hannover (im Druck, zitiert als KA5)

eCognition®, <http://www.definiens-imaging.com>

Bemerkung: Der Vortrag zu diesem Artikel ist auf den Internetseiten der DBG veröffentlicht.

## Synthetische Konzeptbodenkarte für das Schwarzerdegebiet in Sachsen-Anhalt

Klaus-Jörg Hartmann\*, Thorsten Behrens\*  
& Thomas Scholten\*

### Veranlassung und Hintergrund

Die bodenkundliche Landesaufnahme befindet sich in dem Dilemma einerseits die Anforderungen an nachvollziehbare, bodenkundliche Informationen für verschiedenartigste Fragestellungen und Planungsmaßstäbe zu erfüllen, andererseits der geringen Verfügbarkeit personeller und materieller Ressourcen, die einer vollständigen Inventur in einem überschaubaren Zeitraum entgegenstehen.

Eine Alternative zur Generierung hochauflösender flächendeckender Bodeninformationen stellt die Erstellung einer digitalen Konzeptbodenkarte unter Verwendung vorliegender Geoinformationen dar, auf deren Grundlage die Ableitung von Kriterien zur Beschreibung von Bodentypengesellschaften (Tab. 1) und ihre Übertragung in die Fläche erfolgt.

Für eine derartige Bearbeitung bietet sich das Schwarzerdegebiet aufgrund seiner naturräumlichen Geschlossenheit und der für diesen Raum vorliegenden Informationsbasis an. Des Weiteren liegen hier für einzelne Bodentypen formalisierbaren Kriterien vor (FORNAÇON ET AL 2002).

Als Grundlage für die Generierung einer solchen funktionalen Bodenkarte dienen:

- digitalem Geländemodell (DGM) mit Höhendaten
- digitale Profilinformatoren
- Informationen zu Gewässern und Wassereinfluss nach BÜK 200,
- Klima (40 m-Raster)
- Nutzung (ATKIS),
- Vorläufige Bodenkarte (VBK) der landwirtschaftlich genutzten Flächen
- Flächendatensätze der VBK
- Informationen des MMK Dokumentationsblattes A
- Klassenzeichen der Bodenschätzung

### Material und Methoden

Die Bearbeitung erfolgt auf Rasterbasis. In diesem Format liegen die Geodatensätze zum Klima und Relief, die eine zentrale Komponente bilden, flächendeckend vor. Eine Konvertierung in Vektoren, die bereits bei der Datenaufbereitung zu Informationsverlusten und räumlichen Unschärfen führen würde, kann somit unterbleiben.

Anhand statistischer Analysen werden die relevanten Faktoren der Bodenbildung identifiziert und anschließend parametrisiert. Hierzu finden die verschiedene Bodeneigenschaften, die Bestandteile der VBK Flächendatensätze sowie die Substratinformationen aus dem MMK Dokumentationsblatt A Verwendung.

Unter Einsatz von Punktdaten aus den Bodenprofilbeschreibungen sollen Aufbereitung mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems und spezieller Algorithmen bodenkundlich relevante Informationsschichten differenziert werden. Aus dem DGM werden hierzu geomorphometrische und geomorphographische Reliefeinheiten berechnet. Darauf auf-

bauend werden weitere Informationsschichten aus den vorliegenden Flächendatensätzen extrahiert, um großräumige Unterschiede und Trends zu erfassen. Die Dokumentationsblätter A der MMK dienen dabei als Informationsquelle für Rückschlüsse auf die Ausgangssubstrate der Bodenbildung. Die Unterscheidung zwischen grundwasser- und stauwasserbeeinflussten Standorten erfolgt anhand der Informationen zu Gewässern und dem Grundwasserstand. Die VBK, ebenso wie die Nutzungsinformationen des ATKIS unterstützen die inhaltliche Verifizierung der aus dem DGM, dem Klimamodell und der MMK abzuleitenden Flächengrenzen.

Die Zusammenführung der berechneten flächenhaften Informationsschichten bildet die Grundlage für eine statistische Auswertung der Bodenprofildatensätze der Profildatenbank SABO\_P hinsichtlich der Bodentypologie und der Extrapolation klassifizierter, diskretisierter Bodengesellschaften auf das gesamte Schwarzerdegebiet des Landes Sachsen-Anhalt. Sowohl die Auswahl geeigneter Parameter aus der Bodenprofildatenbank als auch die Aggregation der punktbezogenen Bodentypangaben erfolgt auf Basis statistischer Verfahren. Das Ergebnis wird einer fachlichen Prüfung unterzogen. Durch Verschneiden der berechneten Informationsschichten werden Raumeinheiten ausgewiesen.

Alle Datensätze mit direkt bodenrelevanten Informationen werden unverändert übernommen. Eine Veränderung der Primärdaten betrifft lediglich die Klassifikation von nominal skalierten Variablen und die Nummerierung von Klassenflächen.

### Erstellung der Synthetischen Konzeptbodenkarte

Auf Basis der flächenhaften Datensätzen sowie statistischer Auswertungen wurde Kriterien zur Beschreibung der Verbreitungssystematik verschiedener Bodentypen ermittelt (Tab. 1) und eine synthetische Konzeptbodenkarte erstellt. Die Legendeinheiten zeigen Bodentypengesellschaften im Sinne von Leitbodentypen in hoher räumlicher Auflösung.

Die Ableitung der räumlichen Verbreitung der Bodentypengesellschaften erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst wird das Untersuchungsgebiet in Bodenlandschaftszonen untergliedert. Eine Unterscheidung erfolgt in Lössgebieten, Auen und lössfreien bzw. stärker reliefierten Bodenlandschaftszonen.

Die Begrenzung der Lössverbreitung erfolgt primär auf Basis von Reliefparametern Bestrahlungsintensität. In Verbindung der Hangneigung und Strahlungsenergie. Bei mindestens 4000 Watt/m<sup>2</sup> Strahlungsenergie gerechnet für den Mittelwert zwischen 21. Juni und 21. Dezember wird für das Untersuchungsgebiet kein Löss mehr ausgewiesen (Tab. 1; C).

Die Ausgrenzung der Auenbereiche erfolgt durch eine Überflutungssimulation (Tab. 1; I). Die ausgehaltenen Flächen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den in der MMK kartierten Verbreitungen.

Die räumliche Abgrenzung zwischen Schwarzerden und Parabraunerden sowie deren Übergangsbildungen innerhalb der Lössgebiete wurden auf Basis der Klimadatensätze und der Profilbeschreibungen abgeleitet.

\* Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, [joerg.hartmann@lagb.mw.lsa-net.de](mailto:joerg.hartmann@lagb.mw.lsa-net.de)

\* Friedrich-Schiller-Universität Jena, Physische Geographie und Bodenkunde, Löbdergraben 32, 07743 Jena

Tab. 1: Kriterien zu Ableitung der Bodentypengesellschaften

	Bodentypengesellschaft	Kriterien
A	RR, BB-RR	<ul style="list-style-type: none"> <li>relative Profilkrümmung &gt; 30</li> </ul>
B	RN, BB-RN, (BB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hangneigung &gt; 4°</li> <li>mittelwert Strahlungsenergie vom 21. Juni bis 21 Dezember &gt; 4000 Watt/m<sup>2</sup></li> <li>kleinflächiges Auftreten</li> </ul>
C	BB, BB-RN, RN-BB, RN	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hangneigung &gt; 4°</li> <li>mittelwert Strahlungsenergie vom 21. Juni bis 21 Dezember &gt; 4000 Watt/m<sup>2</sup></li> </ul>
D	TC, (TT, BB-TC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>500 – 550 mm Jahresniederschlag</li> <li>klimatische Wasserbilanz &lt; -3,4</li> <li>Hangneigung &lt; 1°</li> <li>Carbonatgehalt &lt; 9 dm unter Flur (DOK A MMK)</li> </ul>
E	TT, BB-TT, (TC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>500 – 550 mm Jahresniederschlag</li> <li>klimatische Wasserbilanz &lt; -3,4</li> </ul>
F	TT-LL, LL-TT, BB-TT, (LL, LF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>550 – 600 mm Jahresniederschlag</li> <li>klimatische Wasserbilanz zwischen -3,4 und 31,1</li> </ul>
G	LL, LF, (SS-LL, SS-LF, BB-LL, BB-LF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>klimatische Wasserbilanz &gt; 31,1</li> </ul>
H	YK, GG-YK, GG-TT, GG-LL	<ul style="list-style-type: none"> <li>relative Profilkrümmung &lt; -20</li> </ul>
I	AB, GG-AB, AB-GG, GG, YK, GG-YK	<ul style="list-style-type: none"> <li>Überflutungssimulation, beitragenden Flächen &gt; 160 ha</li> <li>Überflutungshöhe 1,3 m</li> </ul>

Die statistischen Auswertungen der Bodentypenverteilung zeigen deutliche Beziehungen der Böden im Schwarzerdegebiet Sachsen-Anhalts zum heutigen Klima. Die Bodenverbreitung in Relation zur Klimatischen Wasserbilanz (KWB) zeigt mit wenigen Ausnahmen, dass Schwarzerden und Kalkschwarzerden in Sachsen-Anhalt ausschließlich in Gebieten mit negativer klimatischer Wasserbilanz auftreten (FORNAÇON 2000; ALTERMANN & KÜHN, 1995). Bei Niederschlägen von 500 bis 550 mm/a dominieren Braunerde-Schwarzerden, zwischen 550 und 600 mm Jahresniederschlag und deutlich positiver klimatischer Wasserbilanz entwickelten sich Parabraunerde-Schwarzerden (GEHRT, 2000).

Basierend auf dem Prozesssystem der Abtragung und Ablagerung werden innerhalb der Lössgebiete (Para)Rendzinen und kolluvial geprägte Böden differenziert. Hierzu dient der Parameter Relative Profil Krümmung der digitalen Reliefanalyse (Tab 1. A, H). Als Grundlage für Substratinformationen dienen Bodenart und Entstehung im Klassenzeichen der Bodenschätzung, denen Boden- und Grobbodenartenhauptgruppen zugeordnet wurden (Tab. 2). Auf diese Weise entstehen Substratarten-Hauptgruppen.

Tab. 2: Grundlagen der Substratinformationen

	D	Al	Lö	V
S	(v) s	s		
SI	(v) s	s		
SL	(v) s	(v) l	u	(v) l
sL	(v) u	l	u	(v) u
L	l	u	u	(v) u
LT	l	l		u
T	t	t		t

**Zusammenfassung und Ausblick**

Für das Betrachtungsgebiet ergeben sich neun bodensystematische Legendeneinheiten. Die Ableitung von Kriterien für die Bodentypengesellschaften

basiert auf den kartierten Informationen der Bodenprofile in Bezug zu

- aus gemessenen Niederschlags- und Temperaturdaten abgeleiteten Informationen zum Klima,
  - lithologischen Informationen der MMK,
  - aus dem DGM abgeleiteten Reliefparametern.
- Der modulare Aufbau in Form einzelner Informationsebenen erlaubt die Verfeinerung und Erweiterung der vorliegenden Legendeneinheiten durch
- Modifizierung des Zuordnungsschlüssels
  - Einbeziehung weiterer geomorphometrischer Parameter,
  - Ergänzung um andere Geobasisdaten.

Eine derartige Erweiterung ermöglicht den Schritt von bodensystematisch geprägten Bodentypengesellschaften zu Bodenformengesellschaften mit Substratinformationen. Diesen Legendeneinheiten können bodenkundlich parametrisierte Flächen Datensätzen zugewiesen werden. Hierbei ist eine, über den Ansatz der Tab. 2 hinausgehende, Differenzierung möglich und anzustreben.

**Quellen**

ALTERMANN, M., KÜHN, D. (1995): Böden, Bodennutzung und Bodenschutz im mitteldeutschen Trockengebiet – am Beispiel der Querfurter Platte. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* 77: 229-278.

FORNAÇON, C. HARTMANN, K.-J. SRUGIES, A. (2002): Zur standortkundlichen Kennzeichnung von Bodentypen in Landschaften des Schwarzerdegebietes, *Hallesches Jahrb. Geowiss.* 24, S 89-96

GEHRT, E. (2000): Nord- und mitteldeutsche Lössböden und Sandlössgebiete. *Handbuch der Bodenkunde* 9. Erg. Lfg. 10/2000: 1-53.xv

SCHOLTEN, T., BEHRENS, T., HARTMANN, K.-J., GOLDSCHMIDT, M., SPIEB, D. (2003): Synthetische Bodenkarten als Grundlage für die Bereitstellung planungsrelevanter Informationen, *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.*, 102/2, 569-570

# Strukturierung von kontinuierlichen Rasterdaten mithilfe eines regionenbasierten Segmentierungsalgorithmus

Matthias Heinrich<sup>a</sup> und Markus Möller<sup>b</sup>

## 1. EINLEITUNG

Bodenkonturen als Träger von Bodeninformationen sind für eine Vielzahl planungsrelevanter Fragestellungen von besonderer Bedeutung (z.B. Bodenkartierung, Bodenfunktionsbewertung). Zur Abgrenzung von Bodenkonturen werden im zunehmenden Maße regionenbasierte Segmentierungsverfahren eingesetzt, die zu einer Strukturierung kontinuierlicher Flächendaten in homogene Flächenobjekte führen.

Das Ziel des Beitrages ist die Anpassung des frei verfügbaren Segmentierungsansatzes IVHG (Friedrich, 1996), dass speziell für bodenkundliche Fragestellungen entwickelt wurde.

### 1.1. Regionenbasierte Segmentierungsverfahren

Regionenbasierte Segmentierungsverfahren berücksichtigen bei der Objektbildung sowohl die n-Dimensionalität des Merkmalsraumes als auch die unmittelbare räumliche Nachbarschaft von Rasterzellen. Dabei wird typischerweise von einzelnen Rasterzellen (seed pixel) ausgegangen. Sie bilden die Kristallisationspunkte für ein iteratives Regionenwachstum, das solange andauert, bis bestimmte Abbruchbedingungen erfüllt sind. Als Abbruchkriterien dienen definierte Heterogenitätsbedingungen (z.B. Varianz) sowie Zwänge, die das Regionenwachstum stoppen (z.B. Anstoßen an eine andere Regionengrenze oder vom Nutzer vorgegebene Grenze) (Fortin et al., 2000; Muñoz et al., 2003) (Abb. 1).

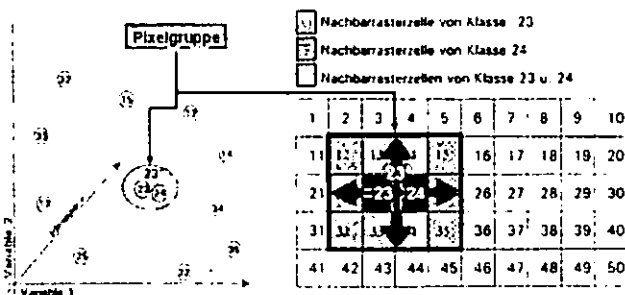


Abb. 1: Prinzip regionenbasierter Segmentierungsansätze (nach Friedrich, 1996, verändert). Die Rasterzelle 23 fungiert als Kristallisationspunkt, an die die Rasterzelle 24 gruppiert wird. Das neue Segment (23, 24) wird anschließend in das Segment 23 überführt, das als neues Kristallisationssegment für die Rasterzellen 12, 13, 14, 15, 22, 25, 32, 33, 34 und 35 dient.

<sup>a</sup>Westfälische Hochschule Zwickau (FH), Fachbereich Physikalische Technik/Informatik, Fachgruppe Informatik, Dr.-Friedrichs-Ring, 2a, 08056 Zwickau, E-mail: matthias.heinrich@ufz.de, Telefon: ++49 (0) 341 2352586

<sup>b</sup>Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle, Department Angewandte Landschaftsökologie, Permoserstr. 15, 04318 Leipzig, E-mail: markus.moeller@ufz.de, Telefon: ++49 (0) 341 2352556

## 1.2. IVHG

Das Programm IVHG nutzt als Abbruchkriterium das Merkmal 'Regionenanzahl'. Das Abbruchkriterium kann durch die Gleichung (1) ausgedrückt werden. Da hier ein Bottom-Up-Ansatz vorliegt und somit zunächst jede Rasterzelle als Region betrachtet wird, werden hier die Anzahl der Regionen  $K$  zu der Anzahl der Rasterzellen  $M$  in Relation gesetzt. Dadurch ergibt sich der Generalisierungsgrad bezüglich des geometrischen Raums, der sich im Intervall  $[0,1]$  abbilden läßt.

$$G_S = \frac{M - K}{M}, G_S \in [0, 1] \quad (1)$$

## 2. ANSATZ

Da  $G_S$  nicht die tatsächlichen Eigenschaften der Eingangsdaten berücksichtigt, wurde das folgende Maß entwickelt:

$$G_M = \frac{ed}{ed - \sum \sigma_d}, G_M \in [0, 1] \quad (2)$$

Das Hauptaugenmerk liegt hier darin, die Dateneigenschaften, insbesondere die globale Homogenität zu berücksichtigen. In das neu eingeführte Abbruchkriterium fließt deshalb die Ähnlichkeit der Rasterzellen im n-dimensionalen Merkmalsraum in Form der euklidischen Distanz  $ed$  (Abstand von Punkten im Raum) mit ein. Diese kann als Abstand bzw. Ähnlichkeit der Rasterzellen bzgl. ihrer Merkmale gesehen werden. Um sie als Abbruchbedingung zu verwenden, wird sie zur Standardabweichung  $\sigma$  der Eingangsdaten (Maß für die Heterogenität) ins Verhältnis gesetzt. Damit ist ein Maß für die Generalisierung hinsichtlich der Merkmale gegeben, welches sich ebenfalls im Intervall  $[0,1]$  abbilden läßt.

Anhand der Gegenüberstellung des Verhaltens der beiden Generalisierungsgrade soll der Vorteil des neu eingeführten Maßes  $G_M$  dargelegt werden. In der Abbildung 2 wurden die Generalisierungsgrade auf die erzeugten Regionen aufgetragen:

- Für  $G_S$  ergibt sich demnach ein linearer Verlauf, der unabhängig von den Daten immer linear sein wird.
- $G_M$  verhält sich dagegen eher entsprechend den Dateneigenschaften, da dieser die euklidische Distanz berücksichtigt. Der flache Verlauf bei einer hohen Regionenanzahl deutet auf relativ homogene Daten hin, welche grundsätzlich zusammen gefasst werden können. Somit greift  $G_M$  erst da ein, wo die Homogenität signifikant steigt und die Regionen untereinander heterogener werden.

Die Verwendung des Intervalls  $[0,1]$  hat den Vorteil, das die Freiheitsgrade für den Benutzer eingeschränkt

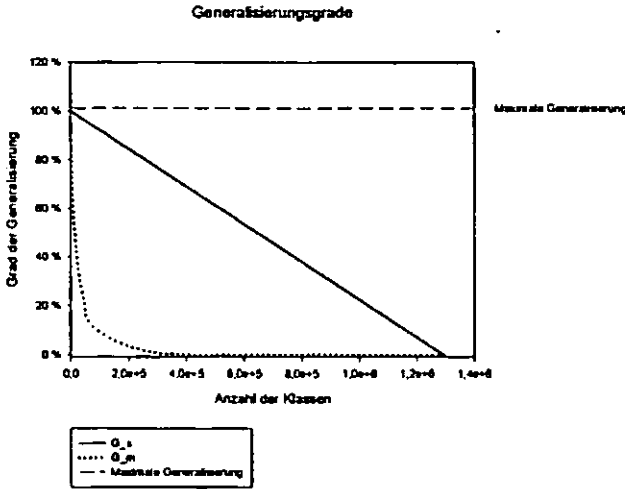


Abb. 2: Gegenüberstellung der Generalisierungsgrade

werden. Dadurch ist die Entscheidung des Nutzers hinsichtlich des Abbruchkriteriums datenunabhängig und damit vergleichbar. Zum anderen besteht dadurch die Möglichkeit, die Abbruchkriterien  $G_S$  und  $G_M$  zu kombinieren. Eine mögliche Kombination sieht wie folgt aus:

$$G = w_S \times G_S + w_M \times G_M, \quad (3)$$

$$w_S \in [0, 1],$$

$$w_M \in [0, 1],$$

$$w_S + w_M = 1$$

Dem Anwender steht es somit frei, mit Hilfe der Gewichte  $w_S$  und  $w_M$  das Regionenwachstum durch beide Generalisierungsgrade zu steuern.

### 3. AUSBLICK

Das Augenmerk lag bislang auf globalen Eigenschaften zur Steuerung des Regionenwachstums, allerdings ist deren Einfluss begrenzt. Es scheint daher sinnvoll, Objekteigenschaften (z.B. Homogenität, Form usw. der Regionen) als Steuerparameter zu verwenden. Weiterhin wird angestrebt, den Rechenaufwand zu minimieren (Speicherbedarf) und die Ergebnisausgabe nutzerfreundlicher zu gestalten.

Zukünftig soll das Programm auf kontinuierliche Rasterdaten (Fernerkundungs- und Satellitenbilder) insbesondere zur Detektion von Senkenbereichen und Acker-schlägen angewendet werden.

Der Algorithmus wurde als C++ Programm nach der GNU GPL und somit als Open Source Projekt umgesetzt. Das Verfahren ist somit frei verfügbar. Außerdem bietet Open Source die Möglichkeit, das Verfahren kostengünstig weiter zu entwickeln. Er liegt als Quellcode vor und ist Betriebssystem-unabhängig.

### Literatur

Fortin, M.-J., Olson, R., Ferson, S., Iverson, L., Hunsaker, C., Edwards, G., Levine, D., Butera, K., & Klemas, V. (2000). Issues related to the detection of boundaries. *Landscape Ecology*, 15, 453-466.

Friedrich, K. (1996). Digitale reliefgliederungsverfahren zur ableitung bodenkundlich relevanter flächeneinheiten. *Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie D*, 21. Dissertation, Universität Frankfurt.

Muñoz, X., Freixenet, J., Cufí, X., & Martí, J. (2003). Strategies for image segmentation combining region and boundary information. *Pattern Recognition Letters*, 24, 375-392.

## **Nutzung von Fern- und Naherkundungsverfahren insbesondere EM38 zur Ableitung räumlich kontinuierlicher Bodendaten auf der Feldskala**

*Herrmann, L<sup>1</sup>, M. Sommer<sup>2</sup>, B. Schutte<sup>3</sup>, M. Wehrhan<sup>2</sup>, S. Graeff<sup>4</sup>, M. Zipprich<sup>5</sup>*

### **Einleitung**

Karten der Verbreitung von Bodentypen und Bodeneigenschaften beruhen i.d.R. auf Punktdaten, die über verschiedene Verfahren interpoliert werden. Jedes Verfahren der Interpolation birgt seine eigenen Fehlerquellen. Daher ist es seit jeher der Traum des Bodenkundlers räumlich kontinuierliche Datensätze zu erhalten, um nicht auf Interpolationsverfahren angewiesen zu sein.

Mittlerweile gibt es eine Reihe von nicht invasiven Fern- und Naherkundungsverfahren um solch kontinuierliche Datensätze über Bodeneigenschaften zu gewinnen. Dabei haben Fernerkundungsverfahren (bis auf radargestützte) den Nachteil nur Bodenoberflächeneigenschaften abbilden zu können, die nicht zwangsläufig mit Unterbodeneigenschaften korrelieren müssen. Naherkundungsverfahren wie z.B. Georadar oder elektromagnetische Induktion können zwar Informationen über größere Tiefe gewinnen, allerdings ist die Signalfunktion, d.h. die Intensität des Signalanteils aus unterschiedlichen Tiefen, standortabhängig.

### **Methoden und Standort**

Da die unterschiedlichen Ansätze der Nah- und Fernerkundung auch einen unterschiedlichen Kosten- und Arbeitsaufwand bedeuten, wurde in einem multidisziplinären Ansatz versucht, Informationen über die Redundanz bzw. positiv ausgedrückt, die Korrelierbarkeit von Datensätzen, die durch unterschiedliche Verfahren erfaßt werden, zu gewinnen.

In den Vergleich gingen multispektrale Fernerkundung, EM38 - Messungen, maschinenbasierte Zugkraft- und Kraftstoffverbrauchs-

erfassung und traditionelle Bohrstockkartierung ein. Als Experimentierfeld diente der als überdurchschnittlich heterogen bekannte Schlag Mohren auf der Versuchsstation Ihinger Hof der Universität Hohenheim. Petrographisch können pleistozäner Löß und Ton-, Mergel- und Kalksteine des Lettenkeupers (ku) als Ausgangsgestein für die Bodenbildung unterschieden werden. Das Relief ist im südlichen Teil des Feldes flach, gewinnt aber nach NW deutlich an Steilheit.

### **Vergleich von Basisinformationen und eigenen Ergebnissen**

Als bodenkundliche Basisinformationen dienten die Daten der Reichsbodenschätzung, die eine Nord-Süd-Abfolge der Bodeneigenschaften (Bodenart, Zustandsstufe) zeigen (Abb. 1a) und eine konventionelle Bodenkarte aus den frühen 80er Jahren (Abb. 1b). Letztere weist von West nach Ost eine Abfolge von Pseudogley über Pseudogley-Pelosol zu Braunerde-Pelosol und Parabraunerde aus.

Im Gegensatz zu den Basisinformationen zeigen die Daten aus den eingesetzten Fern- und Naherkundungsverfahren eine wesentlich höhere Differenzierung. Insbesondere der aus den Fernerkundungsdaten abgeleitete Blattflächenindex, der die Vitalität des Pflanzenbestandes widerspiegelt, lässt sich gut mit dem aus der Bohrstockkartierung abgeschätzten Wurzelraum korrelieren ( $r^2=0.80$ ).

Da die Gründigkeit in diesem Fall im wesentlichen die Entwicklungstiefe der Böden widerspiegelt und diese wiederum mit der Klassifikation korreliert ist, können in diesem Fall auch Bodentypen bzw. Bodenformenassoziationen hinreichend genau gegeneinander abgegrenzt werden. Dabei repräsentieren die zentralen Bereiche Pelosole aus ku und die randlichen Braunerden bzw. Parabraunerden (O) bzw. Pseudogleye und Kolluvisole aus Löß (W). Die Grenze zwischen den Bodeneinheiten indiziert also gleichzeitig eine der Petrographie. Diese Differenzierung war mit den EM38-Messungen nicht möglich, da die Signalinformation zwischen kalkhaltigen und kalkfreien Bereichen differiert (Tabelle 1). In der kalkhaltigen Gruppe bestimmt eindeutig die Kalkmenge (nicht die Konzentration!) über die Profiltiefe das Signal. In der kalkfreien wurde die höchste Korrelation mit der tiefengewichteten Tonmenge erzielt. Dabei wurde

<sup>1</sup> Institut für Bodenkunde und Standortslehre (310), Universität Hohenheim, Stuttgart  
[herrmann@uni-hohenheim.de](mailto:herrmann@uni-hohenheim.de)

<sup>2</sup> Institut für Bodenlandschaftsforschung. ZALF. Münchenberg

<sup>3</sup> Institut für Agrartechnik (440). Universität Hohenheim

<sup>4</sup> Institut für Pflanzenproduktion und Grünland (340), Universität Hohenheim

<sup>5</sup> Institut für Biomathematik und Biometrie. GSF, Neuherberg.



nicht die vom Hersteller vorgegebene Signalfunktion eingesetzt sondern eine progressiv abnehmende (Potenzfunktion  $ax^{-0,002}$ ), die primär über die Horizontabfolge (als Indikator für Lagerungsdichte und Tonkonzentration) abgeschätzt wurde.

**Tabelle 1** : Korrelation (Bestimmtheitsmaß  $r^2$ ) des EM38-Signals mit Bodenparametern

	EM38 alle	EM38 kalkhaltig	EM38 kalkfrei
	n=16	n=10	n=6
Tonmenge 1m	0,10	0,03	0,04
Tonmenge 1m progress.	0,22	0,06	0,49
Tonmenge orig. Signalfkt.	0,09	0,25	0,13
Kalkmenge	0,64	0,76	
Kalkmenge orig. Signalfkt.	0,49	0,51	
Restwasser	0,31	0,57	0,00
nFK	0,13	0,06	0,48

**Fazit**

Das vorläufige Fazit der Untersuchungen ist, daß nicht nur nicht invasive Nah- sondern auch indirekte Fernerkundungsverfahren – in diesem Falle über Pflanzen als integrierende Indikatoren für den Wasserhaushalt - ein Potenzial zur

Erfassung räumlich kontinuierlicher Bodendaten haben, die nicht nur für die Oberfläche gelten, sondern auch die Bodentiefe erschließen.

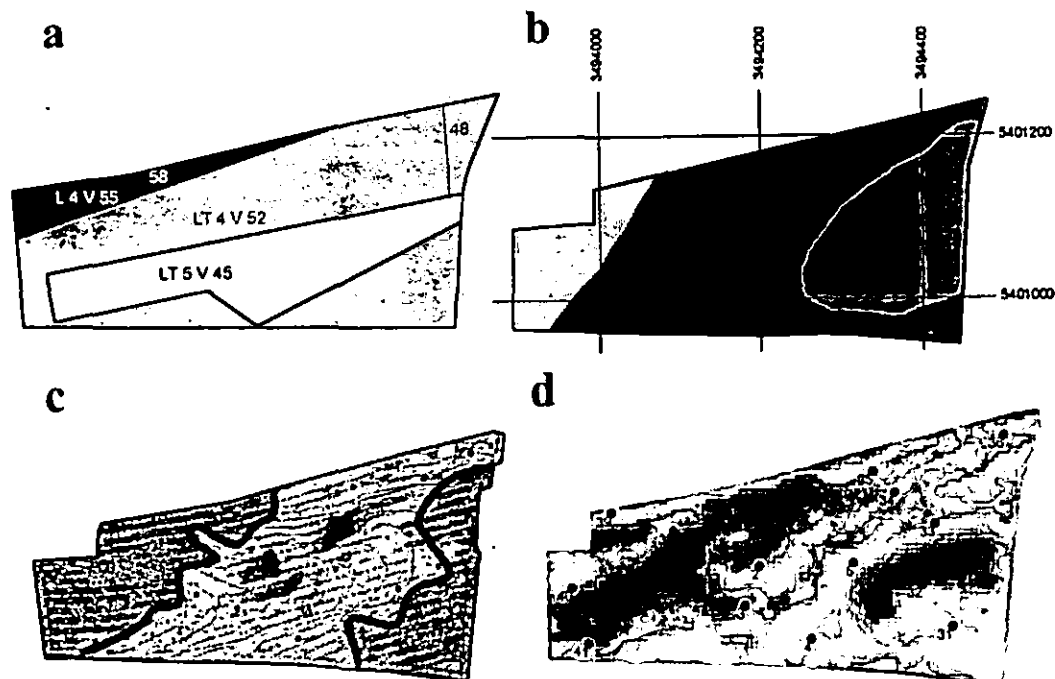
Speziell für das EM38-Naherkundungsverfahren gilt, daß es eine Reihe von Einflußfaktoren auf das Signal gibt – in unserem Falle insbesondere die Kalkmenge über die Profiltiefe – die bekannt sein müßten, um das Signal interpretieren zu können. Die Untersuchungen zeigen, daß die von Firmenseite vorgeschlagene Signaltiefenfunktion im Einzelfall angepaßt werden muß. Damit wird die Interpretation von EM38-Datensätzen in petrographisch heterogenen Landschaften ohne analytische Unterstützung schwierig.

Ein hohes Potential zur Erfassung von Oberbodeneigenschaften haben aber schlepperbasierte Verfahren, wie z.B. die Zugkraft- oder Kraftstofffassung, die eine hohe Korrelation mit der Tonkonzentration aufweisen ( $r^2 \sim 0,8$ , Schutte et al. 2004). Mit solchen Verfahren, die sich preiswert auf jedem modernen Schlepper installieren lassen, könnten jährlich pro Schlepper hochauflösende Informationen von mehreren hundert Hektar bereitgestellt werden.

**Literatur**

Schutte, B., L. Herrmann, M. Schreiber & H. D. Kutzbach (2004): Die Kartierung des Kraftstoffverbrauchs. Zusätzliche Informationsgrundlage für den präzisen Ackerbau. Agricultural Engineering 59/3: 152-153.

**Abbildung 1** : Basisinformationen und Muster der Nah- und Fernerkundungsergebnisse zum Schlag Mohren: a. Reichsbodenschätzung, b. Bodenkarte 1982, c. Fernerkundung (VIS + NIR, Pflanzenbestand), d. Naherkundung EM 38



## Substrat-Horizont-Gruppen Bausteine für Bodeneinheiten

W. Kainz<sup>1</sup>

Die Verallgemeinerung von Bodenprofilen zur Kennzeichnung von Kartierungseinheiten oder Landschaften, die Extrapolation von Bodenprofilen in Bereiche ungenügenden Kenntnisstandes sowie die Vorhersage von Bodeneigenschaften und Bodenveränderungen ist ein Problem, das noch nicht umfassend und endgültig gelöst ist. Fehlende Daten, sowohl in der Dichte der untersuchten Punkte als auch in der vorhandenen Analytik sind ein permanentes Problem in der Kartierung und Auswertung.

Ein Lösungsansatz hierzu ist die Ableitung von verallgemeinerten Substrat-Horizont-Gruppen (SHG) und ihre Anwendung in modellierten Bodenprofilen. Substrat-Horizont-Gruppen wurden schon früher verwendet, um die relativ weiten Parameterfelder der Bodenhorizonte durch die Bodensubstrate einzugrenzen und die dadurch erzielten Aussagen zu präzisieren. Hier wird eine Methodik zur Ableitung und Definition der Substrat-Horizont-Gruppen vorgestellt.

Die Methodik basiert auf den Lagen der Bodenprofile. Sie sind das Ergebnis der Wechselwirkung sedimentologischer und pedologischer Prozesse (KAINZ, WANSA 1997). Sedimentologische Gesetzmäßigkeiten bestimmen sowohl die großräumige Verbreitung als auch die kleinräumige Variation der Lockergesteine bzw. Bodensubstrate. An sie ist der überwiegende Anteil der Bodeneigenschaften geknüpft. Sedimentologische Gesetzmäßigkeiten verbinden die SHG in der Fläche. Die pedologischen Prozesse haben ebenfalls einen regionalen Wirkungsbereich, basierend auf der Klimaentwicklung. Sie wirken aber in ihrer Art und im Grad ihrer Ausbildung räumlich differenzierter und in Abhängigkeit von den Bodensubstraten. Pedologische Prozesse verbinden die SHG im Profil.

Die Analyse und Kenntnis dieser Gesetzmäßigkeiten und Prozesse begründen die Auswahl der SHG und ihre räumlichen Gültigkeitsbereiche.

Wohldefinierte Substrate und Horizonte, ihre Gruppierung und wiedererkennbare Abgrenzung sind die wesentliche Grundlage der Methode. Darüber hinaus kann die Aufgabenstellung die Gruppierung der Substrate und Horizonte wesentlich beeinflussen. Im vorliegenden Fall wird ein Ansatz zur allgemei-

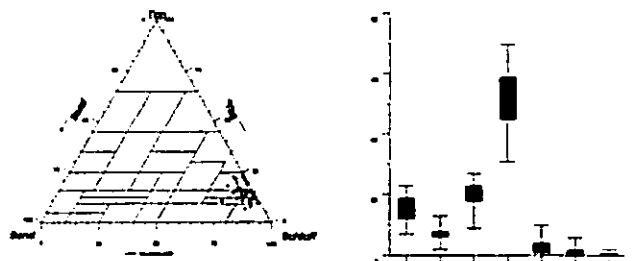
nen Anwendung in mittleren Maßstabsebenen vorgestellt.

Eigenschaften und Gültigkeitsbereiche bilden eine für die Anwendung wichtige Einheit. Böden und Bodenlandschaften haben gleiche Eigenschaften (KAINZ 1999). Sie beruhen auf den Bodensubstraten und den Bodenhorizonten. Bildungsbereich, Lage im Profil, Art des Gesteins sind substratgebundene Eigenschaften. Nutzung, Vegetation, Bodenwasser prägen die Eigenschaften der Horizonte. Daraus ergeben sich Abhängigkeiten der SHG zu Bodenlandschaften, anstehenden Gesteinen, Reliefpositionen, Nutzung u.a., die in ihrer Verschneidung Gültigkeitsbereichen unterschiedlicher Ordnung entsprechen. Deshalb muss bei der Bildung und Definition der SHG ihre Bindung und ihr Aussagewert für die zu betrachtenden Gültigkeitsbereiche geprüft werden.

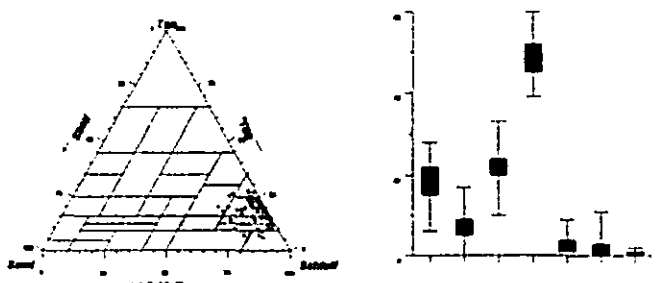
Die Definition der Substratgruppen erfolgt durch die Kennzeichnung der Einzelsubstrate in den Profilen, den Vergleich der Grundparameter der so als gleich gekennzeichneten Substrate unterschiedlicher Profile und ihre Überführung in eine 'Normalform'.

Die Kennzeichnung der Einzelsubstrate in den Profilen erfolgt nach den Regeln der Substratkennzeichnung in Verschneidung mit bestehenden Definitionen der Lockergesteine, nach praktischen Erfahrungen und Anspruchsregeln der Kartierung.

Die so beschriebenen Substrate wurden auf Zusammengehörigkeit überprüft. Dazu wurden Bodenart, Verteilung der Kornfraktionen, Grobschluffanteil, Skelettart, Gefüge und ihre Variationen verglichen. Es zeigen sich z. B. Unterschiede zwischen kalkhaltigem Löss, p-eu(Lo):

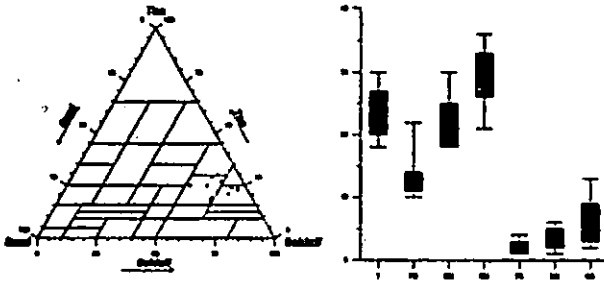


entkalktem Löss, p-u(Lo):



<sup>1</sup> W. Kainz, L.-Amt für Geologie und Bergwesen  
Sachsen-Anhalt, PSF 156, 06035 Halle,  
e-mail: kainz@lagb.mw.lsa-net.de

und Hanglösslehm, p-(v)tu(^tsf+Lol):



Die Bildung der Normalform erfolgte mit einer Anfangsmenge von Substrat-Horizont-Kombinationen aus landesweit verteilten, landschafts- und nutzungsrepräsentativen Bodenprofilen. In die Definition der Normalform wurde das Ausgangsgestein, das Substrat aus der gemittelten Bodenart, die Substratvariation und die räumliche Bindung einbezogen. Sie dient dem Unterdrücken punktueller zufälliger Besonderheiten in der Probe oder dem Profil, wie z. B. des über Norm liegenden Skelettgehaltes in einer Löss-Probe im Bereich der Steinsohle: aus p-(w)u(Lo) wird p-u(Lo) oder des Sandgehaltes im Geschiebelehm, wenn Normallehme und Sandlehm nicht unterschieden werden, aus g-(k)sl(Lg) wird g-(k)l(Lg). Die Normalform gewährleistet das einheitliche Auswahlkriterium für die entsprechenden Objektgruppen.

Auf die Definition der Horizontgruppen haben die Auswertungsziele Einfluss. Für den genannten Anwendungsbereich soll das Subtyp-Niveau der Bodenansprache erreicht werden, landschaftstypische Besonderheiten der Bodenentwicklung sollen sichtbar und Nutzungsänderungen im Oberboden sollen untersucht werden. Tabelle 1 zeigt einen Ausschnitt der Zuordnungstabelle mit unterschiedlich starker Gruppierungen der Horizonte:

HORIZONT	BoHoGr	BoHoKl	BoHoAbt
Ash	Ash	Ash	Oberboden
Ash+Bs-Sd	Bs-Sd	Sd	Unterboden
Ash+Bs-Srd	Bs-Srd	Sd	Unterboden
Ash+Bv-Sw	Bv-Sw	Sw	Unterboden
Ash+Sd-Bt	Sd-Bt	Bt	Unterboden
Ash-Bv-Ah	rAp <sup>+</sup> Bv-Ah	Ah	Oberboden
Ash+eCc	Ash+eCc	Cc	Untergrund
Ash-Bv	Ash-Bv	Bv	Unterboden
Bsh+eCv	Bsh+eCv	Cv	Untergrund
(Ash+Bv <sup>+</sup> Ash+eCg	Ash+eCg	Scg	Unterboden
(Ash <sup>+</sup> Ash	(Ash <sup>+</sup> Ash	aAh	Oberboden
(Ash <sup>+</sup> Cc	(Ash <sup>+</sup> Cc	Cc	Untergrund
(Bv <sup>+</sup> Srd	(Bv <sup>+</sup> Srd	Sd	Unterboden
(Bv <sup>+</sup> eCc	(Bv <sup>+</sup> eCc	Cc	Untergrund
(Fv <sup>+</sup> Go	(Fv <sup>+</sup> Go	Go	Grundwasserhorizonte
(Cv <sup>+</sup> Sd	(Cv <sup>+</sup> Sd	Sd	Unterboden
rAp	rAp	Ap	Oberboden

Die realen Kürzel der Horizonte in den Einzelprofilen wurden so gruppiert, dass Übergangs- und Mischhorizonte erhalten sind, ebenso wie typische Kombinationen mit fossilen Horizonten aber auch reliktsche Acker- oder Torfhorizonte. Zur besseren Lesbarkeit wurden die Horizontkürzel auf den pedologischen Inhalt beschränkt.

Die Gruppierung der SHG erfolgte nach

- dem Landschaftsraum auf der Basis der Bodenregionen (7 Gruppen)
- der Fazies, gegliedert in Hochflächen, Niederungen und Auen (3 Gruppen)
- der Lage im Profil, wie z. B. holozäne Flugsande oder periglaziäre Decklagen (19 Gruppen)
- den Substratgruppen (391 Gruppen)
- den Hauptnutzungsarten Forst, Grünland, Ackerbau (3 Gruppen)
- den Horizontgruppen (212 Gruppen)

Die SHG haben, wie die Bodenlandschaften, beständige und veränderliche Eigenschaften. Entsprechend ihrer Art und Grundmenge werden die Eigenschaften einzeln oder in Gruppen statistisch untersucht und den SHG oder nur den Substratgruppen zugeordnet. Dabei hat sich gezeigt, dass das über die Mächtigkeit gewogene arithmetische Mittel gut reproduzierbare Werte und vollständige Korngrößenanalysen wiedergibt. Die aus dieser Auswertung berechnete Bodenart entspricht der nach dem fünfzigsten Perzentil berechneten. Diese Bearbeitung ist automatisiert und dadurch dynamisch.

In Sachsen-Anhalt liefert ein landesweites Untersuchungsprogramm landschafts- und nutzungsrepräsentative Bodenschürfe. Die bis jetzt in diesem Rahmen definierten SHG erfassen schätzungsweise 70% der Substratgruppen in Sachsen-Anhalt. Die Horizontvariation ist fast vollständig belegt. Von den ausgegliederten SHG erwiesen sich 20% als in den Grundparametern mehrfach belegt. Dies ist auf die noch nicht abgeschlossenen Arbeiten zurückzuführen. Ein weiterer Zuwachs wird aus der Nachbearbeitung gut dokumentierter und analysierter Altdaten erwartet. - Es gibt aber auch eine Reihe von SHG, die aufgrund der natürlichen Verhältnisse selten sind und in ihrer Belegung niedrig bleiben werden.

Im Ergebnis entstehen Bausteine für die Bodenformen-Modellierung mit einem aktuellen und erweiterbaren Satz von Eigenschaften und definierten Bereichen, in denen diese Bausteine angewendet werden können. Sie sind weiterhin ein hilfreiches Werkzeug bei der Auswertung der Altdaten und in der Bodenkartierung.

**Literatur**

KAINZ, W. (1999): Die Bodenlandschaften und Böden. - 33 S., 22Abb., 8 Tab., 1Kt. - In: KAINZ, W., STRING, P., WELLER, M., HARTMANN, K.-J., KNAUF, C., MÖBES, A., & FELDHAUS, D. (1999): Bodenatlas Sachsen-Anhalt, Teil I. - Halle(GLA).

KAINZ, W. & WANSA, S. (1997): A new paleosol sequence near Hedersleben - luvisols in Saalian to Weichselian sediments (Eastern forelands of the Harz mountains. - (<http://fadr.msu.ru/inqua/nl-15/abstracts.html>)

## Ableitung einer flächendeckenden Bodenkarte des Landes Brandenburg im mittelmaßstäbigen Bereich

Joachim Kiesel<sup>1</sup>, Detlef Deumlich,<sup>2</sup> Jürgen Thiere<sup>2</sup>,  
Gerd Lutze<sup>1</sup>

### Aufgabenstellung

Die Mittelmaßstäbige landwirtschaftliche Standortkartierung (MMK, Lieberoth et al. 1983) im Bereich der 5 Neuen Bundesländer wird mit ihren Datensätzen häufig als Basis für verschiedenste Modellierungsaufgaben verwendet (Biotoppotentiale, Wasserrahmenrichtlinie, C-Sequestrierung...). Da diese Kartierung nur landwirtschaftlich genutzte Flächen abdeckt, mussten bislang Annahmen für die nicht kartierten Flächen getroffen oder Informationen aus Karten kleineren Maßstabs (BÜK200/300) verwendet werden.

Ziel war deshalb, eine digitale Kartenbasis im einheitlichen mittleren Maßstab ohne „Splitterflächen“ zu schaffen. Um den Aufwand zu begrenzen, schied eine Neukartierung a priori aus. Unter Verwendung relevanter digitaler Karten sollte die MMK in die „weißen“ Flächen bei möglichst guter Genauigkeit extrapoliert werden. Die Basis-Informationen für die MMK-Konturen sollten erhalten bleiben und differenziert für die restlichen Flächen Daten in der Qualität einer „Konzeptbodenkarte“ mit Ausweis der Qualität der zugeordneten Information erzeugt werden.



### Methoden und Realisierung

Ausgangspunkt der Überlegungen, war eine Analyse der Anteile von agrarisch und forstlich

genutzten Flächen. Auf der Basis von CORINE-Landcover ergab sich ein Acker- und Grünlandanteil von 53% sowie ein Waldanteil von 36% an der Landesfläche. Somit war es naheliegend, die MMK auf die Nicht-MMK-Flächen zu extrapolieren, anstatt von der Forstlichen Standortkartierung (Waldbodenkarte) nach Kopp auszugehen. Diese Entscheidung wurde zusätzlich dadurch unterstützt, dass für die MMK zahlreiche verifizierte Parametersätze als Ausgangspunkt für Modellanwendungen vorliegen.

Die grundlegende Überlegung für eine GIS-gestützte Extrapolation der MMK ist die Annahme, dass sich die heutige Feld-/Waldverteilung hauptsächlich als Ergebnis der geologischen und morphologischen Vorprägung der Landschaft herausgebildet hat. Die Analyse zeigt, dass Ackerland auf den Grundmoränen, Grünland auf den Moorstandorten und Wald auf Sanderflächen dominiert. Somit finden wir Wald nicht wahllos in der Fläche verstreut, sondern hauptsächlich in bestimmten Kombinationen von geomorphologischen Standortfaktoren, aber nicht nur dort.

Davon ausgehend kann mit einem statistischen Modell analysiert werden, bei welcher konkreten Kombination der Standortfaktoren Geologie (als Geologische Übersichtskarte 1: 300 000) und Relief (als abgeleitete Reliefparameter aus dem DGM 25) welche MMK-Einheiten auftreten. Im Idealfall tritt innerhalb einer diskreten Kombination von Standortfaktoren nur eine bestimmte MMK-Einheit auf; in der Realität wird man ein Spektrum von MMK-Einheiten finden. Stets wird jedoch die dominierende MMK-Einheit unter jeder Kombination von Standortfaktoren herangezogen, um sie auf die Nicht-MMK-Flächen derselben Kombination zu übertragen. Rein formal funktioniert das in jedem Falle, sofern überhaupt MMK-Informationen unter den Flächen vorzufinden sind, die einer bestimmten Kombination von Standortfaktoren entsprechen. Allerdings kann die Qualität im Ergebnis dieser Herangehensweise sehr verschieden sein. Über die Qualitätsparameter Dominanzgrad, Kontrast und Flächenverhältnis können räumlich verteilte Darstellungen generiert werden, die eine differenzierte Bewertung des Extrapolationsergebnisses ermöglichen, wobei diese Parameter im Intervall 0=schlecht bis 1= perfekt skaliert sind.

Als Ergebnis der Analyse des gesamten Landes Brandenburg erhält man durch Verwendung verschiedener Standortfaktoren einen Satz von Extrapolationsvarianten für die MMK, die alle durch schlechte bis extrem schlechte Qualitätsparameter gekennzeichnet sind. Eine deutliche Verbesserung ist nur zu erreichen, indem für den Suchraum nicht mehr das gesamte Land vorgesehen wird, sondern er auf eine Gemeinde oder einen kreisförmigen Ausschnitt mit definiertem Radius um die zu bewertende Nicht-

<sup>1</sup> ZALF, Inst. f. Landschaftssystemanalyse, Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg, e-mail: jkiesel@zalf.de

<sup>2</sup> ZALF, Inst. f. Bodenlandschaftsforschung

MMK-Fläche herum eingeschränkt wird. Damit werden nur MMK-Informationen aus der räumlichen Nähe zur Füllung eines Nicht-MMK-Bereiches herangezogen. Die dynamische Variante mit kreisförmigen Umgebungen basiert auf der Moving-Window-Technologie und liefert insbesondere bei kleinen Radien Ergebnisse hoher Qualität, kann aber nicht alle Nicht-MMK-Flächen belegen, da die spezielle Kombination der Standortfaktoren in der unmittelbaren Umgebung nicht auftritt (Kiesel et al. 2004). Die Berücksichtigung von administrativen Informationen in Form von Gemeindegrenzen in einem naturwissenschaftlich geprägten Kontext erscheint wenig schlüssig, liefert aber bessere Ergebnisse als das gesamte Land als räumlichen Kontext, indem die räumliche Nähe statisch erachtet wird.

**Überlagerung der Faktorkombinationen**

Geologie	Relief				Räumliche Nähe		Qualitätsparameter		
	geologisches Übersichtskarte	Relief-energie	leichte Schattung	mittlere Schattung	Höhen-schichten	Gemeinden	Moving-Window	Domizanz	mittlere Kontext
X	X				X		1km	0,83	0,72
X	X				X		2,5km	0,72	0,60
X	X				X		5km	0,62	0,51
X		X					1km	0,87	0,78
X		X					2,5km	0,63	0,52
X		X					5km	0,49	0,40
X			X		X	X		0,71	0,61
X		X			X	X		0,71	0,61
X	X					X		0,64	0,53
X						X		0,58	0,48
	X					X		0,48	0,38
						X		0,40	0,32
X	X				X			0,19	0,17
X	X							0,08	0,07
X			X					0,07	0,07
X		X						0,07	0,07
X								0,06	0,06
		X						0,01	0,01
jeweils Überlagerung der Faktorkombinationen nach maximalem Kontrast								0,87	0,63

Als Ergebnis der Extrapolation der MMK liegen zahlreiche Varianten vor, die sich stark in dem Grad der Füllung der Nicht-MMK-Flächen und der Qualität unterscheiden. Eine gute Qualität ist nicht flächendeckend realisierbar. Alle Varianten mit durchschnittlich guter Qualität der Extrapolation weisen mehr oder weniger große Fehlstellen auf. Zur Lösung dieses Problems wird auf Pixelbasis (25m\*25m) die Variante berücksichtigt, die den besten Qualitätsparameter aufweist. Dadurch kann die Qualität des Ergebnisses nochmals bis auf eine 80%-ige statistische Sicherheit im Landesdurchschnitt für alle neu generierten MMK-Flächen gesteigert werden, was bei den wenigen und teilweise stark generalisierten Ausgangsdaten sehr beachtlich ist.

In der Phase des Postprocessing erfolgt noch eine Raster-Vektor-Konvertierung der Ergebnisse unter Berücksichtigung bestehender Konturen und Vernachlässigung kleinster in ihrer Umgebung existierender Flächen. Eine Modifikation der MMK-Parametersätze unter Wald schließt diese Phase ab.

**Ergebnisse**

Im Ergebnis dieses Vorgehens entsteht eine flächendeckende Karte im mittleren Maßstab, die originale MMK-Daten mit Konzeptdaten des gleichen Maßstabs nach einheitlicher Methodik kombiniert. Die Methodik gewährleistet die Übertragbarkeit auf andere Landschaftsausschnitte und ist ohne größeren Aufwand wiederholbar. Die Validierung der Datensätze ist unter Verwendung von Daten der Forstlichen Standortkartierung und des Expertenwissens des Geologischen Dienstes Brandenburgs in nächster Zeit geplant.



**Literatur:**

Kiesel, J. ; Lutze, G. (2004): Skalierbare Generalisierungsmethoden zur Ausgrenzung von Landschaftseinheiten. - In: Wittmann, J. & Wieland, R. [Hrsg.]: Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften : Workshop Müncheberg 2004: 140-154; Aachen (Shaker).

Kiesel, J. ; Lutze, G. (2004): Einsatz von Moving-Window-Technologie bei der GIS-gestützten Landschaftsanalyse : ein skalierbarer Regionalisierungsansatz. - In: Walz, U. Lutze, G.; Schultz, A.; Syrbe, R.-U. [Hrsg.]: Landschaftsstruktur im Kontext von naturräumlicher Vorprägung und Nutzung : Datengrundlagen, Methoden und Anwendungen: 47-64; Dresden (Institut für ökologische Raumentwicklung).

Lieberoth, I.; Dunkelgod, P.; Gunia, W. and Thiere, J. (1983): Auswertungsrichtlinie der MMK. AdL, FZB Müncheberg.

## Parametrisierung Spät-Quartärer Hangentwicklungen als Grundlage für die Regionalisierung von Deckschichtverbreitungen und -mächtigkeiten

<sup>1</sup>Michael Klinge, Jürgen Böhner, Thomas Selige &  
Rüdiger Köthe

### 1. Problemstellung

Es werden neue DGM-basierte Reliefindizes vorgestellt, die durch Verknüpfung mit regionalisierten Klima-Kennwerten rezenter und Spät-Pleistozäner Verhältnisse eine Parametrisierung solifluidaler, denudativer und erosiver Umlagerungs- und Abtragungsprozesse ermöglichen. Die Prozessparameter bilden die Datengrundlage für die Regionalisierung Quartärer Deckschichtmächtigkeiten. Die Methoden wurden validiert und kalibriert auf Basis von Datensätzen (Quartärmächtigkeit) aus dem bayrischen Tertiärhügelland.

### 2. Einleitung

Räumlich hochauflösende digitale Geländemodelle (DGM) bieten eine gute Basis für die Regionalisierung metrischer Bodenkennwerte und standortspezifischer Bodenfunktionen (BÖHNER & KÖTHE 2003). In Hinsicht auf die immer besser werdende Grundlage von DGMs mit Rasterzellenaufösungen von unter 10m und hinreichender Höhengenaugigkeit ergibt sich über die präzise Topographie ein genaues Abbild der Gesteins-, Sediment- und Bodenverbreitungen, die über geomorphologische und klimatische Zusammenhänge miteinander verknüpft sind. Gegenüber der vektorbasierten Digitalisierung hat die rasterbasierte Datenhaltung den entscheidenden Vorteil, dass hier entgegen einer frühzeitigen Datenklassifizierung das naturräumliche Kontinuum erfasst wird (BOCK & KÖTHE 2004). Bei einer ausreichend hohen Datendichte von punkthaften Befunden aus Bodenprofilaufnahmen können die ermittelten Bodenkennwerte mit geostatistischen Verfahren regionalisiert werden. Als Basisdaten haben sich konventionelle Reliefindizes wie Höhe über Tiefenlinie und Topographischer Bodenfeuchte-Index (TWI) (MOORE *et al.* 1993) in Kombination mit Universal Krigging bestens bewährt. Allerdings setzt eine Regionalisierung von Bodenkennwerten mit geostatistischen Methoden je nach Heterogenität des zu bearbeitenden Gebietes eine ausreichende Eingangs-

datendichte und repräsentative Verteilung der Punktdaten voraus. Bei geringer Datendichte bieten sich auf Expertenwissen basierte Prozessmodelle an. Durch Integration von komplexen Reliefindizes und Klimakennwerten werden pedologische und geomorphologische Prozesse parametrisiert um im weiteren Verfahren mit Hilfe multivariater Korrelations- und Regressionsanalysen geeignete räumliche Transferfunktionen für die Regionalisierung zu ermitteln.

### 3. Der Lösungsansatz

Das Arbeitsgebiet Schnatterbach bei Scheyern liegt im voralpinen Tertiärhügelland. Die Untersuchung zielt auf die Mächtigkeit der quartären Decksedimente, da hier die Grenze zum anstehenden Tertiär eine markante, für den Bodenwasserhaushalt relevante Texturgrenze darstellt. In dem etwa 22x27 km großen Gebiet standen 94 Bodenprofilaufnahmen zur Verfügung. Die erosiven und denudativen Prozesse, die zum Aufbau der quartären Sedimentdecke geführt haben, sind zum einen die Solifluktion des pleistozänen Periglazials, die als Basislage aus umgelagerten tertiären Gesteinen das Liegende der Decksedimentkörper bildet. Zum anderen sind es die holozänen kolluvialen Bodenabspülungen, die besonders durch die anthropogene Landnutzung hervorgerufen wurden und vor allem die lösshaltigen Mittel- und Hauptlagen erfassen. Zur Beschreibung der unterschiedlichen Abtragungsprozesse wurden komplexe Reliefindizes entwickelt, die im Detail bei BÖHNER & SELIGE (2005) dargestellt werden.

Zur Darstellung der Reliefenergie an einer Rasterzelle dient der konventionelle Reliefparameter Höhe über Tiefenlinie, der aber subjektiven Maßstäben in der Festlegung der Tiefenlinie unterliegen kann und nicht die relative Lage zu den Wasserscheiden berücksichtigt. Demgegenüber wird bei dem neu formulierten Reliefparameter der Normierten Höhe (NA) die Höhe über Tiefenlinie mit dem Abstand zur höchsten Erhebung im Einzugsgebiet in Relation gesetzt, so dass gegen 0 gehende Werte die topologischen tiefsten Positionen und gegen 1 gehende Werte die Scheitelpunkte kennzeichnen. Der Solifluktions-Index (SFI) beschreibt die Intensität periglazialer Hangabtragungsprozesse im Spät-Pleistozän. Da neben dem kalklimatischen Milieu die (Geli-)Solifluktion vor allem durch die Bodenfeuchtigkeit und die Gravitationsenergie gesteuert wird, integriert der SFI die Normierte Höhe sowie das gewichtete arithmetische Mittel der Einzugsgebietsneigung. Für die Ermittlung der holozänen Bodenabspülung kann der LS-Faktor (Hanglänge, -neigung) der USLE (WISCHMEIER & SMITH 1978), bzw. der ABAG (SCHWERTMANN *et al.* 1990) herangezogen werden. Der Sedimenttransport-Index (STI) setzt die Fläche des Einzugsgebietes in Relation zur mittleren Hangneigung. In

<sup>1</sup> Anschrift der Verfasser:

Michael Klinge, Jürgen Böhner  
- Geographisches Institut der Univ. Göttingen, Goldschmidtstraße 5,  
37077 Göttingen; Email: mklinge1@gwdg.de, jboehne1@gwdg.de

Thomas Selige  
- Technische Universität München, Department für  
Pflanzenwissenschaften, Am Hochanger 2, 85350 Freising,  
Email: selige@wzw.tum.de

Rüdiger Köthe  
- scilands GmbH - Gesellschaft zur Bearbeitung Digitaler Landschaften,  
Goetheallee 11, 37073 Göttingen, Email: koethe@scilands.de

einem 3x3 Rasterzellenfenster wird für jede Rasterzelle der Massenbilanz-Index (MBI) ermittelt, indem ihr STI von der STI-Summe topologisch höher liegender Nachbarzellen subtrahiert wird. Werte zwischen 0 und 1 kennzeichnen erosive Standorte und Werte >1 bedeuten Akkumulation.

Aus den zuvor dargestellten Reliefindizes werden durch Integration von rezenten und vorzeitlichen Klimawerten, insbesondere von Strahlung und Niederschlag, Prozessparameter abgeleitet. Die Klimakennwerte wurden auf der Basis von Klimastationsdaten, globalen Zirkulationsmodellen (GCM) und Paläoklimasimulationen (ECHAM) mit einem statistical downscaling Verfahren ermittelt (BÖHNER 2004a, b). Beim Solifluktuations-Parameter (SFP) wird in der Funktion des SFI die Einzugsgebietsfläche durch die spezifische Solare Einstrahlung (mit Werten des LGM) als Einzugsgebietssumme der Verdunstungsäquivalente ersetzt. Bezugnehmend auf die Ergebnisse der Untersuchungen von SCHWERTMANN *et al.* (1990) kann über den Jahresniederschlag der (USLE) R-Faktor regressiv angenähert werden. Das gewichtete Mittel aller R-Werte im Einzugsgebiet wird mit dem STI multipliziert um den Sedimenttransport-Parameter (STP) zu erhalten. Mit der gleichen Methode wie beim MBI kann aus den einzelnen STP der Massenbilanz-Parameter berechnet werden.

#### 4. Ergebnisse

Die auf der Basis von Expertenwissen formulierten Reliefindizes und -parameter wurden anhand der vorliegenden Profildaten mit multivariater Korrelationsanalyse auf statistische Zusammenhänge hin untersucht, um festzustellen, welche Faktoren oder Faktorenkombinationen die Mächtigkeit der Quartär-sedimente am plausibelsten und mit hinreichender statistischer Präzision wiedergeben (BÖHNER & SELIGE 2005). Unter Ausschluss von 2 eindeutig anthropogen aufgefüllten Bodenprofilen ergab sich für die konventionellen Reliefparameter, bei einer Kombination von TWI und SPI ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0.713$ , bzw. eine Standardabweichung von  $S = 19.02\text{cm}$ . Die Korrelation verbessert sich deutlich bei einer Kombination der neu formulierten Reliefindizes in der Reihenfolge SFI, STI, MBI und NA auf ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0.860$ , bzw.  $S = 13.13\text{cm}$ . Die höchste Korrelation von  $R^2 = 0.880$  ( $S = 12.20\text{cm}$ ) wird bei einer Kombination der Prozessparameter in der Reihenfolge SFP, MBP und STP erreicht. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte also gezeigt werden, dass sich das geomorphologische reliefgesteuerte Prozessgefüge durch Prozessparameter quantitativ beschreiben lässt und die Modellierungen in einem geologisch homogenen Gebiet zu repräsentativen Regionalisierungsergebnissen führen.

#### 5. Literatur

- BOCK, M. & KÖTHER, R. (2004): Regionalisierung von Bodenkennwerten zur Ableitung von Funktionalen Bodenkonzepkarten. – In: MÖLLER, M. & HELBIG, H. (Hrsg.): GIS-gestützte Bewertung von Bodenfunktionen – Datengrundlagen und Lösungsansätze: 13-18.
- BÖHNER, J. (2004a): Der klimatisch determinierte raum/zeitliche Wandel naturräumlicher Ressourcen Zentral- und Hochasiens: Regionalisierung, Rekonstruktion und Prognose. – In: GAMERITH, W., MESSERLI, P., MEUSBURGER, P., WANNER, H., (Hrsg.): Alpenwelt-Gebirgswelten. Inseln, Brücken, Grenzen. – Tagungsbericht und wissenschaftliche Abhandlungen 54. Deutscher Geographentag Bern: 151-160.
- BÖHNER, J. (2004b): Regionalisierung bodenrelevanter Klimaparameter für das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung (NLF) und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). – Arbeitshefte Boden 2004/4: 17-66.
- BÖHNER, J. & KÖTHER, R. (2003): Bodenregionalisierung und Prozessmodellierung: Instrumente für den Bodenschutz. – Petermanns Geographische Mitteilungen 147: 72-82.
- BÖHNER, J. & PÖRTGE, K.H. (1997): Strahlungs- und expositionsgesteuerte tagesperiodische Schwankungen des Abflusses in kleinen Einzugsgebieten. – Petermanns Geographische Mitteilungen 141: 35-42.
- BÖHNER, J. & SELIGE, T. (2005): Spatial prediction of soil parameter using terrain analysis, climate regionalization and remote sensing. – Eingereicht bei Geoderma.
- MOORE, I.D., GESSLER, P.E., NIELSEN, G.A. & PETERSON, G.A. (1993): Soil Attribute Prediction Using Terrain Analysis. – Soil Sci. Soc. Am. J. 57: 443-452.
- SCHWERTMANN, U., VOGL, W. & KAINZ, M. (1990): Bodenabtrag durch Wasser - Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. – 2. Aufl., Stuttgart.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. (1978): Predicting rainfall erosion losses – A guide to conversation planning. – Agriculture Handbook No. 537, US Department of Agriculture, Washington DC.

## Trockenheitsinduzierte Veränderungen hydrologischer Eigenschaften von Oberböden eines gestörten Standorts in der Bergbaufolgelandschaft

Christine Lemnitz<sup>1</sup>, Matthias Kuhnert<sup>2</sup>, Sören Haubrock<sup>2</sup>, Oliver Bens<sup>1</sup> und R.F. Hüttl<sup>1</sup>

### Ziel

In den letzten Jahren wurde die Tendenz zu deutlich trockeneren und wärmeren Sommermonaten beobachtet. Damit einhergehende Auswirkungen auf physikalische und hydraulische Eigenschaften von Oberböden sind Gegenstand einer mikro-skaligen Prozessstudie. Schwerpunkt der Untersuchungen sind die Ausbildung von Benetzungshemmungen und ihre Saisonalität, speziell in Abhängigkeit von Substrat, Gehalt an organischem Kohlenstoff und Temperatur. Mit dem Anwachsen von Benetzungswiderständen im Oberboden sind herabgesetzte Infiltration, erhöhter Oberflächenabfluss und daraus resultierende Erosionserscheinungen eng gekoppelt.

Ziel der Untersuchungen ist die Charakterisierung der Ursache-Wirkungs-Beziehung von Benetzungshemmungen. In Kooperation mit dem GeoForschungszentrum Potsdam werden Verfahren erarbeitet, die die Übertragbarkeit punktuell erhobener Daten flächenhaft und auf andere Standorte, z.B. in Trockengebieten ermöglicht. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen als Teilmodul zur Benetzungshemmung in ein Erosionsmodell integriert werden.

### Methoden

Das Untersuchungsgebiet liegt im Bereich des Tagebaus Welzow-Süd im südlichen Brandenburg. Es handelt sich um ein ca. 4 ha großes Einzugsgebiet, an dessen Oberfläche unmeliorierte tertiäre und quartäre sandige sowie tonige Substrate vorhanden sind. Trotz der vorwiegend sandigen Substrate, der schwachen Geländeneigung und geringer Niederschlagsmengen bildet sich Oberflächenabfluss, in dessen Folge sich Erosionsrinnen und Gullies ausgebildet haben. Klimadaten werden von einer meteorologischen Station kontinuierlich aufgezeichnet; die zeitlichen Verläufe von Wassergehalt, Grad und Persistenz der Hydrophobie, Wasseraufnahmeverhalten, pH-Werte, elektrische Leitfähigkeit werden in regelmäßigen Abständen oberflächennah (0-5cm) erhoben. Es wurden Temperaturfühler im Mikro-Profil (0, 1, 2 und 3 cm Tiefe) installiert. Um den Einfluss des Gehaltes organischer Substanz auf das Benetzungsverhalten zu quantifizieren, wurden Versuchsschüttungen beste-

hend aus definierten Anteilen (1 und 3% C<sub>org</sub>) rezent (Kompost) und geogener (frische und verwitterte Braunkohle) organischer Substanz und quartären Sanden, angelegt. Die zeitlich und räumlich hochauflösende Erfassung der aktuellen und potentiellen Benetzbarkeit (Kontaktwinkelmessungen, Erhebung von WDPT) im Freiland wird durch Versuche unter kontrollierten Temperatur- und Feuchtebedingungen im Labor ergänzt. Unterschiedliche Mischungen von organischer Substanz mit Quarzsand (1, 3 und 5% C<sub>org</sub>) werden bei definierten Anfangswassergehalten (8 und 15%) und definierten Temperaturen (bisher 20; 25; 30 und 40°C) getrocknet und im Anschluss auf Grad und Persistenz der Hydrophobie analysiert. Die Substratmischungen entsprechen in ihrer Zusammensetzung denen im Freiland. Ergänzend dazu werden Versuche mit Xylit und Torf durchgeführt. Die Kontaktwinkel werden direkt mit einem Goniometer (OCA 5, Dataphysics) an aufgepulverten Proben gemessen, die auf Objektträgern mit Hilfe doppelseitigen Klebandes fixiert werden. Die Persistenz der Benetzungshemmung wird mit dem Water Drop Penetration Time (WDPT)-Test bestimmt (0-3600s) [1]. Zusätzlich wird die Dynamik der Wasseraufnahme der Substrate nach dem Enslinverfahren bestimmt [2].

### Ergebnisse

Tertiäre und quartäre Sande unterscheiden sich hinsichtlich ihres Benetzungsverhaltens signifikant. Während die quartären Sande sehr gut benetzbar sind, lediglich Kontaktwinkel bis 30° aufweisen und die WDPT-Werte stets bei 0s liegen, konnten an tertiären Sanden Kontaktwinkel bis 82° und WDPT-Werte bis 3600s gemessen werden. Aufgrund dessen unterteilen wir hier in hydrophile quartäre Sande und tertiäre Sande mit deutlich ausgeprägtem Benetzungswiderstand [3]. Erste Ergebnisse belegen eine ausgeprägte jahreszeitliche Variabilität der Benetzungshemmung (Abb.1), unabhängig vom Substrat.

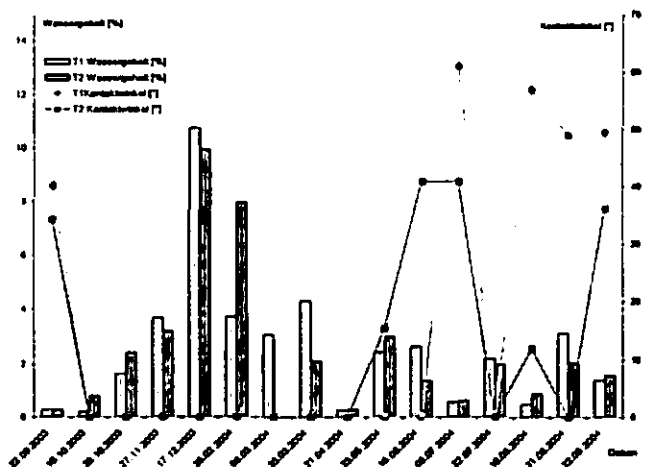


Abb. 1: Kontaktwinkel (Mediane, n=20) und Wassergehalte von tertiären Sanden im Untersuchungszeitraum

<sup>1</sup>Brandenburgische Technische Universität Cottbus, LS Bodenschutz und Rekultivierung, Universitätsplatz 3-4, 03044 Cottbus [lemnitz@tu-cottbus.de](mailto:lemnitz@tu-cottbus.de)

<sup>2</sup>GeoForschungszentrum Potsdam (GFZ), Telegrafenberg A17, 14473 Potsdam



Deutliche Unterschiede im Benetzungsverhalten treten in den Monaten Oktober bis April gegenüber der Periode Mai bis September auf. Während in den Sommermonaten verstärkt Benetzungshemmungen des Oberbodens auftraten, wiesen alle untersuchten Substrate im Zeitraum Oktober bis April hydrophile Eigenschaften auf. Allerdings erfolgt der Abbau der Benetzungshemmungen nicht schlagartig, sondern in Abhängigkeit vom Substrat im Verlauf der Monate Oktober und November.

Austrocknungsversuche im Labor zeigen eine Abhängigkeit der Kontaktwinkel von der Temperatur. Bei höheren Trocknungstemperaturen konnten tendenziell auch höhere Kontaktwinkel gemessen werden. Der Anfangswassergehalt der Substrate übt dabei einen relevanten Einfluss auf die Benetzungseigenschaften der getrockneten Proben aus. So resultieren höhere Anfangswassergehalte (15%) nach der Austrocknung tendenziell in niedrigeren Kontaktwinkeln, niedrigere Wassergehalte (8%) in höheren Kontaktwinkeln.

Während im Freiland zwischen den Varianten mit unterschiedlichen  $C_{org}$ -Gehalten kein signifikanter Unterschied der Benetzungshemmung erkennbar ist (zurückzuführen u.a. auf inhomogene Einarbeitung der Substrate), konnte in den Laborstudien neben der Abhängigkeit vom  $C_{org}$ -Gehalt auch eine deutliche Abhängigkeit der Kontaktwinkel von der Art der  $C_{org}$ -Quelle nachgewiesen werden. Die Kontaktwinkel nehmen mit steigendem  $C_{org}$ -Gehalt zu und in der Folge Torf > frische Braunkohle > verwitterte Braunkohle > Xylit > Kompost ab.

Die Versuche zur Wasseraufnahmecharakteristik zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Zeit bis zur maximalen Wasseraufnahme und den gemessenen WDPT-Werten sowie dem Gehalt an organischem Kohlenstoff. Substrate mit hohem  $C_{org}$ -Gehalt oder mit einer hohen Persistenz der Benetzungshemmung benötigen mehr Zeit bis zur maximalen Wasseraufnahme (Tab. 1).

Tab. 1: Wasseraufnahme nach Enslin

	Zeit bis zur max. Wasseraufnahme [min]	WDPT [s]
frische Kohle 3% $C_{org}$	120	<60s
Kompost 1% $C_{org}$	60	<60s
frische Kohle 1% $C_{org}$	15	<5s
verwitterte Kohle 3% $C_{org}$	4	<5s
verwitterte Kohle 1% $C_{org}$	4	<5s
Sand, quartär	0,5	0
Sand, tertiär	15	600

Infolge der unterschiedlich ausgeprägten Benetzungshemmungen der Substrate erfolgt die Bildung von Oberflächenabfluss auf Flächen mit hydrophilen quartären Sanden erst bei hohen Niederschlagsintensitäten, auf tertiären Sanden hingegen entsteht bereits bei geringen Niederschlagsintensitä-

ten erhöhter Oberflächenabfluss (Abb. 2) und führt zu Bodenerosion.

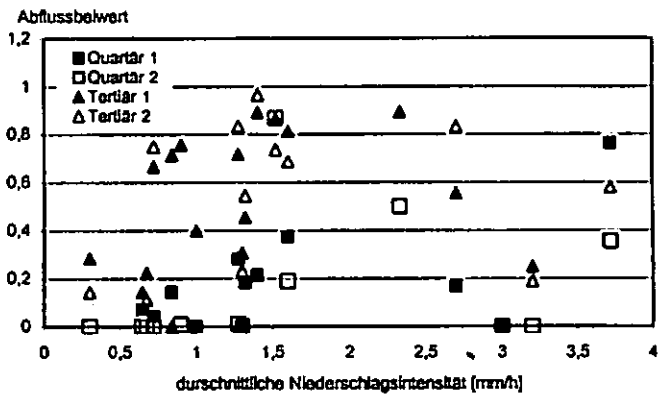


Abb. 2: Abflussbeiwerte von quartären und tertiären Sanden in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität

**Fazit**

Bei Trocknungsvorgängen von Substraten sind Wassergehalt und Temperatur entscheidende Parameter für die Ausbildung von Benetzungshemmungen. Grad und Persistenz der Benetzungshemmung sowie der Gehalt an organischem Kohlenstoff haben bedeutenden Einfluss auf das Wasseraufnahmevermögen von Substraten und somit auf die Bildung von Oberflächenabfluss und Erosion [3]. Dabei ist die beobachtete jahreszeitliche Variabilität der Benetzungshemmungen mit Hinblick auf Bodendegradation von besonderer Bedeutung.

**Literatur**

- [1]BACHMANN et al. (2000): Modified sessile drop method for assessing initial soil-water contact angle of sandy soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 64, 564-567.
- [2]KÖHLER & HERZOG (1962): Vergleichende Untersuchungen mit zwei verschiedenen Enslingeräten zur Bestimmung der maximalen Wasseraufnahmefähigkeit bindiger Erdstoffe. Zeitschrift für angewandte Geologie (8), 144-147.
- [3]LEMMNITZ et al. (2004): Charakterisierung oberflächennaher trockenheitsinduzierter bodenhydrologischer und -chemischer Veränderungen. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 05.04 Band 2 (Tag der Hydrologie 2004 – Wasser- und Stofftransport in heterogenen Einzugsgebieten)

**Danksagung**

Dieses Projekt wird gemeinsam mit dem GeoForschungsZentrum Potsdam, Sektionen 1.4 - Fernerkundung und 5.4 – Ingenieurhydrologie bearbeitet. Dem GFZ Potsdam gilt unser Dank für die Projektförderung, der Vattenfall Europe Mining AG für die Bereitstellung der Untersuchungsfläche. Wir bedanken uns bei Herrn Neumann (Vattenfall Europe Mining AG) und Herrn Reißmann (Beak Consultants GmbH) für die freundliche Unterstützung.

# Heterogenitätsmaße zur Beurteilung diskreter Kartiereinheiten sowie deren Anwendung bei der Disaggregation von Bodenarealen mittlerer Maßstäbe.

Uwe Meer und Thomas Mosimann

## Problemstellung

Die größten Probleme bei der Modellierung landschaftsökologischer Prozesse bestehen heute nicht mehr auf der Modellseite, sondern in der Bereitstellung der Eingangsdaten. Während zahlreiche sehr gute Modelle auf dem Markt angeboten werden, stehen vor allem hoch aufgelöste Daten oft nicht zur Verfügung. Die Folge ist, dass auch für hoch auflösende Modellanwendungen mittelmaßstäbige Kartenwerke (1:50.000 - 1:100.000) herangezogen werden müssen.

Aufgrund der Generalisierung auf dieser Maßstabsebene haben Modelleingangsdaten, wie z. B. die Bodenartuntergruppen, eine unbekannte Heterogenität. Der Einfluss dieser Varianz auf Modellergebnisse kann nicht beurteilt werden.

Erschwerend kommt hinzu, dass aufgrund des traditionellen Konzeptkartenansatzes (HAGEDORN, 1999) in fast allen behördlichen Kartenwerken die Grenzlinienziehung nach bodengenesischen Aspekten vorgenommen wird. Da die Klassifikation von Bodeneigenschaften dieser Systematik untergeordnet wird, ist die Grenzlinienziehung im Hinblick auf die Bodeneigenschaften nicht unbedingt optimal. Eine Abweichung von diesem Kartenkonzept ist allerdings in naher Zukunft nicht zu erwarten, da a) auch seitens der behördlichen Kartenanbieter immer wieder betont wird, dass gerade diese (vektorbasierten) Karten vom Anwender nachgefragt werden und b) die finanzielle Grundlage für die Erstellung rasterbasierter Kartenwerke nicht gegeben ist.

Diese Probleme erfordern es, mittelmaßstäbige Bodenkarten mit einer Angabe zur Heterogenität der Bodendaten auszustatten. Im Hinblick auf die steigende Nachfrage nach höher aufgelösten Bodendaten (BÖHNER & KÖTHE, 2003) muss zudem nach (kostengünstigen) Algorithmen gesucht werden, die es gestatten größere Bodenareale regelbasiert (z. B. durch Berücksichtigung von Substrat- und Reliefunterschieden) in kleinere Areale mit minimierter Merkmalsvarianz zu unterteilen (Disaggregation).

## Methoden

Innerhalb dieser Arbeit wurden verschiedene Heterogenitätsmaße für die Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BÜK50) am Beispiel eines etwa 11 x 11 km großen

Untersuchungsgebiets im Niedersächsischen Berg- und Hügelland ermittelt.

Die Berechnung erfolgte auf der Basis eines hoch aufgelösten Datensatzes der Bodenschätzung. Die Heterogenitätsmaße dienen neben der Quantifizierung der Homogenität eines Areals auch als Indiz für die weitere Disaggregationswürdigkeit einer Einheit (Festlegung von Schwellenwerten) sowie als Maß für die Verbesserung eines Disaggregationsschrittes.

## Vorgehen:

GIS-gestützte Verschneidung der Bodenübersichtskarte (BÜK50) mit der Informationsschicht Gesteinsuntergrund (Geologie). Hierbei entstehen in der ersten Disaggregierungsstufe (DISAG 1) kleinste gemeinsame Faktorkombinationen aus den Informationsschichten Boden und Gestein, welche auf der Grundlage eines hoch aufgelösten Datensatzes („reale“, bekannte Verteilung auf Basis der Bodenschätzung, Maßstab etwa 1:5.000) mit neuen Bodeninformationen hinterlegt werden.

In einem zweiten Schritt [Disaggregierungsstufe 2] werden Reliefinformationen [z. B. Lage im Relief: Kuppe, Hang oder Tiefenlinie] in die DISAG 1 integriert, um die Heterogenität der Verschneidungsflächen weiter zu minimieren.

Für jede Verschneidungseinheit wird anhand von Histogrammverläufen die Ursprungsheterogenität (Kartiereinheiten der BÜK50) mit der nun vorliegenden Heterogenität (DISAG-Stufe 1/2) anhand eigens entwickelter Heterogenitätsindizes (vgl. Abbildung 1) verglichen. Dies geschieht für die bodenkundlichen Basisdaten (z. B. Korngrößenzusammensetzung), Einzelfaktoren von Modellen (z. B. der K-Faktor als ein Maß für die Erosionsanfälligkeit des Bodens) und abgeleitete, ökologische Größen (Erosionsabträge etc.). Da die Histogrammverläufe in der Regel eine polymodale bzw. asymmetrische Verteilung aufweisen, ist die Verwendung von gebräuchlichen Lokalisations- und Dispersionsparametern wie Varianz und Standardabweichung weniger sinnvoll. Zur Beurteilung der Verteilungen werden daher die folgenden Heterogenitätsmaße verwendet.

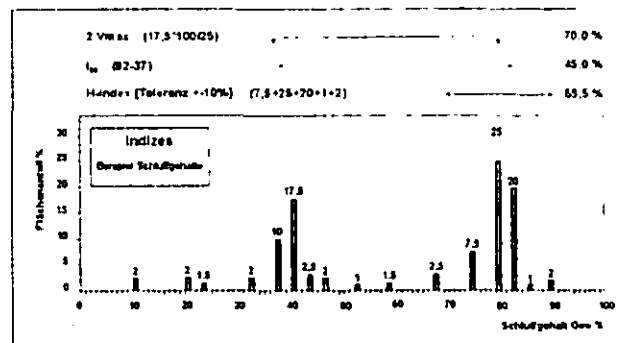


Abbildung 1: Verwendete Heterogenitätsmaße zur Histogrammbeurteilung

### Homogenitätsindex (H-Index):

Der Homogenitätsindex ist ein eigens entwickeltes Maß zur Beurteilung der „Höhe“ einer Verteilung. Er summiert sich aus dem Flächenanteil, der vom Modalwert  $\pm$  eines parameterabhängigen Toleranzbereichs eingenommen wird (ergibt sich aus der Klassenmittebildung der Kornfraktionen bei der Metrisierung der Bodenartenuntergruppe).

### Interdezilbereich $I_{80}$ :

Der  $I_{80}$  beinhaltet 80% des Wertespektrums (bzw. der Fläche) und ermöglicht einen guten Überblick über die „Breite“ einer Verteilung, da er Extremwerte weniger stark wichtet.

### Zweites Verteilungsmaximum (2Vmax):

Dieses Kriterium ermöglicht zu beurteilen, ob neben dem durch den Homogenitätsindex bereits erfassten Verteilungsschwerpunkt noch weitere disaggregierungswürdige Flächenanteile (Peaks) innerhalb der Verteilung existieren. Aus diesem Grunde wird das (prozentuale) Verhältnis von Modalwert zum „zweiten“ Peak gebildet.

### Ergebnisse

Sämtliche in der Bodenkarte 1:50.000 ausgewiesenen Lößareale erwiesen sich als sehr homogen. Die durchschnittlichen Homogenitätsindizes des Gesamtblatts lagen bezüglich der Korngrößenzusammensetzungen für den Ton z. B. bei 84%, für den Schluff bei 73% und für den Sand bei 69% (Mittelwerte für alle zehn untersuchten Tiefen). Dies bedeutet, dass die Information Löß, welche aus einer 50.000er Bodenkarte abgeleitet wurde, sehr genau die Realität widerspiegelt. Aus diesem Grund ist die Anwendung des Downscaling-Modells, wenn eine Kosten- bzw. Aufwand/Nutzenanalyse betrachtet wird, für diese Einheiten weniger sinnvoll.

Für die lößfreien Areale betragen die mittleren Homogenitätsindizes der Ausgangskarte in den Oberböden, mit geringen Unterschieden der Hauptbodenarten, ca. 50%. Für die Unterböden liegen die Werte für Sand und Ton bei etwa 55% und für den Schluff bei 70%. Nach dem Einsatz des Disaggregierungsansatzes liegen die H-Indizes in den Oberböden bei 80% und in den Unterböden bei 75%. Somit lässt sich eine Fehlerreduzierung bei den Bodenartenuntergruppen um etwa 3 Klassenbreiten erreichen. Maximale vermindern sich die Fehler in den einzelnen Bodeneinheiten der Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BÜK50) um 40%.

Für die ermittelten Faktorkombinationen aus Bodentyp 50, Geologie und Relief werden z. Zt. unter Zuhilfenahme weiterer Informationen (z. B. Flächengröße, Anzahl geologischer Einheiten innerhalb einer Bodeneinheit, Varianz von Reliefparametern etc) allgemein gültige Heterogenitätsindizes für das Niedersächsische Berg- und Hügelland ermittelt. Darüber hinaus ist die Auswirkung der Heterogenität auf modellierte Größen Gegenstand weiterer Untersuchungen.

### Fazit

Die Nachfrage nach (hoch aufgelösten) Bodeninformationen als Planungs- oder Entscheidungshilfe steigt (BÖHNER & KÖTHE, 2003). Gründe dafür sind neue Umweltauflagen wie das Bundesbodenschutzgesetz und die Entwicklung Computer gestützter Bewirtschaftungstechnologien wie Precision Farming. Heterogenitätsmaße (in mittelmaßstäbigen Kartenwerken) und Disaggregierungsansätze (zur Erzeugung höher aufgelöster Daten) versetzen den Modellanwender über Maßstabebenen hinaus in die Lage, einen großen Beitrag zu mehr Planungssicherheit zu leisten.

Der Disaggregierungsansatz hat sich aufgrund der relativ unkomplizierten Anwendung im Praxiseinsatz bewährt und vermag die z. T. erheblichen Varianzen der Bodenbasisdaten durch Separation entscheidend zu reduzieren. Verteilungsfreie Signifikanztests (KOLMOGOROFF & SMIRNOFF) bestätigten die Unterschiede in den einzelnen Verteilungen der BÜK50 und der neu geschaffenen disaggregierten Areale. Besonders für den für die Modellierung wichtigen Parameter Bodenart lassen sich die Heterogenitäten deutlich reduzieren. Die berechneten Varianzen in mittelmaßstäbigen Bodenkarten reduzieren sich somit unter Zuhilfenahme eher grober Informationen zu Gesteinsuntergrund und Reliefsituation erheblich.

Räumlich höher aufgelöste Eingangsdaten verringern den Fehlerbereich räumlich differenzierter Simulationen von Wasser- und Stoffhaushaltsprozessen. Es wird in Zukunft möglich sein, bodenkundliche Standardwerke wie etwa die BÜK50 mit Angaben zur Varianz der bodenkundlichen Basisdaten auszustatten und somit die Abschätzung eines Fehlers für modellierte Größen zu ermöglichen. Somit wäre der Anwender auch bei einer niedrigen Auflösung der Bodendaten in der Lage, eine hinreichend genaue Abschätzung von Prozessgrößen zu liefern.

### Literatur

BÖHNER & KÖTHE (2003): Bodenregionalisierung und Prozessmodellierung: Instrumente für den Bodenschutz. In Petermanns Geographische Mitteilungen 2003/3, S. 72-82.

HAGEDORN, J. (1999): Fachwissenschaftliche Expertise: Weiterentwicklung von Verfahren zur Reliefanalyse, Klimaregionalisierung, Prozeßparametrisierung und Regionalisierung von Bodenmerkmalen. Bearbeitet von: BÖHNER, J.; CONRAD, O.; KÖTHE, R.; RINGELER, A.

# Automatisierte Reliefgliederung auf der Grundlage multihierarchischer Objektstrukturen

Markus Möller<sup>a</sup>

## 1. EINLEITUNG

Viele Ansätze der bodenkundlich-orientierten Reliefgliederung basieren auf der Kennzeichnung von relativen Reliefpositionen in der Bodenlandschaft, wobei kontinuierliche Bodeneigenschaften (z.B. Schluffanteil) oder Klassenattribute (z.B. Bodenform) mit diskreten Reliefpositionen verknüpft werden. Aufgrund der besseren Integrationsmöglichkeiten bodenkundlich relevanter Informationen erweist sich dieser Ansatz oft praktikabler als die Darstellung einzelner Bodeneigenschaften in einem Kontinuum (vgl. MacMillan et al., 2004).

Allerdings ist die Anwendung von automatisierten Reliefgliederungsverfahren mit grundlegenden Problemen verbunden:

- Es existiert keine universelle Definition von Reliefpositionen (Dehn et al., 2001).
- Reliefpositionen treten in verschiedenen Maßstabsbereichen hervor (z.B. Senken- und Auenbereiche) (Gallant & Dowling, 2003).
- Im Zusammenhang mit der Heterogenität von Landschaft bzw. des Reliefs zeigen statistische Klassifikatoren oft eine eingeschränkte Reichweite (MacMillan et al., 2004).

Das Ziel des Beitrages besteht in der Entwicklung eines Ansatzes der automatisierten Reliefgliederung, der die Reliefheterogenität und Maßstabsabhängigkeit von Reliefpositionen berücksichtigt sowie eine Anpassung der Definition von Reliefpositionen erlaubt.

Die Untersuchungen beziehen sich auf das TK25-Blatt Könnern, das sich etwa 20 km nördlich von Halle (Saale) befindet. Es zeichnet sich durch eine große Heterogenität hinsichtlich der Boden- und Reliefbedingungen aus.

## 2. ANSATZ

Beim vorgestellten Ansatz der Reliefgliederung werden Objektbildung und Klassifizierung getrennt behandelt. Die Objektbildung gründet sich auf ein regionenbasiertes Segmentierungsverfahren, das im Programmpaket eCognition implementiert ist (Benz et al., 2004). Dabei entstehen Reliefpositionen in einem mehrdimensionalen Kontext (vgl. Friedrich, 1996) sowie multihierarchische Objektstrukturen, die durch die hierarchische Verknüpfung verschiedener Aggregationsniveaus von Reliefobjekten gekennzeichnet sind und die Ableitung von hierarchischen und nachbarschaftsbezogenen Attributen erlauben.

## 3. ERGEBNISSE

### 3.1. Objektbildung

In die Segmentierung bzw. Objektbildung gingen die nach Friedrich (1996) transformierten Attribute 'Höhe'  $f(h)$ , 'Neigung'  $f(n)$ , 'Gesamtkrümmung'  $f(k)$ , 'Minimalkrümmung'  $f(mk)$  sowie 'Höhe über Tiefenlinie'  $f(ht)$  ein. Der entscheidende Parameter bei der Transformation ist die vom Nutzer festzulegende Konstante  $T$ , deren Auswahl die Häufigkeitsverteilung und damit die Differenzierbarkeit unterschiedlicher

Reliefformen sowohl im Histogramm als auch im entsprechenden Rasterbild beeinflusst:

$$f(x) = \frac{x}{(|x| + T)}$$

$$x = k, n, ht, h; f(k) \in [-1,1], f(n, ht, h) \in [0,1]$$

Abbildung 1 zeigt drei Segmentierungsstufen. Dabei wird deutlich, dass Reliefobjekte entsprechend dem Aggregationsniveau hervor- und zurücktreten. Beispielsweise erscheint in der Segmentierungsstufe 11 (Abb. 1(rechts)) der in Nord-Süd-Richtung verlaufende Auenbereich als ein einzelnes Objekt, wohingegen Senkenbereiche in Stufe 4 (Abb. 1(Mitte)) als einzelne Senkenbereiche hervortreten, die sich in Stufe 1 (Abb. 1(links)) in einzelne Objekte auflösen.



Abb. 1: Aggregationsniveaus bei der Segmentierung der Reliefableitungen  $f(h)$ ,  $f(ht)$ ,  $f(n)$ ,  $f(k)$  und  $f(mk)$ ; Quelle DHM: Landesvermessungsamt Sachsen-Anhalt (<http://www.geobasis.sachsen-anhalt.de>)

### 3.2. Klassifikation

Bei der Klassifikation werden numerische in semantische Informationen überführt. Hier sollen die semantischen Informationen 'Aue', 'Senke', 'Ebene' und 'Hang' erzeugt werden. Als eine numerische Eingangsinformation dient der Massenbilanzindex (MBI), der von Friedrich (1996) adaptiert wurde:

$$MBI = \begin{cases} f(k) \times (1 - f(n)) \times (1 - f(ht)) & \text{für } f(k) < 0 \\ f(k) \times (1 + f(n)) \times (1 + f(ht)) & \text{für } f(k) > 0 \end{cases}$$

mit  $MBI \in [-1,3]$

Bei der Definition der genannten Reliefpositionen wird von folgenden Annahmen ausgegangen :

- Senken- und Auenbereiche weisen positive, Hangbereiche negative und Flachbereiche ausgeglichene Massenbilanzen auf.
- Akkumulation findet eher in flacheren als in steileren Senkenbereichen statt. Sie erreicht ihr Maximum bei starken konkaven Wölbungen und geringer Entfernung von der Erosionsbasis.
- Der Bodenabtrag nimmt zu mit zunehmender Entfernung von der Erosionsbasis und stärker werdender konvexer Krümmung.

<sup>a</sup>Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle, Department Angewandte Landschaftsökologie, Permoserstr. 15, 04318 Leipzig, E-mail: markus.moeller@ufz.de, Telefon: ++49 (0) 341 2352586

### 3.2.1. Auenbereiche

Die Detektion der Auenbereiche basiert auf folgender Gleichung:

$$Aue = (hd < 0) \cup \min(MBI_{mod}) \cup \min(ra)$$

mit  $ra \in [0, x]; y_{(n)} \neq y_{(n+1)}; y = hd, MBI_{mod}, ra$

Mit  $hd < 0$  wird ausgedrückt, dass Auenbereiche auf jeder Hierarchieebene tiefer als ihre Umgebung liegen. Weiterhin wird von der Annahme ausgegangen, dass Auenbereiche eine positive Massenbilanz  $MBI$  aufweisen, die innerhalb der entsprechenden Super-Objekte minimal ist. Mit dem Ausdruck  $\min(ra)$  sollen die Objekte mit der geringsten Reliefamplitude bzw. Neigung erfasst werden, wobei  $x$  ein vom Anwender festzulegendes Maximum der Reliefamplitude darstellt. Mit  $y_{(n)} \neq y_{(n+1)}$  wird vermieden, dass Objekte klassifiziert werden, die beim Übergang der Segmentierungsebenen ( $n$ ) zu ( $n-1$ ) keine räumliche Differenzierung erfahren haben.

Die Abfrage wird für jede Segmentierungsstufe und jedes Super-Objekt entsprechend Abbildung 2 ausgeführt. Die Bereiche, die nicht die Bedingungen der Abfrage erfüllen, werden auf die Segmentierungsebene ( $n-1$ ) übertragen. Diese Prozedur wird so lange wiederholt, bis keine Segmentierungsebene mehr zur Verfügung steht oder der Nutzer den Abbruch festlegt.

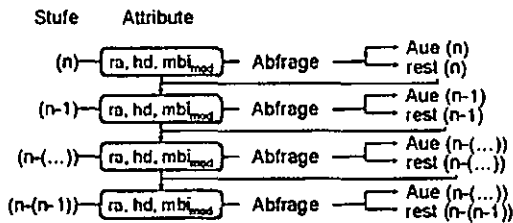


Abb. 2: Prinzip der Detektion von Auenbereichen

### 3.2.2. Senken-, Hang- und Flachbereiche

Die durchschnittlichen Objektgrößen der jeweiligen Segmentierungsebenen gestatten eine zielmaßstabsbezogene Klassifizierung von Reliefpositionen. Beispielhaft wurde der kartografische Maßstabsbereich 1:15 000 (vgl. Abb. 1(links)) ausgewählt. Als Attribut diente der Massenbilanzindex  $MBI$ . Der landschaftlichen Heterogenität wurde durch den Bezug auf hierarchisch übergeordnete Aggregationsniveaus (Super-Objekte) (Abb. 3, vgl. Abb. 1(rechts)) Rechnung getragen.

Die Klassifizierungsprozedur kombiniert ein statistisches Gliederungsverfahren (ISODATA-Clusteranalyse) mit einem wahrscheinlichkeitsbasierten Klassifikator (Maximum-Likelihood-Operator). Bei der Auswahl der Stichproben wurde davon ausgegangen, dass minimale  $MBI$ -Werte 'Senken', maximale  $MBI$ -Werte dagegen 'Hangbereiche' repräsentieren. Als Stichproben für die Klasse 'Ebene' fanden jeweils die beiden Cluster Verwendung, die sich im positiven und negativen Wertebereich am nächsten zum Wert 0 (= ausgeglichene Massenbilanz) befanden.

Abbildung 4(links) zeigt eine zusammengefasste Darstellung der Klassen *Hang*, *Senke* und *Ebene*. Aus Abbildung 4(Mitte) werden die Abstufungen innerhalb der bzw. die Nähe zwischen den Klassen deutlich. Daraus kann die Stärke der jeweiligen Klassenzugehörigkeit abgeleitet werden. In Abbildung 4(rechts) sind schließlich die Grauwertedistanzen dargestellt. Bereiche hoher Grauwertedistanzen zeigen an, wo die Klassifikationsunsicherheit am größten und wo zusätzliche Stichproben entnommen werden sollten, um das Klassifikationsergebnis zu verbessern.

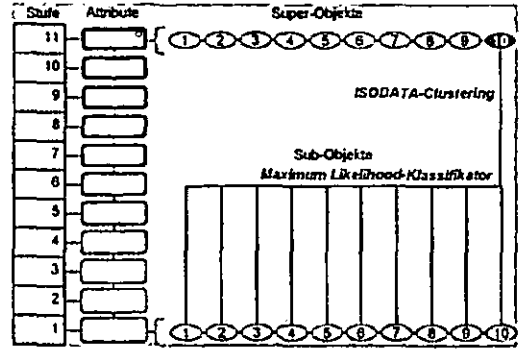


Abb. 3: Prinzip der Klassifizierung der Reliefpositionen



Abb. 4: Ergebnis der Maximum-Likelihood-Klassifizierung

### 3.3. Stellschrauben

Mit den Stellschrauben 'Attributtransformation' und 'Anzahl der Super-Objekte' können die Flächenanteile der Zielklassen und die Klassifikationssicherheit beeinflusst werden.

- Die Stellschraube 'Anzahl der Super-Objekte' wird durch die Wahl des hierarchisch übergeordneten Aggregationsniveaus bestimmt (vgl. Abb. 3). Je kleiner das Aggregationsniveau ist, desto größer ist die Anzahl der Super-Objekte und Stichproben, die in die Klassifikation mit eingehen. Dadurch verringert sich die Klassifikationsunsicherheit.
- Die Ausprägung des Reliefattributes  $MBI$  hinsichtlich der Werteverteilung im Merkmalsraum ist abhängig von der Transformation der Eingangsdaten  $f(h)$ ,  $f(n)$  und  $f(ht)$  (vgl. Friedrich, 1996; Möller, 2005). Je nach Attributtransformation ändern sich die Werte der in die Klassifikation eingehenden Stichproben. Damit können die Klassifikationsergebnisse an die Klassendefinitionen angepasst werden.

### Literatur

Benz, U., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., & Heynen, M. (2004). Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for gis-ready information. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 58, 239-258.

Dehn, M., Gärtner, H., & Dikau, R. (2001). Principles of semantic modelling of landform structures. *Computers and Geosciences*, 27, 1005-1010.

Friedrich, K. (1996). Digitale Reliefgliederungsverfahren zur Ableitung bodenkundlich relevanter Flächeneinheiten. *Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie D*, 21. Dissertation, Universität Frankfurt.

Gallant, J. & Dowling, T. (2003). A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping dispositional areas. *Water Resour. Res.* 39, 1347-1360.

MacMillan, R., Jones, R., & McNabb, D. (2004). Defining a hierarchy of spatial entities for environmental analysis and modeling using digital elevation models (dems). *Computers, Environment and Urban Systems*, 28, 175-200.

Möller, M. (2005). Disaggregation von Bodeninformationen auf der Grundlage digitaler Reliefdaten. In M. Möller & H. Helbig (Eds.), *GIS-gestützte Bewertung von Bodeninformationen - Datengrundlagen und Lösungsansätze* (pp. 67-89). Heidelberg: Wichmann.

# Geoelektrik zur Unterstützung der Standortkartierung von Rekultivierungsflächen – Erfahrungen aus der Praxis

Thomas Neumann

## 1. Bedeutung der Standortkartierung von Rohkippen im Rekultivierungsprozess

Die im Bergbauprozess hergestellten anthropogenen Kipp-Rohböden unterscheiden sich grundsätzlich von den gewachsenen Standorten. Die fehlenden bodenbiologischen Prozesse, die unterschiedlichsten bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften sowie die vorerst nicht vorhandene Grundwasserbeeinflussung setzen eine Neubewertung der Kippenstandorte vor der Inkulturnahme voraus. Die Kippenkartierung der Neulandflächen dient als Grundlage für:

- das Regulieren der pH-Werte und der Nährstoffversorgung der Substrate,
- die notwendige Bodenbearbeitung,
- den standortgerechten Pflanzenanbau,
- die Kontrolle der selektiven Gewinnung und Verkipfung kulturfähiger Substrate.

Bodenkundliche Standortuntersuchungen der Kippen und Halden sind im Land Brandenburg durch die "Richtlinie für die Wiedernutzbarmachung bergbaulich in Anspruch genommener Bodenflächen" der Bergbehörde geregelt. Die Einordnung der Standorterkundung in den Rekultivierungsprozess ist in /1/ beschrieben.

Bis zum Ende der 90-iger Jahre wurden die Rohkippen mittels 1 m tiefer Bohrstockerkundung und ausgewählter physikalisch-chemischer Analytik nach /2/ bewertet. Im Ergebnis wurden Kartierungseinheiten (Flächen mit annähernd gleichen physikalisch-chemischen Eigenschaften) zur weiteren Bearbeitung und standortgerechten Inkulturnahme ausgewiesen. Aufgrund der starken Heterogenität der Kipp-Substrate war eine genaue Abgrenzung teilweise schwer möglich.

## 2. Möglichkeiten und Grenzen der geoelektrischen Widerstandsmessungen von Lockergesteinen

Das Grundprinzip der geoelektrischen Widerstandssondierung besteht darin, dass über zwei Stromelektroden niederfrequenter Wechselstrom in den Boden gelangt, während mit zwei Messelektroden zwischen den beiden

äußeren Stromelektroden die sich einstellende Potentialverteilung ermittelt wird und als Spannungswert Aussagen zur Widerstandsverteilung im Boden erbringt.

Der für geoelektrische Messungen entscheidende petrophysikalische Parameter ist der spezifische elektrische Widerstand  $\rho^*$  (in  $\Omega\text{m}$ ) des Lockergesteins. Das Verhalten der spezifischen elektrischen Widerstände wird nach Militzer in /3/ hauptsächlich vom Porenvolumen und von den Eigenschaften der Porenfüllung (dem Grad der Wassersättigung und dem Elektrolytgehalt der Porenwässer) bestimmt. Lück et al. in /4/ sowie Martin in /5/ wiesen sehr enge Beziehungen zwischen Bodenwassergehalt und geoelektrischen Widerstand nach, so dass eine Interpretation im Hinblick auf bodenphysikalische Eigenschaften möglich ist. Weiterhin wurde in /5/ nachgewiesen, dass der Einfluss der Bodenlösungschemie (Kohle, Schwefel, Kalk) auf die geoelektrischen Widerstände gegenüber den Körnungseffekten zurücktritt. In /6/ ist dargestellt, dass sich die Geoelektrik für eine gute flächenhafte Darstellung der Rohkippe eignet.

## 3. Geoelektrische Widerstandsmessungen im Rahmen bodengeologischer Kippenkartierungen

Die Widerstandsmessungen wurden im Rahmen der bodengeologischen Kippenkartierung durch Große, Gesellschaft für Montan- und Bauwesen mbH im Herbst 2000 mit der tragbaren Kartierungsapparatur GE 100 (Geo Sys Leipzig) an der Rekultivierungsfläche W 32 (Abbildung) des brandenburgischen Tagebaus Welzow-Süd durchgeführt. Bei der Messung mit der symmetrischen Vierelektrodenanordnung nach WENNER wurde ein Abstand der Elektroden von 2 m (entspricht  $a = 2$ ) mit einer mittleren Eindringtiefe von 1 m gewählt. Es wurden in der Erprobungsphase Profile mit 10 m Punktabstand und 10 m Profilabstand (entspricht einem Messraster von 10 m x 10 m) untersucht. Aus den Messergebnissen sind mit der Software Microstation interpolierte Isoohmenkarten entstanden. Daraus lassen sich die Flächen gleicher geoelektrischer Widerstände farbig darstellen (in der folgenden Abbildung nur durch Grauabstufung erkennbar), die Aussagen über die Substratverteilung und -abgrenzung zulassen.

Parallel dazu ist an dieser Fläche eine „klassische Kippenkartierung“ durchgeführt worden. Durch den Kartierer sind in/7/ carbonathaltige Kippsande und Kipplehme ausgewiesen. Zusätzliche vergleichende Luftbildauswertungen und Nachuntersuchungen verdeutlichten die größere Genauigkeit der Substratabgrenzung durch die geophysikalische Untersuchung (siehe Abbildung).

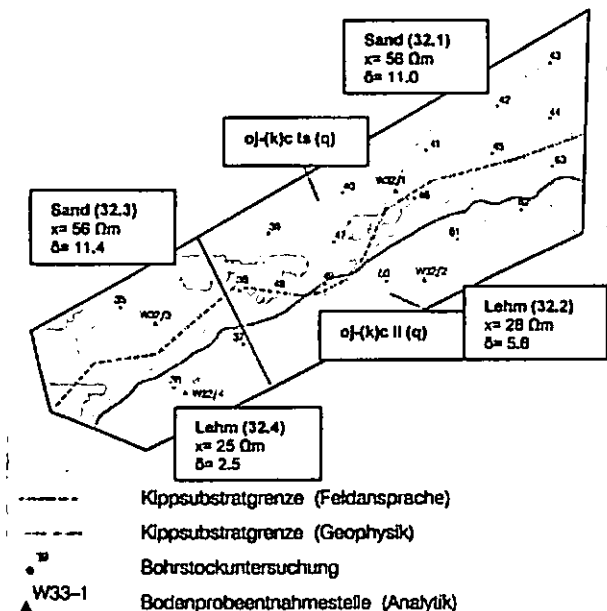


Abb.: Standortkartierung Tagebau Welzow-Süd, Fläche 32

Aus der Abbildung erkennbar ist:

- Die Sande weisen bei  $n = 81$  (Fläche 32.1) bzw.  $n = 46$  (Fläche 32.3) jeweils einen arithmetischen Mittelwert  $x$  von  $56 \Omega m$  auf und sind hellgrau bis weiß dargestellt. Die Standardabweichungen betragen  $11,0$  bzw.  $11,4$ .
- Die Lehme weisen bei  $n = 62$  (Fläche 32.2) bzw.  $n = 21$  (Fläche 32.4) arithmetische Mittelwerte von  $28$  bzw.  $25 \Omega m$  auf und sind dunkelgrau dargestellt. Die Standardabweichungen betragen  $5,6$  bzw.  $2,5$ .
- Es ist durch die flächenhafte Darstellung der geoelektrischen Widerstände eine deutliche Abgrenzung der bodenphysikalisch unterschiedlichen Areale erkennbar und möglich.
- Die Standardabweichung der Sande lässt auf eine größere Heterogenität (in der Abbildung durch Grauabstufung zu erkennen) schließen.

In Zeitraum 2001 – 2004 sind durch weitere geophysikalische Kippenuntersuchungen die Abhängigkeiten der Widerstände vom Wassergehalt bestätigt worden. In den trockenen Jahreszeiten können die geoelektrischen Widerstände insbesondere bei den sandigen Substraten deutlich über  $100 \Omega m$  ansteigen.

Auch der geringe Einfluss der Kalk- und Schwefelgehalte auf die geoelektrischen Widerstände wurde im Rahmen der Kippenkartierung 2001-2004 bestätigt. Als sehr schwierig erwiesen sich das Darstellen von bindigen Quartärsubstraten neben bindigen schwefelhaltigen Tertiärflächen. Die Widerstände lagen jeweils unter  $40 \Omega m$ .

Aus den vorliegenden Erkenntnissen und den praktischen Erfahrungen wurden für die Standorterkundung auf Rekultivierungsflächen der Vattenfall Europe Mining AG folgende Schlussfolgerungen abgeleitet:

- Die geoelektrische Widerstandsmessung eignet sich im Rahmen der bodenphysikalischen Flächenaufnahme zur Abgrenzung von sandigen und bindigen Arealen. Es ergibt sich bei heterogenen Verhältnissen, insbesondere auf Kippenflächen des Braunkohlebergbaus, eine bessere Abgrenzung der Kippsubstrate und damit eine höhere Repräsentanz der Gesamtaussage. Bodenarten lassen sich mit Hilfe der Widerstandsverteilung jedoch nicht ermitteln.
- Bei einem Messpunktraaster von  $20 m$  ergibt sich eine ausreichende flächenhafte Verteilung der scheinbaren spezifischen Widerstände. Daraus kann die Substratvariabilität und ein entsprechendes Beprobungsprogramm durch den Kippenkartierer abgeleitet werden.
- Der geringe Einfluss des Kalk-, Kohle- und Schwefelgehaltes und der Einfluss der Wassergehalte auf den geoelektrischen Widerstand lässt kein Abgrenzen substratsystematischer Einheiten zu. Die Geoelektrik kann die „klassische“ Kartierung nicht ersetzen.
- Mit der Kombination beider Verfahren wird eine Verbesserung der flächenhaften Aussagefähigkeit erreicht. Eine präzisere Substratabgrenzung für standortgerechte Bearbeitungen und Inkulturnahme ist möglich.

Seit 2003 wird die Geophysik als Vorerkundung inhomogener Rekultivierungsflächen bei der Vattenfall Europe Mining AG zunehmend genutzt.

Literatur:

1/ Neumann, Th., 1997: Gezielter Umgang mit kulturfähigen Substraten als Basis der Pedogenese in der Bergbaufolgelandschaft. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft Band 84, S. 33-36.  
 2/ Neumann, Th., Vogel, H., Matz, F., Klonschinski, R., 1996: Arbeitsanleitung zum bodengeologischen Kartierungsbericht, Lausitzer Braunkohle AG Senftenberg und GFE GmbH Berlin, unveröffentlicht.  
 3/ Mlitzer, H., 1981. Geophysikalisches Grundlagenpraktikum. Lehrbrief der Sektion Geowissenschaften, Bergakademie Freiberg, 218 S.  
 4/ Lück E. et al., 2000. Geophysik für Landwirtschaft und Bodenkunde. AG Stoffdynamik in Geosystemen im Umweltzentrum der Universität Potsdam, 159 S.  
 5/ Martin, N., 2004: Einfluss des Carbonat-, Kohle- und Wassergehaltes unterschiedlicher Substrate auf die geoelektrischen Eigenschaften von Kippsubstraten. BTU Cottbus, Diplomarbeit, 80 S.  
 6/ Lehnig, M. 1997: Einsatzmöglichkeiten von Geoelektrik und Georadar zur bodenphysikalischen Charakterisierung von Kippstandorten. BTU Cottbus, Diplomarbeit.  
 7/ Hanschke, L., 2000: Bodengeologischer Kartierungsbericht Welzow-Süd, Fläche W 32. Kartierungsbericht im Auftrag der Lausitzer Braunkohle AG Senftenberg, unveröffentlicht

## Räumliche Zuweisung und Extrapolation von Attributen der MMK in die BGK Thüringens

Schmidt, K.<sup>\*</sup>, Behrens, T.<sup>\*</sup>, Scholten, T.<sup>\*</sup>,  
Reinhardt, F.<sup>+</sup> & W. Brandtner<sup>+</sup>

### 1 Einführung und Problematik

Eine landesweite Ableitung von Informationen und Handlungsempfehlungen für den vorsorgenden Bodenschutz erfordern flächendeckende und detaillierte Bodendaten. In Thüringen liegt diesbezüglich als flächendeckender Datensatz die Bodengeologische Konzeptkarte (BGK) im Maßstab 1:100.000 vor. Sie enthält Sachinformationen zur Beschreibung unterschiedlicher in Thüringen vorkommender Leitbodenformen (RAU ET AL. 2000). Für viele Fragen des Bodenschutzes werden jedoch zusätzliche Informationen, insbesondere zum Substrat benötigt, wie sie z.B. in der Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkarte 1:100.000 (MMK) enthalten sind.

Die vorliegende Studie stellt vor diesem Hintergrund ein Verfahren vor, mit dessen Hilfe eine Zuweisung der Substratinformation bzw. des Standortregionaltyps der MMK in die BGK Thüringens vorgenommen werden kann.

Bei einer Überlagerung der Polygone (Abb. 1) der MMK mit den Polygonen der BGK ist eine weitgehende tendenzielle Übereinstimmung der Flächengeometrien festzustellen. Die hohe Übereinstimmung begründet sich in der gleichen Arbeitsgrundlage, die für die Erstellung der Kartenwerke verwendet wurde. Die Flächengeometrien der MMK-Polygone sind im Vergleich zur BGK jedoch nur auf Basis von relativ wenigen Stützpunkten digitalisiert worden, was im Allgemeinen zu groben Geometrien führt und der begrenzten Speicherkapazität in den 1980er Jahren geschuldet ist.

Darauf aufbauend kann, trotz der weitgehenden Übereinstimmung, keine Attributierung der BGK-Polygone durch bekannte Overlay-Analysen (Union/Intersect) im GIS erfolgen, ohne dass Artefakte in Form von Splitterpolygonen entstehen. Daher wurde eine Methode entwickelt, die nicht auf einer direkten Flächenverschneidung, sondern auf einer räumlichen Zuweisung der Attributinformation über die Flä-

chenschwerpunkte (Zentroide) basiert, ohne dass eine Veränderung der Geometrien notwendig wird.



Abb. 1: Ausschnitt der MMK (Graustufen) mit überlagerten BGK-Polygonen (Linien)

Einen weiteren Schwerpunkt der Studie bildet die Extrapolation der Substratinformation in die BGK-Polygone, für die keine direkte räumliche Zuweisung erfolgen konnte. Diese Polygone liegen meist in forstwirtschaftlich genutzten Flächen, da in diesen Fällen keine Informationen aus der MMK entnommen werden können. Die Extrapolation wurde auf der Grundlage der bereits attribuierten Flächen durchgeführt. Durch eine statistische Auswertung auf Basis der Leitbodenform wurde die Information in die BGK-Polygone extrapoliert, die nicht direkt attribuiert werden konnten.

### 2 Räumliche Zuweisung

Für die räumliche Zuweisung der MMK-Information sind im ersten Schritt die Zentroide der MMK-Polygone berechnet worden. Anschließend wurden über eine räumliche Abfrage alle Zentroide ermittelt, die innerhalb eines BGK-Polygons lokalisiert werden konnten. Unter Berücksichtigung, dass ein Polygon mehrere Zentroide enthalten kann, wurde die Attributinformation der drei Zentroide mit den größten Flächeninhalten für die weitere Analyse berücksichtigt. Für die Attributierung des entsprechenden BGK-Polygons wird die Attributinformation des flächengrößten, beteiligten Zentroids (1. Ordnung) verwendet. Fehlt die Information im ursprünglichen MMK-Polygon bzw. handelt es sich um einen forstwirtschaftlich genutzten

\* Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Geographie, Physische Geographie und Bodenkunde, Lößdergraben 32, 07743 Jena, Karsten.Schmidt@uni-jena.de

<sup>+</sup> Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Carl-August-Allee 8-10, D-99423, Weimar



Standort wird die Information des Zentroids mit dem zweitgrößten Flächeninhalt (2. Ordnung) der BGK-Fläche zugewiesen. Verfügt dieses ebenfalls über keine Attributinformation, wird die Information der drittgrößten Fläche (3. Ordnung) verwendet. Ist keine Attributierung der Information zum Standortregionaltyp bis zu diesem Schritt erfolgt, ist keine räumliche Zuweisung der Information über eine Zentroid-Polygonattributierung möglich. Aufgrund ihrer hohen Unsicherheit sind die Informationen von Zentroiden niedriger Ordnung nicht in die Analyse eingegangen.

Die nicht-attribuierten Polygone sind meist forstwirtschaftlichen Flächen zuzuordnen. Diese konnten im zweiten Schritt der Methode über eine Extrapolation der Attributinformation durch eine statistische Auswertung attribuiert werden.

### 3 Extrapolation

Die statistische Auswertung wurde auf Grundlage der Informationen zur Leitbodenform der BGK und den Informationen zum Standortregionaltyp der MMK berechnet, die über die Zentroide 1. Ordnung zugewiesen wurden. Die Information zur Leitbodenform lag flächendeckend für die Bodengeologische Konzeptkarte vor. Über die Berechnung der Häufigkeitsverteilung bzw. der Frequenz der zugewiesenen Standortregionaltypinformationen bezogen auf eine Leitbodenform konnte die wahrscheinlichste Information abgeleitet werden (Abb. 2). Auf Basis des Häufigkeitsdiagramms konnte eine Attributierung der nach der räumlichen Zuweisung noch vorhandenen Lücken über die Information mit der höchsten Zuordnungswahrscheinlichkeit durchgeführt werden.

### 4 Ergebnisse und Fazit

Über die räumliche Zuweisung und damit die schrittweise Einbindung der Information der MMK konnten 90% der Fläche der BGK direkt attribuiert werden.

Die aus der räumlichen Zuweisung resultierende Informationsdichte von 90 % konnte durch die statistische Extrapolation auf 100 Flächenprozent vervollständigt werden.

Durch diese Arbeit wurde gezeigt, dass eine Zuweisung der Attributinformation bei nicht-deckungsgleichen Bodenkarten, jedoch mit weit-

gehender Übereinstimmung der Flächengeometrien, möglich ist. Weiterhin konnte durch die Implementierung eines statistischen Verfahrens die Informationsdichte signifikant verbessert werden. Die daraus resultierende flächendeckende Information zum Standortregionaltyp in der BGK bietet die Möglichkeit die Informationen mit forstwirtschaftlichen Kartenmaterialien zu verifizieren und erweitert den Leistungsumfang der BGK durch zusätzliche Sachinformationen.

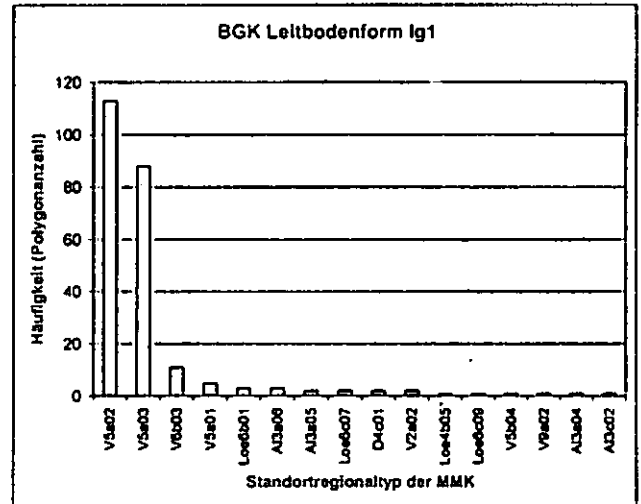


Abb. 2: Häufigkeitsverteilung der zugewiesenen Substratinformationen für die Leitbodenform Ig1: Schiefer / Grauwackenschutt (Auszug)

- V5a02: Berglehm - Schuttlehm und Bergsandlehm – Braunerde
- V5a03: Berglehm – Braunerde
- V6b03: Berglehm - Staugley und Braunstaugley)

### Literatur:

RAU, D., SCHRAMM, H. & J. WUNDERLICH (2000): Die Leitbodenformen Thüringens. Geowissenschaftliche Mitteilungen von Thüringen, Beiheft 3, 2. überarb. und erweiterte Auflage, Weimar.

## **Die räumliche Prognose von Einheiten der BK 50 Rheinland-Pfalz mittels Data Mining - Ein Verfahren zur Erstellung von Bodenkarten**

U. Steinrücken\*, T. Behrens\*\*, T. Scholten\*\*, M. Goldschmitt\*\*\*

Bodenkarten stellen für eine Vielzahl von Planungsverfahren und Risikoanalysen eine unverzichtbare Datengrundlage dar. Doch aufgrund der hohen Kosten- und Zeitintensivität bei der Erstellung dieser Karten, sind längst nicht alle Bundesländer flächendeckend in einem adäquaten Maßstab kartiert. Um in Rheinland-Pfalz in einem überschaubaren Zeitraum eine landesweite mittelmaßstäbige Bodenkarte zu erhalten, wurde die Kartierung Anfang der 90er Jahre auf den für Planungszwecke ausreichenden Maßstab 1 : 50.000 umgestellt. Im Lauf der letzten 15 Jahre konnte so nahezu der gesamte südwestliche Landesteil in der BK 50 Pfälzer Wald nach einheitlichem Kartierverfahren erfasst werden. Das Kartenblatt TK 6514 Bad Dürkheim-West lag in unzureichender Auflösung vor und musste überarbeitet werden. Die Neubearbeitung erfolgte unter ausschließlicher Verwendung vorhandener Geodaten und unter Zuhilfenahme prognostischer Methoden.

Eine Grundvoraussetzung für eine Prognose ist die Kenntnis der Beziehung zwischen dem Ausgangsmaterial der Bodenbildung, der räumlichen Verbreitung von Bodenformengesellschaften und dem Relief. Technisch gesehen kamen Künstliche Neuronale Netze zum Einsatz (Behrens et al. 2005; Behrens and Scholten 2005). Das Verfahren der Kartenerstellung verläuft primär rasterbasiert. Im letzten Schritt werden die Rasterzellen in Polygone umgewandelt. Die so erstellte Bodenprognosekarte wird vollständig digital erzeugt und enthält von Anfang an neben den Grenzlinien der Bodeneinheiten auch deren Flächeninhaltsbeschreibung.

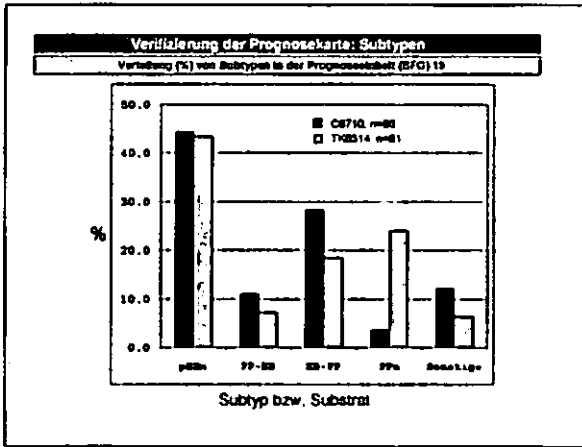
Für die Herleitung des Ausgangsmaterials der Bodenbildung fanden die Einheiten der Geologischen Karte 1:25 000 Blatt 6514 (unveröff. Manuskriptkarte des LGB, ca. 1914) Verwendung. Sie wurden analog zur BK 50 Pfälzer Wald zu petro-stratigraphischen (Substrat-) Einheiten aggregiert.

Das Erlernen der Polygonstruktur der räumlichen Verbreitung der Bodenformengesellschaften erfolgte an Hand der BK 50 Pfälzer Wald. Zur Beschreibung des Reliefs wurden 40 Reliefparameter aus dem Digitalen Geländemodell (DGM, LVerGeo Rheinland-Pfalz 2002) abgeleitet (Behrens 2003). Die Auflösung des DGM beträgt 20x20m. Zur Überprüfung der Prognose wurden 500 Bohrprotokolle, die aus dem Bereich des Untersuchungsgebietes vorlagen, verwendet.

Da für den Bereich der Tertiären Sedimente keine Lernflächen vorlagen konnte folglich keine Prognose erfolgen. Daher ergibt sich eine Flächendeckung von 93 % für die gesamte Blattfläche.

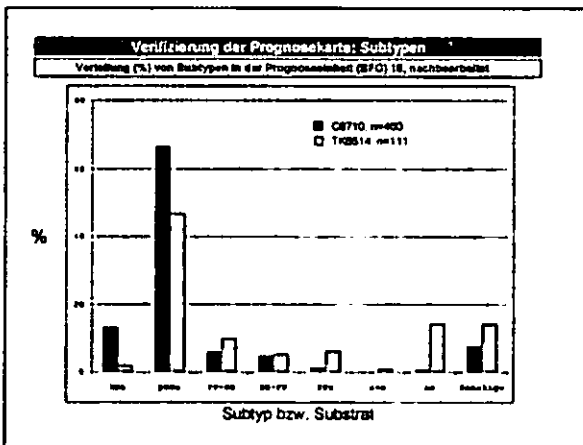
Die Überprüfung der Substratangaben der Prognosekarte mit Hilfe der Bohrprotokolle erbrachte in weiten Bereichen der Karte eine sehr gute Übereinstimmung. Abweichungen ergaben sich in den Kartenteilen, die von Verwerfungen durchzogen waren. Hier entsprachen die Petrografien der Bodenausgangssubstrate denen des Unteren Buntsandstein und nicht, wie ausgewiesen, denen der älteren Rehberg-Schichten. Daher musste örtlich eine händige Grenzlinienkorrektur erfolgen.

Die Verifizierung der Prognosekarte an Hand der Bodentypenansprache in den Bohrprotokollen zeigte ein unterschiedliches Ergebnis: Die Häufigkeitsverteilung der Bodentypen (Braunerde-Podsol-Gesellschaft) in den Einheiten der Steilhänge zeigt im Vergleich mit den Bohrprotokollen, die im Zusammenhang mit der Bearbeitung der BK 50 Pfälzer Wald auf dem Kartenblatt C6710 angefertigt wurden, eine sehr gute Übereinstimmung (s. Abb. 1).



**Abb. 1:** Häufigkeitsverteilung (%) von Podsol - Braunerde - Übergangsböden auf verschiedenen Kartenblättern (6514 (grau), c6710 (schwarz)) im Steilhang der Rehbergsschichten (BFG 19).

In den Verebnungsbereichen war teilweise eine Nachbearbeitung notwendig, um die expositionsbedingten Vorkommen von Podsolen und Braunerden zu unterscheiden. Nach dieser Regel wurde auch bei der Erstellung der BK 50 verfahren. Die Abb. 2 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Braunerde -Podsol - Übergangsböden für die Braunerdeeinheit der Verebnungsbereiche in den Rehberg-Schichten (BFG 10) nach der Nachbearbeitung.



**Abb. 2:** Häufigkeitsverteilung (%) von Podsol - Braunerde - Übergangsböden auf verschiedenen Kartenblättern (6514 (grau), c6710 (schwarz)) im Verebnungsbereich der Rehbergsschichten (BFG 19) nach der Herausnahme südlich und westlich exponierter Flächen.

Insgesamt ist das vorgestellte Verfahren sehr zeiteffizient und liefert bereits ohne Nachbearbeitung eine Konzeptkarte hoher Güte. Durch eine Expertenbasierte

Nachbearbeitung können mit den integrierten Ansatz aus Data Mining und Kartiererfahrung vollwertige und valide Bodenkarten zeit- und kosteneffektiv erstellt werden. Die Qualität einer Prognose hängt dabei von der Qualität der Geobasisdaten und von der Güte der Beziehung Polygonstruktur im Lerngebiet zu den anderen zur Verfügung stehenden Daten (z.B. DGM) ab. Sie liefern auf der Basis des DGM reproduzierbare, lagegetreue Rasterdaten oder Polygone mit Flächeninhaltsbeschreibung.

Zusammenfassend können Prognosen eine bodenkundliche Kartierung nicht ersetzen, jedoch deutlich beschleunigen und stellen eine ideale Grundlage für die Feldarbeit dar.

Literatur

Behrens, T., 2003. Digitale Reliefanalyse als Basis von Boden-Landschafts-Modellen – am Beispiel der Modellierung periglaziärer Lagen im Ostharz. Dissertation, Giessen.

Behrens, T., Förster, H., Scholten, T., Steinrücken, U., Spies, E.-D. und Goldschmitt, M., 2005 Digital soil mapping using artificial neural networks.- J. Plant Nutr. Soil Sci. 168(1), 21-33.

Behrens, T. und Scholten, T., 2005. A Comparison of Data Mining Techniques in Predictive Soil Mapping. In: Lagacherie, McBratney and Voltz (eds.) Elsevier Developments in Soil Science Series. Accepted.

- \* Soilution GbR, Illinger Straße 115, D-66265 Heusweiler. Kontakt: info@soilution.de
- \*\* Institut für Geografie Professur für Physische Geographie und Bodenkunde, FSU Jena
- \*\*\* Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, Emy-Roeder-Str. 5, 55129 Mainz

# Räumliche Variabilität ausgewählter Bodeneigenschaften und Standortpotenziale von Reiskulturlandschaften in SE-China

<sup>1</sup>Kay Sumfleth, <sup>2</sup>Björn Koop, <sup>3</sup>Prof. R. Duttmann, <sup>4</sup>Prof. B. Lennartz, <sup>5</sup>Yongcun Zhao

## Motivation und Zielstellung

Hauptziel des Projektes ist die Entwicklung von Transfermodellen zur räumlich differenzierten Abbildung von Boden- und Ertragsparametern auf der Feld- und der Landschaftsskala. Eine wesentliche Verbesserung gegenüber herkömmlichen Regionalisierungsverfahren soll dabei durch den Einbezug von hoch aufgelösten morphometrischen Daten aus digitalen Geländemodellen und aus Fernerkundungsdaten (u.a. Pflanzenwuchs- und Ertragseigenschaften) als Sekundärinformationen erreicht werden. Als besonders geeignet für die Parametrisierung bzw. Ableitung und Vorhersage von räumlichen Verteilungsmustern physikalischer und chemischer Bodeneigenschaften haben sich in den letzten Jahren Ansätze erwiesen, in denen die Bodeneigenschaften mit Fernerkundungsdaten und morphometrischen Parametern oder Indices in Beziehung gesetzt werden McBRATNEY et al. (1991), ODEH et al. (1991, 1995).

## Sampling Strategie und Testgebiet

Die Bodenaufnahme erfolgte im Feld- und Landschaftsmaßstab (Zielmaßstab 1: 15.000 bis 1: 20.000), wobei für die Landschaftsskala Catenen folgend mit Bohrrastern von 150 m x 150 m die Sampling Strategie festgelegt worden ist. Fünf Hauptcatenen wurden mittels GPS vermessen und ebenfalls catenar beprobt. Insgesamt wurden 18 Catenen mit ca.300 Bohrpunkten angelegt.

Die Aufnahmestandorte wurden mittels GPS vermessen und in eine Geo-Datenbank überführt. Die Böden sind nach FAO klassifiziert, die Beprobungstiefen wurden diagnostisch ermittelt. Die Aufnahme von Vegetationsparametern umfasste die Entnahme von Schnittproben für den Korntrag und

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Physische Geographie, Landschaftsökologie und Geoinformation, CAU Kiel, sumfleth@geographie.uni-kiel.de

<sup>2</sup>Institut für Landnutzung, Universität Rostock, bjoern.koop@uni-rostock.de

<sup>3</sup>Lehrstuhl für Physische Geographie, Landschaftsökologie und Geoinformation, CAU Kiel, duttmann@geographie.uni-kiel.de

<sup>4</sup>Institut für Landnutzung, Universität Rostock, bernd.lennartz@uni-rostock.de

<sup>5</sup>Institut of Soil Science, CAS China

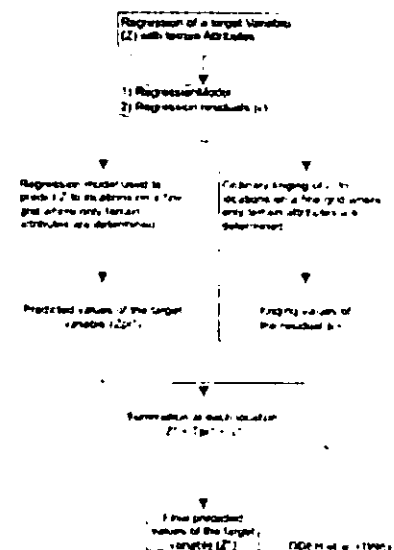


Figure 1: Methodik des Regression Krigings

die trockene Biomasse, darüber hinaus sind unterschiedliche Reissorten vor Ort ermittelt worden.

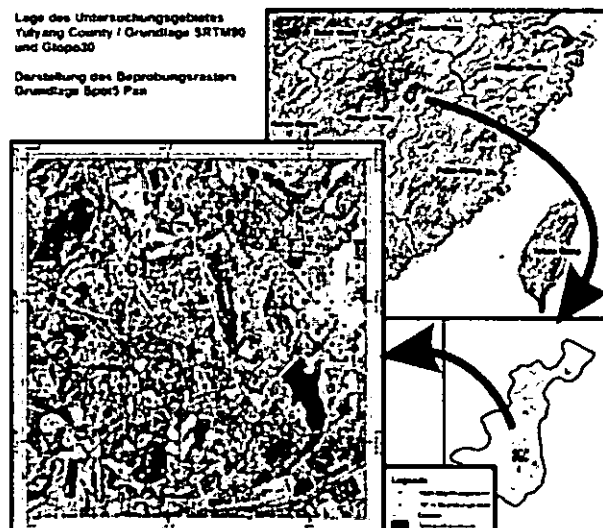


Figure 2: Lage des Untersuchungsgebietes

## Methodik

Eine bedeutende Information zur Erfassung von Bodenheterogenitäten bilden die aus der Kombination verschiedener Spektralkanäle berechneten Vegetationsindices (u.a. NDVI, RVI, NDGI sowie der SAVI). So hat sich in der Vergangenheit gezeigt, dass sich der NDVI als geeigneter Indikator für die Bestandsdichte und -höhe sowie die "Grünheit" der Pflanzenoberfläche verwenden lässt und eng mit dem bodenbürtigen Ertragspotenzial, der oberirdischen Pflanzentrocken- und Frischmasse und dem LAI korreliert.

Als weitere Zusatzinformation zur Schätzung der

räumlichen Verteilung von Bodeneigenschaften (u.a. Ton-, Sand- und Schluffgehalt, org. Substanz) werden Digitale Geländemodelle unterschiedlicher Auflösung (ASTER, SPOT5) genutzt. Die verschiedenen abgeleiteten Reliefparameter (z.B. CTI, TWI, Wölbungsformen und -richtungen, Relieflage) sollen für das Abbild catenarer Abfolgen von Bodeneigenschaften herangezogen werden. Es werden geostatistische Analysen zur quantitativen Kennzeichnung der räumlichen Variabilität von Boden- und Ertragsparametern sowie zur Ableitung typischer Variogrammkenneiwerte genutzt (u.a Reichweiten der räumlichen Korrelation der untersuchten Bodenparameter; vgl. SUN-OK et al., 2002; BAKHSH et al., 2000; McBRATNEY & PRINGLE, 1997; BURROUGH, 1983).

### Analyse Catena A

Erste Ergebnisse der Satellitbildinterpretation zeigen bereits vermutete reliefabhängige Verteilungsmuster des NDVI's. Die relativen Höhenlagen (Upland-Paddy-Fields) weisen im Gegensatz zu den niederen Bereichen (Deposits) geringere Kornträge auf. Die Häufigkeitsverteilung des Kornertes (Catena A) zeigt eine deutliche linksschiefe Häufigkeitsverteilung (Schiefe  $s=-0.7$ ). Catena A erreicht einen durchschnittlichen Kornertag von ca. 480 g/qm.

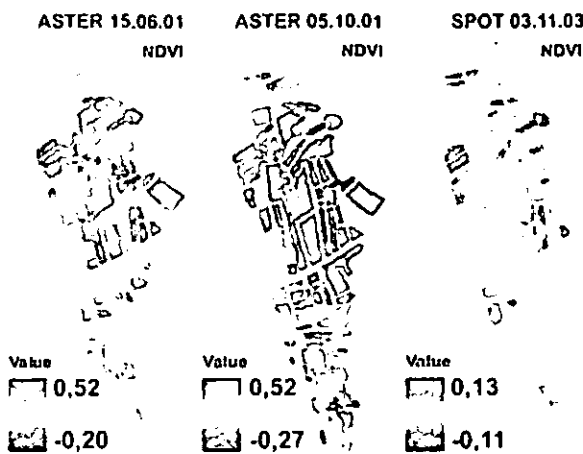


Figure 3: Verteilung des NDVI'S

### Ausblick

Im Rahmen der weiteren Arbeiten soll untersucht werden, inwieweit die auf der Grundlage von 300 punktuell erfassten Bodendaten unter Heranziehung morphometrischer Schlüsselparameter und der aus Satellitenbildern abgeleiteten Vegetationsindizes auf die Feld- und Landschaftsskala übertragbar sind.

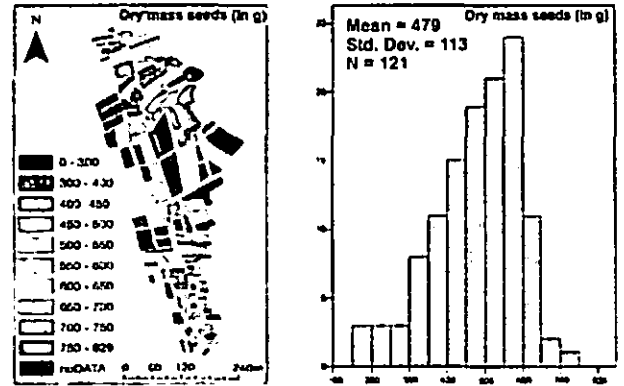


Figure 4: Kartierte Kornträge der Catena A

Darüber hinaus wird die Entwicklung eines GIS-gestützten Regionalisierungsverfahrens zur räumlich differenzierten Abschätzung des bodenbürtigen Ertragspotenzials in paddy-soil-Landschaften auf der Grundlage bodenkundlicher, morphometrischer und radiometrischer Basisdaten angestrebt. Die Konstruktion von Bodenkarten für Landschaften mit einer geringen Dichte an bodenkundlichen Grundlagendaten durch Integration morphometrischer Daten aus DGM's und räumlich differenziert erfassbaren Ertragsverteilungen aus Satellitenbildern ist gerade für Länder wie China von erheblicher Bedeutung, da der Kosten- und Zeitaufwand für die Gewinnung flächenhafter bodenkundlicher Grundlagendaten auf diese Weise optimiert werden kann.

### Literatur

Bakhsh, A. Jaynes, D.B. Colvin, T.S. and Kanwar R.S.: 2000, Spatio-temporal Analysis of Yield Variability for Corn-Soybean Field in Iowa. Transactions of the ASAE Vol 43(1), 31 - 38.

Burrough P.A. Multiscale sources of spatial variation in soil: II. A non-Brownian fractal model and its application in soil. J. Soil Sci.: 1983, 34, 599 - 620.

McBratney, A.B., G.A. Hart, and D. McGarry: 1991, The use of region partitioning to improve the representation of geostatistically mapped soil attribute, J. Soil Sci. 42, 249 - 263.

McBratney, A.B. and M.J. Pringle.: 1997, Spatial variability in soil implications for precision agriculture. Precision Agriculture 1997, 3 - 31.

Odeh, I.O.A.; Chittleborough, D.J.; McBratney, A.B.: 1991, Elucidation of soil-landform interrelationships by canonical ordination analysis, Geoderma 49, 1 - 32.

Odeh, I.O.A., A.B. McBratney, and D.J. Chittleborough: 1995, Further results on prediction from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging, Geoderma 67, 215 - 236.

## Altlastenbearbeitung – Grenzfälle der Gütigkeit hydraulischer Zustandsfunktionen Prüfen und Parametrisieren

D. Swaboda<sup>1</sup>, R. Giese<sup>1</sup>, L. Clausnitzer<sup>2</sup>, S. Lenk<sup>2</sup>

Eine prozessorientierte Sickerwasserprognose und die Einbeziehung natürlicher Rückhalte- und Reinigungsprozesse in der Altlastensanierung („natural attenuation“) erfordern Kenntnisse zum Wasser- und Stofftransport und die hydraulische Charakterisierung anthropogener Böden oder technogener poröser Materialien. Altlastentypische Materialien (mit organischen Stoffen belastete Böden, Recyclingmaterialien – Stoffgemische undefinierter Zusammensetzung, Rückstände der Metallurgie oder Müllverbrennung (Schlacken und Aschen)) weisen i.allg. heterogene, von natürlichen Böden abweichende hydraulische Eigenschaften auf, so dass die Übertragbarkeit und Anwendbarkeit hydraulischer Zustandsfunktionen natürlicher Böden in der Altlastenbearbeitung einer Überprüfung im Einzelfall bedarf. Eine Möglichkeit die Anwendbarkeit hydraulischer Modellfunktionen zu prüfen, die Durchführung von „Multi-Step-Flow“-Experimenten wird im Folgenden vorgestellt.

### Versuchstechnik – pF-Anlage

Für die Durchführung standardisierter „Multi-Step-Flow“-Experimente wurde ein automatische druckgesteuerte Bodenversuchsanlage aufgebaut und konzeptionell weiterentwickelt. Die Technologie baute auf Vorarbeiten des DGFZ, die z.B. in (NITSCHKE, 1992; KEMMESIES, 1995) dokumentiert sind, auf. Die Versuchsanlage ermöglicht die simultane Durchführung von bis zu 6 „Multi-Step-Flow“-Experimenten (IN-Anordnung) sowie Versuchsanordnungen zur Durchführung von Fließgleichgewichtsexperimenten (ungesättigte Experimente mit zu- und abströmender Wasserphase; IN-OUT-Anordnung, ohne Abb.). Jeder Messplatz besteht, wie in Abb. 1 dargestellt, aus einem druckfesten Probenbehälter, einer Wägezelle zur Registrierung des Probenausflusses und einer Schlauchpumpe. Der Kapillardruck wird durch Druckbeaufschlagung der Gasphase bei druckloser Wasserphase (Druckverfahren) relativ zum Luftdruck in einem Druckbereich von  $p_c = 0 \dots 15$  bar eingestellt. Die Druckluftversorgung der 6 Einzelstränge erfolgt zyklisch alle 3 min durch 5 Proportionalventile mit einer Genauigkeit von 10% vom Messwert. Die technische Umsetzung der Anlage inkl. der Entwicklung der Steuerungssoftware und der Visualisierung sowie der Datenübergabe an die Datenbank zur Versuchsplanung und Auswertung (front-end) wurde im Rahmen einer Geräteentwicklung realisiert. Eine detaillierte Beschreibung der technischen Komponenten ist in (LENK, S. 2004) dokumentiert. Untersucht werden ungestörte,

wassergesättigte Stechzylinderproben, die an der Unterkante mit einem hydrophilen Nylonseparator in Kontakt gebracht werden (Kontaktmaterial Quarzmehl). Der Wassergehalt wird aus den Phasendichten und deren Massenanteilen berechnet.

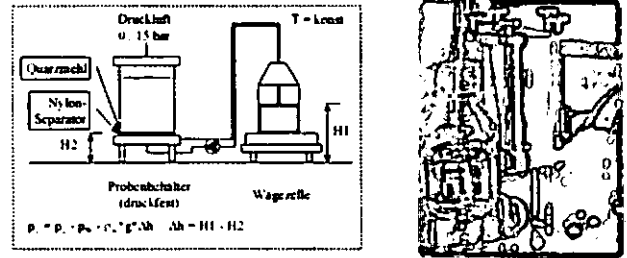


Abb. 1 links: schematische und rechts: fotografische Darstellung der IN-Versuchsanordnung

Gegenstand der Versuchsanlage sind neben der Versuchssteuerung und -überwachung, die Versuchsplanung und -auswertung in Form eines „Expertensystems“. Zentrales Element des Systems stellt eine auf MS Access<sup>®</sup> 2000 basierte Datenbank dar, die als Schnittstelle zu externen Auswerte- und Steuerprogrammen mit MS VB 6.0 automatisierte Formulare bereitstellt. Ausgewertet werden (Quasi-) Gleichgewichtszustände am Ende der Druckstufen (RETC-Fit) und dynamische Zustände (numerische Modellierung mit HYDRUS-1D) von „Multi-Step-Flow“-Experimenten. Für gut entwässerbare Böden ist es somit möglich die pF-Funktion an Stützstellen direkt zu ermitteln und die Anwendbarkeit der Modellfunktion der hydraulischen Leitfähigkeit unabhängig zu prüfen.

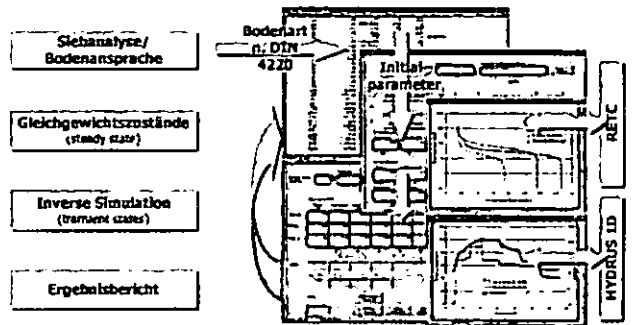


Abb. 2 Darstellung der Versuchsauswertung mit integrierten Datenbankanwendungen

### Anwendungsbeispiele

#### Vergleichsuntersuchungen

Als Beispiel praktischer Anwendung der pF-Versuchstechnik werden Untersuchungen zum „Schadstoffrückhalt in Bergbau- und Erzaufbereitungsaltlasten durch selbstdichtende Krustenbildung“ (BMBF-F&E-Projekt der BGR) vorgestellt und diskutiert. Ziel interdisziplinärer Forschung ist es, kausale Prozesse der Krustenbildung und deren Randbedingungen zu identifizieren, mit dem Einsatz kalibrierter geochemischer Modelle zu prognostizieren um die Ergebnisse in Aktivmaßnahmen zur Stimulierung von ENA-Prozessen zu überführen. Die hydraulische Barrierewirkung der 30...50 cm mächtigen Krusten wird durch

<sup>1</sup> Dietrich Swaboda, Ronald Giese, Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V., Meraner Str. 10, 01217 Dresden.

<sup>2</sup> Lutz Clausnitzer, S. Lenk, Systemanalyse und Automatisierungsservice GmbH, Rippiener Str. 1, 01728 Possendorf.

geoelektrische Messungen an Halden und durch Laborexperimente untersucht. Dazu wurden ungestörte Proben des Haldenausgangsmaterials und etablierte Krusten (Halde Salzgitter, Feineisenhalde / Hochofenschlacke) mit der pF-Versuchstechnik vergleichend untersucht. Erste Ergebnisse zeigen ähnliche hydraulische Eigenschaften von Ausgangsmaterial und Kruste, so dass, entgegen der anfänglichen Hypothese einer abdichtenden Wirkung von Krusten, die Barrierewirkung durch Änderung der hydraulischen Eigenschaften (z.B. infolge Poren-Clogging) allein nicht erklärt werden kann. Weitere Prozesse, insbesondere die Bildung von Kapillarsperren zwischen verfestigter, hochporöser Kruste (Porosität  $\phi \approx 60$  Vol.-%, davon 20 Vol.-% hygroskopischer Wasseranteil) und lockerem Ausgangsmaterial sind als mögliche Ursachen der Barrierewirkung von Krusten zu prüfen.

**Makroporen**

Die Identifizierbarkeit bimodaler pF-Funktionen an „Multi-Step-Outflow“-Experimenten wurde von DURNER et al. (1999) nachgewiesen. Praktische Bedeutung haben bimodale Funktionen für die Simulation des Makroporeneinflusses (ŠIMŮNEK, 2003). Exemplarisch wird die Anwendung flexibler pF-Funktionen an gröbstrukturierten Materialien mit dem in HYDRUS 1D implementierten Parametermodell von DURNER et al. (1999) für  $k = 2$  demonstriert.

$$S(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \sum_{i=1}^k \omega_i \frac{1}{(1 + |\alpha_i h|^{n_i})^{m_i}} \quad m_i = 1 - 1/n_i$$

$$K(\theta) = K_s \left( \sum_{i=1}^k \omega_i S_i \right)^l \frac{\left( \sum_{i=1}^k \omega_i \alpha_i \left[ 1 - (1 - S_i^{1/n_i})^{m_i} \right] \right)^2}{\left( \sum_{i=1}^k \omega_i \alpha_i \right)^2} \quad l = 0,5$$

Die Funktionen der Wassersättigung  $S(h)$  bzw. des Wassergehalts  $\theta(h)$  werden aus der Überlagerung zweier pF-Funktionen gebildet und über die Faktoren  $\omega_i$  gewichtet. Für die Berechnung von  $\theta(h)$  sind die Bereichsgrenzen des Mobilitätsbereichs: residualer Wassergehalt  $\theta_r$  und Wassergehalt bei Sättigung  $\theta_s$  vorzugeben. Die Formparameter  $\alpha_i$  und  $n_i$  für jede sub-pF-Funktion werden analog zum Model MUALEM/VAN GENUCHTEN (MVG) definiert.

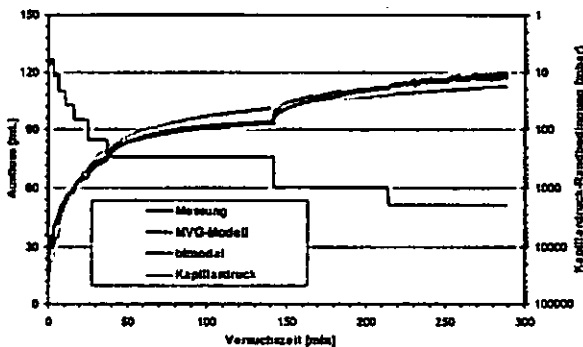


Abb. 3 Vergleich MVG-Model – bimodale pF-Funktion

Experimentell untersucht wurden ungestörte, stark heterogene Proben (klüftiger, verwitterter Bundsandstein) mit einem erheblichen Feinkorn- und Skelettanteil (T/U/S/G

[%]: 17/8/55/20). Die Ausflusskurve des „Multi-Step-Flow“-Experiments konnte, wie in Abb. 3 dargestellt, mit der flexiblen bimodalen Funktion sehr gut gefittet werden. Die höhere Flexibilität der hydraulischen Funktion ist hier, wie der Vergleich mit dem Ergebnis des MVG-Modell verdeutlicht, zur korrekten Modellabbildung bei hohen Kapillardrücken  $p_c > 150$  mbar erforderlich.

**Zusammenfassung**

Die Planung, Durchführung und Auswertung von „Multi-Step-Flow“-Experimenten wurde durch eine automatisierte Versuchsanlage mit integrierten Datenbankanwendungen effektiviert, sowie die Langzeitstabilität der Versuchstechnik und die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse durch Einsatz einer Steuerung mit zugehöriger Visualisierung optimiert. Damit wurden Voraussetzungen für belastbare Vergleichsuntersuchungen mit ausreichend hoher Probendichte und statistischer Sicherheit geschaffen. Dies wurde exemplarisch an Untersuchungen zur Krustenbildung der Halden der Bergbau- und Erzaufbereitungsalasten demonstriert. Für Vergleichsuntersuchungen werden gute Einsatzchancen der Versuchstechnik gesehen.

Makroporen konnten im bench-scale an ungestörten Stechzylinderproben anhand von „Multi-Step-Flow“-Experimenten identifiziert und mit bimodalen pF-Funktionen charakterisiert werden.

Für die Skalierung grober Strukturen in den Feldmaßstab sind Konzeptionen und praktikable Lösungen zu finden. Grundlagen dazu wurden auf der Basis von Strukturanalysen von Roth et al. (1999) gelegt.

**Danksagung**

Die Autoren bedanken sich beim BMBF (02WP0197), EFRE und beim Land Sachsen für die Förderung der Arbeiten.

**Literatur**

KEMMESIES, O. (1995): Prozeßmodellierung und Parameteridentifikation von Mehrphasenströmungsprozessen in porösen Medien. Dissertation, Proceedings des DGFZ e.V., H. 7.  
 LENK, S. (2004): Bedienungsanleitung, Entwicklungsbericht Prototyp MSF- 6, SAAS GmbH.  
 NITSCHKE, C., LUCKNER L. UND VAN GENUCHTEN M.Th. (1992): An Expert System for Planning, Controlling and Analyzing Laboratory Measurements of Soil Hydraulic Properties. Proceedings of International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of unsaturated Soils, Riverside, California, edited by M.Th.van Genuchten, F.J.Leij und L.J.Lund.  
 DURNER, W., PRIESACK, E., VOGEL, H.-J., ZURMÜHL, T. (1999): Determination of parameters for flexible hydraulic functions by inverse modelling. In: van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., Wu, L. (Eds.), Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, University of California, Riverside, CA, pp. 817-829.  
 ROTH, K., H.-J. VOGEL AND R. KASTEEL (1999): The scaleway: A conceptual framework for upscaling soil properties, in: Modelling of Transport Processes in Soils, edited by J. Feyen and K. Wiyu, Wageningen Pers, Wageningen, NL.  
 ŠIMŮNEK, J. (2003): Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone, in: J. Hydrol. 272, pp. 14-35.