

Boden und Messverfahren – Aktuelle Entwicklungen

Beiträge zum Diskussionsforum Bodenwissenschaften
am 28. Oktober 2011

Heft 11

Boden und Messverfahren – Aktuelle Entwicklungen

Beiträge zum Diskussionsforum Bodenwissenschaften

am 28. Oktober 2011

Hochschule Osnabrück

Fakultät Agrarwissenschaften & Landschaftsarchitektur

Master-Studiengang Bodennutzung und Bodenschutz

Heft 11

Impressum

Diskussionsforum Bodenwissenschaften, Heft 11 (2011):

Boden und Messverfahren – Aktuelle Entwicklungen

Herausgeber:

Hochschule Osnabrück

Fakultät Agrarwissenschaften & Landschaftsarchitektur

Am Krümpel 31

49090 Osnabrück

Telefon: 0541-969-5110

Telefax: 0541-969-5170

E-Mail: al@hs-osnabrueck.de

Internet: <http://www.al.hs-osnabrueck.de>

Redaktion:

Prof. Dr. Rüdiger Anlauf (r.anlauf@hs-osnabrueck.de)

Prof. Dr. Helmut Meuser (h.meuser@hs-osnabrueck.de)

Für den Inhalt der Einzelbeiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

Vorwort

Das Diskussionsforum Bodenwissenschaften 2011 trägt den Titel „Boden und Messverfahren – aktuelle Entwicklungen“.

In nahezu allen Bereichen der Bodenkunde entwickeln sich die Feld- und Labormessverfahren ständig weiter. Neue, präzisere und häufig auch leichter anwendbare Techniken werden erfunden, in Testreihen erprobt und anschließend, wenn sie Marktreife erhalten haben, von Fachleuten ingenieurtechnischer und wissenschaftlicher Einrichtungen eingesetzt.

Das diesjährige Bodenforum will einige dieser Weiterentwicklungen in der Breite der unterschiedlichen bodenkundlichen Handlungsfelder vorstellen und diskutieren. Beispielhaft sollen mit Schwerpunkt auf die landwirtschaftliche Bodenforschung die Nah-Infrarot-Spektroskopie und on-line-Messverfahren zu Leitfähigkeit und pH-Wert vorgestellt werden. Weiterentwickelte Schnell-Testverfahren für Nähr- und Schadstoffe in Boden und Grundwasser, die in allen Bereichen der Bodenkunde von Bedeutung sind, sollen ebenso präsentiert werden. Verfeinerte Sensortechniken aus dem Bereich der Bodenhydrologie sowie in-situ-Sensortechniken, die auf dem Feld der Grundwassersanierung angewendet werden, bilden einen weiteren Schwerpunkt des Bodenforums.

Über die Vorträge, für die wir Referenten aus namhaften Einrichtungen gewinnen konnten, hinaus werden im Rahmen des Forums die unterschiedlichen Verfahren, Techniken und Geräte demonstriert, so dass sich die Teilnehmer direkt vor Ort davon ein Bild machen können und mit den Anbietern bzw. Anwendern Kontakt aufnehmen können.

Wir bedanken uns bei den Vortragenden und Autoren der Fachbeiträge, die im Folgenden aufgeführt sind, sowie bei der Hochschule Osnabrück, Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur, für die Unterstützung zur Durchführung des diesjährigen Bodenforums.

Osnabrück, Oktober 2011

Prof. Dr. A. Anlauf / Prof. Dr. H. Meuser

Anschriften der Referenten

Dipl.-Ing. (FH) Anne Borchert Hochschule Osnabrück
Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur
Am Krümpel 31
49090 Osnabrück
E-Mail: a.borchert@hs-osnabrueck.de

Dr. Axel Don Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)
Institut für Agrarrelevante Klimaforschung
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
E-Mail: axel.don@vti.bund.de

Dr. Stefan Hinck Hochschule Osnabrück
Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur
Am Krümpel 31
49090 Osnabrück
E-Mail: hinck@farmsystem.de

Dr. Stephan Hüttmann Sensatec GmbH
Anlagenbau / Grundwassersanierung / Prozesstechnisches
Labor / Sensorik
Friedrichsorter Str. 32
24159 Kiel
E-Mail s.huettmann@sensatec.de

Carolin Klein

Merck Millipore

Lab Essentials Marketing & Product Management

Product Management Water & Food Analytics

Frankfurter Str. 250

64293 Darmstadt

E-Mail: Carolin.Klein@merckgroup.com

Dr. Thomas von Oepen

UP GmbH

F+E Produktion

Bockradener Strasse 52b

49477 Ibbenbüren

E-Mail: t.vonoepen@upgmbh.com

Inhaltsverzeichnis

Was bietet die Nah-Infrarot-Spektroskopie für die Bodenkunde	1
<i>Dr. Axel Don</i>	
Einsatz von In-Situ-Sensortechnik für Grundwasseruntersuchungen und Grundwassersanierung	7
<i>Dr. Stephan Hüttmann</i>	
Analytik chemischer Parameter im Boden und (Grund)wasser – zuverlässig und effizient	12
<i>Carolin Klein</i>	
Online-Messung von geoelektrischer Leitfähigkeit und Boden-pH-Werten	15
<i>Dr. Stefan Hinck, Anne Borchert</i>	
Neue Sensoren und Datenerfassung in der Bodenhydrologie	34
<i>Dr. Thomas von Oepen</i>	

Was bietet die Nah-Infrarot-Spektroskopie für die Bodenkunde

Axel Don

1 Nah-Infrarot-Spektroskopie - eine sich schnell entwickelnde Analysemethode

Die Nah-Infrarot-Spektroskopie (NIRS) hat sich durch die technischen Entwicklungen der Spektrometer und der Kalibrierungsmethoden in den Jahrzehnten zu einer Methode entwickelt, die ausgehend von der Agrarforschung in immer mehr Bereichen Anwendung findet (Norris *et al.*, 1976, Agelet *et al.*, 2010). NIRS wird heute zur Qualitätskontrolle und Analytik z.B. in der Pharmazie, Polymerchemie, Petrochemie oder Textilindustrie eingesetzt und hat in den letzten Jahren auch in der Bodenkunde immer mehr Anwender gefunden (Abb. 1). Die NIRS verspricht eine kostengünstige Alternative für herkömmliche Analyseverfahren zu sein und dabei fast sämtliche physiko-chemischen Bodenparameter abschätzen zu können, angefangen vom Humusgehalt und –qualität, Stickstoffgehalt, Wassergehalt bis hin zu Textur und pH-Wert (Chang *et al.*, 2001, Gillon *et al.*, 1999, Terhoeven-Urselmans *et al.*, 2006).

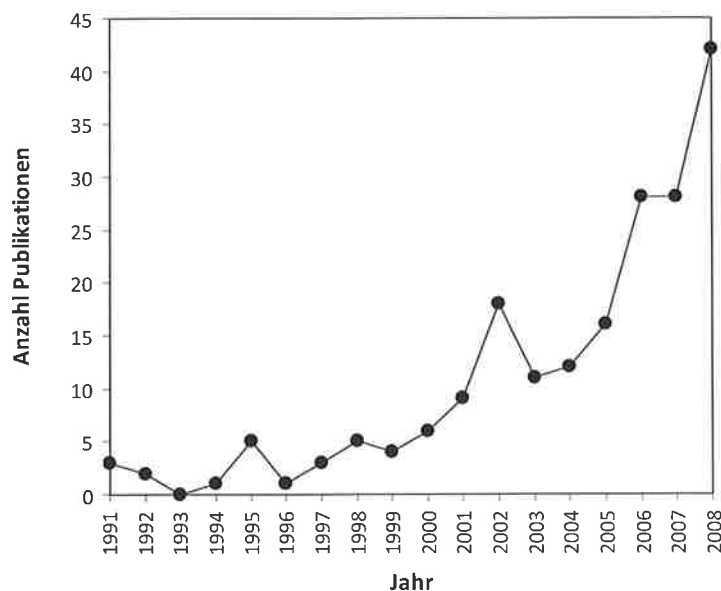


Abbildung 1: Anzahl der *peer-reviewed* Publikationen zum Thema NIR und MIR in der Bodenkunde (nach Bellon-Maurel *et al.*, 2011)

Im Vergleich zu anderen Anwendungsbereichen von NIRS hat man es bei der Bodenanalyse nicht nur mit einer komplexen, heterogenen Matrix zu tun, sondern auch mit zu bestimmenden Parametern, deren Gehalte oft nur im Spurenbereich liegen. Während z.B. der Proteingehalt von Getreide zwischen 10 und 15 % liegt, liegt der Gesamtstickstoffgehalt in Mineralböden meist unter 0,5 %. Dadurch ergeben sich besondere Anforderungen an Probenvorbereitung, Messung und Kalibration für die NIRS-Analysen von Bodenproben.

2 Vom NIR-Spektrum zum Bodenparameter

Die NIRS von Bodenproben erfolgt als Messung der diffusen Reflexion von NIR-Licht in einem Wellenlängenbereich von 750 bis 2500 nm, oft zusammen mit dem Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts (VIS-NIR). NIRS ist abhängig von einer guten Referenzanalytik und Kalibrationsmodellen, die die NIR-Spektren mit einer oder mehreren Parametern der Bodenprobe korrelieren (Agelet *et al.*, 2010). Ohne entsprechende Referenzanalytik sind NIR-Spektren kaum interpretierbar, da sie das Ergebnis von Obertonschwingungen sind, die sich weit überlagern. Einzelne Peaks lassen sich keiner Substanz oder Substanzklasse eindeutig zuordnen, sondern das gesamte NIR-Spektrum muss mit statistischen, sog. chemometrischen Modellen in einen Bodenparameter „übersetzt“ werden (Kalibration). Für die Kalibration von Boden-NIRS wird meist die Partielle-Kleinst-Quadrat-Regression (PLS) oder Hauptkomponentenzerlegung (PCA) genutzt, aber auch neuronale Netzwerke und andere selbstlernende Algorithmen wie *boosted regression trees* kommen zum Einsatz (Brown *et al.*, 2006). Es gibt kein standardisiertes Verfahren für Kalibrationen, z.B. zum Umgang mit Ausreißern. Ausreißer bei den Spektren oder bei der Referenzanalytik haben einen großen Einfluss auf die Qualität der Kalibration. Das Aussortieren von allen Ausreißern gefährdet aber die Repräsentativität der Kalibration.

Für die Spektrenvorbehandlung stehen eine ganze Reihe Verfahren zu Verfügung, die das Signal-zu-Rauschen-Verhältnis verbessern können. Dabei kommen Methoden zur Korrektur der Basislinie, Normalisierungen, Ableitungen und verschiedene mathematische Filter und Glättungsalgorithmen zum Einsatz. Diese Datenvorbehandlung kann sehr nützlich sein, ist aber immer ein Abwägen zwischen dem mit jeder Spektrenbehandlung verbundenen Datenverlust und einer Reduzierung von Rauschen im Datensatz. Besonders die erste Ableitung ist als Datenvorbehandlung für NIR-Spektren von Bodenproben oft erfolgreich und

wird angewendet, um die unterschiedliche Packungsdichte der Bodenproben auszugleichen. Weiterhin hängt das Kalibrationsmodell von der Anzahl der Komponenten (bei PLS und PCA) ab, durch die es bei zu hoher Komponentenzahl leicht zu einer Überparametrisierung des Datensatzes kommt. Ein überparametrisiertes Modell lässt sich nicht mehr auf andere Datensätze anwenden und ist daher für die Parameterabschätzung unbrauchbar. Aber auch robuste Kalibrationsmodelle sind nur eingeschränkt zwischen Laboren, Geräten und verschiedenen Grundgesamtheiten von Proben übertragbar. Es ergibt sich also immer wieder die Frage nach einem globalen Kalibrationsmodell, das über Labore hinweg für alle Bodentypen und Ökosysteme Gültigkeit hat und auf einem ausreichend großen Datensatz basieren müsste. Im Gegensatz dazu kann der Kalibrationsfehler auch gesenkt werden durch Teilung des Probensets in mehrere Klassen und Erstellung von separaten Kalibrationsmodellen für jede Probesetklasse. Die Entwicklung und Validierung belastbarer Kalibrationsmodelle ist also eine Hauptaufgabe und Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung von NIRS in der Bodenkunde.

3 Vorteile und Nachteile des Einsatzes von NIRS in der Bodenkunde

Zuerst die Vorteile von NIRS, die trotz der dargestellten Schwierigkeiten bei der Entwicklung von Kalibrationsmodellen beträchtlich sind: NIRS ist eine schnelle und kostengünstige bodenanalytische Methode. Es wird kein Verbrauchsmaterial bei der Messung benötigt (außer der Lampe) und eine Messung dauert weniger als eine Minute. Mit einem einzigen aufgenommenen NIRS-Spektrum können mehrere Parameter gleichzeitig bestimmt werden. NIRS ist nicht-destruktiv, die Probe kann klein sein und mehrfach gemessen werden. Im Gegensatz zur Mittel-Infrarot-Spektroskopie (MIRS) ist die Probenhandhabung und Messung bei NIRS wesentlich einfacher. Ob verschiedene physiko-chemische Bodenparameter besser mit MIRS oder NIRS zu bestimmen sind, lässt sich nicht eindeutig sagen (Reeves *et al.*, 2006, Bellon-Maurel *et al.*, 2011, Rossel *et al.*, 2006). Während MIRS bei Labormessungen oft etwas bessere Ergebnisse erzielt, ist nur NIRS erfolgreich im Feld einsetzbar. Fast alle Bodenparameter wurden mit NIRS abgeschätzt, aber mit unterschiedlichem Erfolg. Bodenchemische Parameter, die mit der organischen Substanz zusammen hängen, lassen sich gut mit NIRS vorhersagen, während sich bodenphysikalische Parameter wie die

Trockenrohddichte oder Nährelemente meist weniger gut oder nur mit Einschränkungen mit NIRS messen lassen.

Die Nachteile von NIRS hängen mit der eingangs beschriebenen aufwendigen Kalibration zusammen. Ein reduziertes Probenset muss mit einer Referenzanalytik für die Kalibration analysiert werden. Die Kalibration ist oft weniger genau als die Referenzanalytik. Eine Übertragbarkeit von Kalibrationen auf Probensets außerhalb der Grundgesamtheit des Kalibrationsdatensets ist nicht möglich. Bei Feldmessungen ist meist sogar eine Kalibration für jede Messkampagne (unterschiedliche Bodenfeuchten) nötig. Um gute NIRS-Spektren im Labor zu erhalten ist es meist ratsam, neben den üblichen Schritten zur Aufarbeitung von Bodenproben, die Proben zu mahlen und zu trocknen, was einen erheblichen Arbeitsaufwand bedeutet, der bei *in-situ* NIRS-Messungen im Feld eingespart werden kann.

4 Wo ist NIRS anderen Methoden überlegen?

Probenauswahl, chemometrische Methode und Validation der Kalibrationsmodelle sind die drei Fundamente für die erfolgreiche Anwendung der NIRS in der Bodenkunde. Dazu gibt es weder verallgemeinerbare Anweisungen noch Standardverfahren. Trotzdem eröffnet die NIRS große Möglichkeiten in drei Anwendungsbereichen:

Charakterisierung großer Probensätze: Durch die dem Boden inhärente räumliche Heterogenität in den meisten Bodenparametern ist es aus statistischer Sicht besser, viele Proben mit einer etwas ungenaueren Methode zu analysieren als wenige Proben sehr genau. NIRS könnte so eine etwas ungenauere aber dafür schnellere und einfachere Methode sein. Besonders wenn mehrere Bodenparameter an einem großen Probenset gemessen werden müssen kommen die Vorteile von NIRS zum Tragen.

Substitution aufwendiger bodenchemischer Analysen: Das Potential von NIRS, zeitaufwendige und teure Bodenanalysen zu ersetzen, ist bisher wenig genutzt, könnte aber in Zukunft ein bedeutender Einsatzbereich von NIRS werden. Z.B. ist die sehr zeitaufwendige Quantifizierung von *Black Carbon* (Biokohle) ggf. durch NIRS sehr gut ersetzbar (Bellon-Maurel *et al.*, 2011).

Einsatz *in-situ* (Feld-NIRS und *Remote Sensing*): Der Einsatz von NIRS-Techniken zur Messung von Bodeneigenschaften *in-situ* eröffnet große Möglichkeiten. Dabei kann man unterscheiden zwischen i) kontaktlosen Verfahren wie NIR-Luftbildfotografie, oder Satelliten, die mit hyperspektralen Kameras ausgestattet sind (Gomez *et al.*, 2008) und ii) direkten Messungen horizontal (siehe Abb. 2) oder im Bodenprofil bzw. an gezogenen Bodenkernen (Christy, 2008).

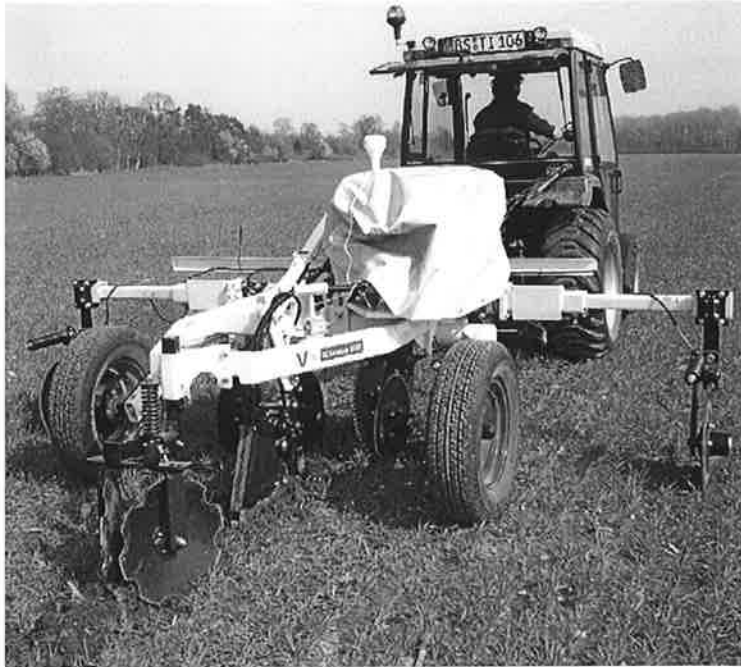


Abbildung 2: *In-situ* NIRS-Messungen auf dem Gelände des vTI in Braunschweig mit einer Messschar der Firma Veris (USA)

Mit Feld-NIRS lässt sich eine Fülle von Spektren gewinnen, die neue Einblicke in die räumlichen und zeitlichen Veränderungen von Bodenparametern ermöglichen. Eingesetzt werden diese Methoden bereits in der Praxis im *precision farming*, zur Steuerung der Pflanzenschutz- oder Düngemittelausbringung.

Literatur

- Agelet LE, Hurburgh CR (2010): A Tutorial on Near Infrared Spectroscopy and Its Calibration. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, **40**, 246-260.
- Bellon-Maurel V, McBratney A (2011): Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils - Critical review and research perspectives. *Soil Biology & Biochemistry*, **43**, 1398-1410.

- Brown DJ, Shepherd KD, Walsh MG, Mays MD, Reinsch TG (2006): Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, **132**, 273-290.
- Chang CW, Laird DA, Mausbach MJ, Hurburgh CR (2001): Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analyses of soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, **65**, 480-490.
- Christy CD (2008): Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, **61**, 10-19.
- Gillon D, Joffre R, Ibrahima A (1999): Can litter decomposability be predicted by near infrared reflectance spectroscopy? *Ecology*, **80**, 175-186.
- Gomez C, Rossel RAV, McBratney AB (2008): Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma*, **146**, 403-411.
- Norris KH, Barnes RF, Moore JE, Shenk JS (1976): Predicting Forage Quality by Infrared Reflectance Spectroscopy. *Journal of Animal Science*, **43**, 889-897.
- Reeves JB, III, Follett RF, McCarty GW, Kimble JM (2006): Can near or mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy be used to determine soil carbon pools? *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **37**, 2307-2325.
- Rossel RAV, Walvoort DJJ, McBratney AB, Janik LJ, Skjemstad JO (2006): Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, **131**, 59-75.
- Terhoeven-Urselmans T, Michel K, Helfrich M, Flessa H, Ludwig B (2006): Near-infrared spectroscopy can predict the composition of organic matter in soil and litter. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde*, **169**, 168-174.

Einsatz von In-Situ-Sensortechnik für Grundwasseruntersuchungen und Grundwassersanierung

Stephan Hüttmann

Wichtige Prozessparameter lassen sich bei hohen Prozessgeschwindigkeiten oft nicht mehr durch ein herkömmliches wöchentliches, monatliches oder gar jährliches Grundwassermonitoring erfassen. Eine zur Prozessanalyse sowie zur Ableitung von Steuerungskriterien eingesetzte Datenerfassung muss daher in einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung sowie in einem möglichst hoch auflösenden räumlichen Netz und in räumlicher Abhängigkeit von den Wirkstoffeintragsbereichen erfolgen. Reaktive Verfahren zur In-situ-Sanierung kontaminierter Areale kommen seit einigen Jahren in Deutschland zunehmend zum Einsatz. Teilweise werden diese Verfahren in Ergänzung oder als Ersatz der in der Vergangenheit bevorzugten Pump-and-Treat-Maßnahmen eingesetzt. Als besonders wirksam haben sich Verfahren mit biologischen Wirkmechanismen sowie Verfahren mit chemischem Wirkprinzip erwiesen. Die biologischen Verfahren nutzen die Fähigkeit standorteigener oder zugeführter Schadstoff abbauenden Mikroorganismen durch Bereitstellung von Elektronenakzeptoren (z. B. Sauerstoff, Nitrat), Elektronendonatoren (z. B. organischen Cosubstraten) und Nährstoffen. Bei den In-situ-chemischen-Oxidationsverfahren (ISCO) werden starke chemische Oxidationsmittel in das Grundwasser eingeleitet, um dadurch die organischen Schadstoffe oxidativ zu zerstören. All diesen Verfahren ist gemeinsam, dass Wirkstoffe in das Grundwasser eingeführt und aktiv oder passiv, d. h. mit der natürlichen Grundwasserströmung, verteilt werden müssen. Entscheidend für die Effizienz jedes dieser Verfahren ist dabei die Schaffung maximaler Kontaktflächen und Kontaktzeiten zwischen Wirk- und Schadstoffen. Das bedeutet, dass der ausreichenden Wirkstoffdosierung sowie der effizienten Wirkstoffverteilung und Wirkstoffeinspeicherung im Aquifer bei den genannten Verfahren eine entscheidende Bedeutung zukommt. Eine Unwägbarkeit bleibt bei der Verfahrensplanung und -ausführung zumeist im Problem der mangelnden Kenntnisse über die Heterogenität in den verschiedenen Maßstabebenen des Aquifers u. a. in Bezug auf dessen geologischen Detailaufbau, das lokale Fließgeschehen, die unterschiedlichen Leitfähigkeiten aufgrund verschiedener Lagerungsdichten sowie die heterogene stoffliche Zusammensetzung. Aus den Heterogenitäten ergeben sich komplexe dreidimensionale Ausbreitungsmuster bei der Stoffinfiltration sowie ein zeitlich und räumlich nicht konstanter Wirkstoffverbrauch. Die standortspezifischen Reaktionsmuster, Reaktionsgeschwindigkeiten

und räumlich-zeitliche Ausbreitungsprozesse lassen sich demzufolge nur unzureichend über herkömmliche Prognoseinstrumente, sondern bisher oft nur empirisch durch Felddaten bestimmen. Mithilfe von Felddaten, vor allem zur Bewertung der räumlichen Ausbreitung der Reaktionsfront, dessen zeitlicher Entwicklung und Intensität, lassen sich wesentlich genauere Bewirtschaftungskriterien für In-situ-Verfahren ableiten und Wirkstoffkonzentrationen an die Standortgegebenheiten anpassen.

1 Sensorgestützte In - situ - Prozessanalyse

Aufgrund hoher Prozessgeschwindigkeiten vor allem bei ISCO-Verfahren, teilweise aber auch bei biologischen Verfahren, ändern sich z. B. die Parameter Temperatur, Redoxpotenzial, Partialdrücke, Sauerstoffgehalt, pH-Wert bzw. Leitfähigkeiten teilweise bereits innerhalb weniger Minuten oder Stunden. Die relevanten Prozessparameter lassen sich bei hohen Prozessgeschwindigkeiten nicht mehr durch ein herkömmliches wöchentliches, monatliches oder gar jährliches Grundwassermonitoring erfassen. Die Datenerfassung muss zur Prozessanalyse sowie zur Ableitung von Steuerungskriterien stattdessen in einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung mindestens stündlich – besser sogar im Minutentakt – in einem möglichst hoch auflösenden räumlichen Netz, d. h. teufenorientiert und in räumlicher Abhängigkeit von den Wirkstoffeintragungsbereichen erfolgen. Zur Erfassung von chemischer, physikalischer, bzw. biologischer Zustandsgrößen im Aquifer steht eine ganze Reihe von Technologien zur Verfügung:

- DIN-gerechte Entnahme von Wasserproben aus konventionellen Messstellen
- Multilevel-Grundwasserbeprobungssysteme (z.B. CMT-Messstellen)
- Sensorgestützte Sondierverfahren (MIP, CTP, Sonic-Drill u.a.)
- Feststoffprobennahmen, klassische Sondierverfahren
- Messstellenintegrierte Sensorketten
- Aquiferintegrierte Sensorketten, d.h. direkt in den Aquifer installierte Sensoren (AISK).

Die Forderung nach einer Erhebung Prozess bestimmender Steuerungsparameter mit hoher zeitlicher Auflösung lässt sich mit einem vertretbaren Aufwand lediglich mit sensorgestützten Messverfahren realisieren. Dazu stehen inzwischen Technologien zur In-situ-Datenerfassung mittels In-situ-Sensoren zur Verfügung, die mit moderner Datenbustechnologie digital erfasst werden und, wenn gewünscht, in Sekundentaktung erhoben und per Funk fernübertragen werden können. Anhand der folgenden Praxisbeispiele wird der Einsatz von In-situ-

Sensormessnetzen zur Prozessanalyse und Verfahrenssteuerung von In-situ-Prozessen veranschaulicht.

2 Analyse des Wirkradius einer Zirkulationsbrunnentechnik (ROI-Analyse)

An einem Standort, der ausschließlich mit den LCKW-Komponenten cis-Dichlorethen (cDCE) und Vinylchlorid (VC) verunreinigt war, kam eine In-situ-Grundwassersanierung mit biologischem Wirkprinzip zum Einsatz. Biologische Laboruntersuchungen an diesem Standort hatten gezeigt, dass sich die Komponenten cDCE und VC durch Stimulation methylother Mikroorganismen unter Zugabe von Sauerstoff und Methanol als Kohlenstoffquelle effizient abbauen ließen. Um am stark überbauten Standort bei der In-situ-Behandlung Austritte leichtflüchtiger Schadstoffe cDCE und VC in die ungesättigte Bodenzone weitestgehend zu minimieren, war vorgesehen, die zuzuführenden Wirkstoffe Sauerstoff und Methanol mithilfe einer Zirkulationsbrunnentechnik effizient im Feld zu verteilen. Eine in einen Brunnen (DN 100) installierte Umwälzpumpe förderte Wasser aus dem oberen Teil des Brunnens in den unteren Teil des Brunnens. Aus zwei Dosierpumpen wurde dem Förderstrom zusätzlich Wasserstoffperoxid sowie Methanol zugesetzt. Zur Erhöhung der hydraulischen Wirksamkeit dieses Verfahrens wurde der mittlere Filterbereich in einer Tiefe zwischen 6,0 und 8,0 m u. GOK durch eine Packertechnik hydraulisch abgedichtet. Zur Reichweitenanalyse dienten im Umfeld des Zirkulationsbrunnens in unterschiedlichen Teufenbereichen kombinierte Redox-/Temperatursensoren als aquiferintegrierte Sensorketten (AISK). Mithilfe der stündlich aufgezeichneten Daten erfolgte anschließend die Analyse der Reichweite der Wirkstoffverteilung in Form des Redoxpotenzialanstiegs durch die Wasserstoffperoxidzugabe bzw. dessen Sauerstofffreisetzung. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Aerobisierung im unteren Teil des Aquifers im Infiltrationsbereich der sauerstoffhaltigen Wirkstofflösung bereits nach zwei Betriebstagen bis in 4 m Entfernung fortgeschritten ist. Nach sieben Tagen erreichten die Wirkstoffe bereits den unteren Redoxsensor in 8 m Entfernung zum Eintragungspunkt. Die Entwicklung der Aerobisierung im oberen Teil des Aquifers schritt dagegen deutlich langsamer voran. Erst nach 40 Betriebstagen wurde der obere Sensor in 4 m Entfernung zum Eintragungspunkt erreicht, der 8 m entfernte, obere Redoxsensor wurde innerhalb des Beobachtungszeitraumes von 45 Tagen nicht erreicht. Die sensorgestützte Reichweitenanalyse ergab demzufolge eine bevorzugte Ausbreitung der Wirkstoffe in der

tiefer gelegenen Injektionsebene. Im oberen Teil des Aquifers wurde erst zeitverzögert eine Reichweite von ca. 4 m vom Eintragungspunkt entfernt nachgewiesen.

3 Analyse von Sauerstoff-Direkt-Gaseinträgen zur Steuerung von Gaswänden

Direktgasinjektionen von Reinsauerstoff haben sich als eine sehr effiziente und ökonomische Methode zur aeroben In-situ-Behandlung kontaminierter Grundwasserleiter erwiesen. Sie sind hinsichtlich der erzielbaren Wirkstoff-Reichweiten, Wirkungsgrad und Betriebskosten den reinen Luftinjektionsverfahren wie z. B. dem klassischen Airsparging-Verfahren überlegen. In einem Berliner Gaswandprojekt, das als Bioxidationswand betrieben wird, sollte nun durch den Einsatz eines Messnetzes von aquiferintegrierten In-situ-Sensoren die Gasausbreitung in einem geschichteten Aquifer in seiner räumlichen und zeitlichen Dynamik analysiert werden, um Bewirtschaftungsparameter für den Betrieb der Gaswand festzulegen. Die Gaswand wurde auf einer Breite von ca. 50 lfdm quer zur Grundwasserströmungsrichtung im Wesentlichen durch drei Stück Multilevel-Gasinjektionslanzen aufgebaut, die bis in 25 m Tiefe unter Flur ausgebaut und mithilfe spezieller Dichtmassenverpressung gasdicht abgedichtet wurden. Bedingt durch die hohen erwarteten Reichweiten der Sauerstoffausbreitung wurden In-situ-Redoxsensoren in Abständen von wenigen Metern bis 12 m vom Gaseintragungspunkt in verschiedenen Teufenbereichen jeweils in den Gasspeicherhorizonten errichtet. Die Datenaufzeichnung erfolgte durch ein CANBUS-gestütztes, digitales Messnetz mit einer Datenaufzeichnungsfrequenz von 15 Minuten. Nach Inbetriebnahme der Gaswandtechnik kam es bereits nach wenigen Tagen zu starken Reaktionen des Redoxpotentials in den Monitoringbereichen. In einigen Gasspeicherhorizonten wurden schnelle Redoxanstiege >300 mV/d analysiert, die nicht mit dem Transport gelösten Sauerstoffs mit dem Grundwasser, sondern nur durch den Sauerstoff über kohärente Gaskanäle erklärbar sind. In anderen Monitoring-Bereichen stiegen die Sauerstoffgehalte dagegen langsamer (<30 mV/d) an, was auf einen inkohärenten Sauerstofftransport vorwiegend als gelöster Sauerstoff mit dem Grundwasser zurückgeführt wurde. Durch die genaue Kenntnis der räumlich/zeitlichen Sauerstoffausbreitung im Aquifer konnte eine Gewichtung der einzelnen Gaseintragungspunkte hinsichtlich der Sauerstoffinjektionsraten, der Injektionsintervalle und Ruhephasen festgelegt werden. Die erfolgreichen Systemergebnisse der Versuchsablage wurden umfassend bei der Konzeption der Pilotanlage berücksichtigt. Aktuell wird die Bioxwand-Pilotanlage auf einer Breite von ca. 100 m und einer maximalen Tiefe von 50 m im Vorfeld einer Trinkwassergewinnungsanlage betrieben. Das In-situ-Sensormessnetz in der Pilotanlage wird

dabei als automatisiertes Online-Überwachungssystem zur räumlich-zeitlichen Analyse der Effizienz des Gaseintrages am Standort genutzt.

4 Fazit

In-situ-Sensornetze ermöglichen Prozessanalysen biologischer und chemischer In-situ-Reaktionen mit einer engen räumlichen und zeitlichen Auflösung. Die Wahl der jeweils geeigneten Sensorüberwachungssysteme sollte sowohl in Abhängigkeit von der Verfahrenstechnik als auch von dem spezifischen Wirkstoffverteilungsmechanismus getroffen werden. Eine sensorgestützte Prozessanalyse ist vor allem dann sinnvoll,

- wenn Prozesse in einer komplexen geologischen Struktur räumlich und zeitlich analysiert werden müssen,
- wenn dynamische Prozesse im Grundwasser besonders schnell, d.h. innerhalb weniger Tage oder schneller ablaufen,
- wenn Prozesse eine hohe Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit erfordern.

Analytik chemischer Parameter im Boden und (Grund)wasser – zuverlässig und effizient

Carolin Klein

1 Analytik chemischer Parameter mit Merck Schnelltests

Im Bereich „Water and Food Analytics“ bietet Merck Millipore eine breite Palette an Tests zur Trinkwasser-, Abwasser-, Lebensmittel- und Bodenanalytik an. Von Ammonium bis Zink werden Tests für alle wichtigen Parameter angeboten. Jeder Parameter kann mit unterschiedlichen Methoden analysiert werden. Vom günstigen Merckoquant® Teststreifen bis zur aufwendigen und präzisen Photometriemethode mit Spectroquant® kann jeder Kunde die für ihn geeignete Analysenmethode wählen.

Das Merckoquant® Teststäbchen wird mit der Reaktionszone in die Probe getaucht. Die Konzentration des ausgewählten Parameters wird halbquantitativ durch visuellen Vergleich der Reaktionszone des Teststäbchens mit den Feldern einer Farbskala ermittelt. Ein Merckoquant® Teststreifen eignet sich deshalb zur Abschätzung der Konzentration des gewählten Parameters. Dies ist eine günstige und einfache Screeningmethode.

Mit dem Reflectoquant® System kann ein quantitatives Ergebnis ermittelt werden. Beim Reflectoquant® Test befindet sich die Reaktionszone ebenfalls auf einem Teststreifen, der in die Probe eingetaucht wird. Der Teststreifen wird allerdings mit dem RQflex® Messgerät ausgewertet. Das Gerät ermittelt die Konzentration des ausgewählten Parameters reflektometrisch und zeigt diese im Display an. Das Ergebnis wird mit einer Genauigkeit von $\pm 10\%$ angegeben und ist präziser als Merckoquant®.

Für höchste Anforderungen an die Präzision bietet Merck unter dem Namen Spectroquant® über 150 Tests. Die Küvetten- und Reagenzientests werden photometrisch ausgewertet. Der Kunde wählt den Parameter und den für ihn geeigneten Messbereich aus. Die Spectroquant® Tests sind im Photometer vorprogrammiert. Durch den aufgedruckten Barcode auf dem Etikett erkennt das Photometer den Parameter und die Methode automatisch. Das Messergebnis wird als Konzentration auf dem Display ausgegeben.

2 Analytik chemischer Parameter im Boden mit Merck RQflex® am Beispiel der Messung des Nitratgehaltes

Triebfeder für das Wachstum der Pflanzen ist der Stickstoff. Eine übermäßige Anreicherung von Stickstoff im Boden sollte vermieden werden. Eine Auswaschung des Nitrats führt zu einer übermäßigen Belastung des Grundwassers. Das Erntegut ist mit Nitrat belastet, welches sich auf den Menschen negativ auswirken kann. Außerdem entstehen zusätzliche Kosten durch die Ausbringung von höheren Mengen an Düngemittel.

Zur Kontrolle des Nitratgehalts wird klassisch eine Bodenprobe entnommen und diese an ein Labor zur Untersuchung geschickt. Um die Probe zu konservieren, muss diese gekühlt werden. Außerdem dauert die Übermittlung der Analysenergebnisse meist mehrere Tage.

Mit dem Reflectoquant® Analysensystem kann innerhalb weniger Minuten eine quantitative Analyse des aktuellen Nitratgehalts der Bodenprobe durchgeführt werden. Vor der Analyse mit dem Merck Schnelltest kann die Probe mit Leitungswasser als Extraktionsmittel aufgelöst und filtriert werden. Anschließend wird die Probe vor Ort reflektometrisch gemessen. Bei stark gefärbten Filtraten ist mit einer Abweichung des Messergebnisses zu rechnen.¹

Die Schnelltestmethode mit Merck RQflex® zeigt eine gute Übereinstimmung mit Standardbestimmungen im Labor ($\pm 10\%$). Die Methode ist anwenderfreundlich und reduziert Analysenkosten.²

Im Rahmen einer Studie wurden Vergleichsmessungen mit dem reflektometrischen Messgerät Nitrachek 404 vorgenommen, um die Ergebnisse mit dem Merck RQflex® Messgerät zu vergleichen. Die benötigte Messgenauigkeit wurde bei Nitrachek durch vier Einzelmessungen erreicht. Die Messwertschwankungen waren beim Merck RQflex® so gering, dass lediglich zwei Einzelmessungen gemittelt wurden. Das Merck Reflektometer RQflex® ermittelt verlässliche und stabile Messergebnisse.³

¹ Oehme, S.; Appel, T.(2007): Nitratschnelltest RQeasy® für Böden und gartenbauliche Substrate. Fachhochschule Bingen. Kongressband 2007.

² Schmidhalter, U. (2005): Development of a quick on-farm test to determine nitrate levels in soil; Journal of Plant Nutr. Soil Sc. 2005, 168, 1-7.

³ Lohr, D. et al. (2008): Forschungsprojekt des Bayerischen Staatsministeriums für Landwirtschaft und Forsten; „Fachgerechte Düngung im Garten unter der Berücksichtigung der Stickstoffgehalte im Boden“.

3 Fazit

Die Vorteile des Merck Reflectoquant® Systems können wie folgt zusammengefasst werden. Die quantitative Analyse liefert verlässliche Ergebnisse innerhalb weniger Minuten. Dies hat zur Folge, dass sofort eine Optimierung der auszubringenden Düngermenge vorgenommen werden kann. Die Wartezeit auf Laborergebnisse entfällt somit völlig.

Die Probe muss nicht aufwendig durch Kühlung konserviert werden, sondern kann direkt vor Ort gemessen werden. Abweichungen der Messergebnisse durch falsche Lagerung werden so ausgeschlossen.

Das RQflex® Messgerät ist einfach zu handhaben und benötigt keine Kalibration. Bei jeder Charge der Teststreifen wird ein Barcode mitgeliefert, der ins Gerät eingesteckt wird. Damit wird die Kalibration mit jeder Charge automatisch mitgeliefert und kann anwenderfreundlich ins Gerät eingelegt werden.

Die Verwendung des RQflex® Systems hilft Kosten für Dünger und Laboruntersuchungen einzusparen.

Online-Messung von geoelektrischer Leitfähigkeit

Stefan Hinck, Klaus Mueller, Norbert Emeis, Olaf Christen

1 Einleitung

Die moderne Pflanzenproduktion hat den Anspruch einer ausreichend hohen Erzeugung von Nahrungs- und Futtermittel sowie nachwachsenden Rohstoffen bei einem ökonomischen und ökologischen nachhaltigen Anbauverfahren. Das Managementsystem „Precision Farming“ (auch teilflächenspezifische Bewirtschaftung genannt) berücksichtigt beim Pflanzenbau diese Kriterien nicht nur auf dem gesamten Ackerschlag, sondern auf den Teilflächen eines Felds. Maßnahmen und Applikationen werden hierbei nach den entsprechenden Produktionsansprüchen ausgerichtet. Als Beispiel sei die Ermittlung der Nährstoffmenge angeführt. Diese erfolgt nicht mehr einheitlich für den gesamten Ackerschlag nach dem Flächen-Durchschnittsertrag, sondern idealerweise nach Teilflächen-Erträgen und den Bodenqualitäten sowie dem Boden-Nährstoffvorrat auf der Teilfläche. Insbesondere der Boden erhält bei der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung eine zentrale Bedeutung. Häufig ist erkennbar, dass Ertragsunterschiede einen Zusammenhang zu unterschiedlichen Bodenqualitäten aufweisen. Zu erklären ist dieses mit den unterschiedlichen Bodeneigenschaften, welche sich (neben anderen Faktoren) positiv oder negativ auf die Wachstumsbedingungen des Standortes auswirken.

Es sind insbesondere die Ton- und Humusgehalte des Bodens, welche das Ertragspotenzial eines Standortes maßgeblich bestimmen. Beide Größen haben einen bedeutenden Einfluss auf das bodenbürtige Wasser- und Nährstoffspeichervermögen; mit zunehmenden Ton- und Humusgehalt steigt in der Regel der Wasser- und Nährstoffgehalt des Bodens an. Ein hoher Gehalt an pflanzenverfügbarem Wasser und Nährstoffen sind im Allgemeinen gleichzusetzen mit einem hohen Ertragspotenzial. Eine Änderung des Ton- und/oder Humusgehalts in den Teilflächen haben also eine Änderung der Ertragspotenziale zur Folge. (Scheffer & Schachtschabel 2010)

Daraus folgt, dass die einzelnen Teilflächen differenziert zu bewirtschaften sind (z.B. in der Düngungsintensität). Ein Umstand, der in der Landwirtschaft seit langem bekannt ist, aber auf

Grund des technischen Entwicklungsstandes bisher noch keine Praxisanwendung finden konnte. So weisen bereits Roemer und Scheffer 1949 in ihrem Lehrbuch des Ackerbaus auf die Schwierigkeit hin, den Pflanzenbau den unterschiedlichen Bodenqualitäten innerhalb des Ackers anzupassen. Die Problematik ist also nicht neu, kann aber erst heute durch die zur Verfügung stehenden neuen Technologien gelöst werden, z.B. durch den Einsatz von geoelektrischen Messsystemen. Mit Hilfe von geoelektrischen Messungen ist es möglich unterschiedliche Bodenqualitäten innerhalb einer Ackerfläche schnell zu erkennen. Eine erzeugte Feldkarte mit den geoelektrischen Messwerten kann dazu dienen, z.B. innerhalb eines Ackerschlags Teilflächen mit unterschiedlichen elektrischen Bodenleitfähigkeiten für die eigentliche bodenkundliche Kartierung abzugrenzen. Dazu ist die Annahme, dass unterschiedliche elektrische Bodenleitfähigkeiten auf unterschiedliche Bodenqualitäten hinweisen. Die Teilflächen werden gezielt beprobt. Somit reduziert sich der Beprobungsaufwand insgesamt und die Aussagekraft der bodenkundlichen Kartierung bleibt erhalten oder kann evtl. erhöht werden.

2 Detektieren von Bodenunterschieden mit Hilfe von geoelektrischen Messungen

2.1 Der Stromfluss im Boden

Der Boden besteht aus der festen, flüssigen und gasförmigen Phase. Fließt ein Strom durch den Boden, sind die feste und flüssige Phase sowie beide in Kombination an der Leitung des elektrischen Stroms beteiligt (s. Abb. 1).

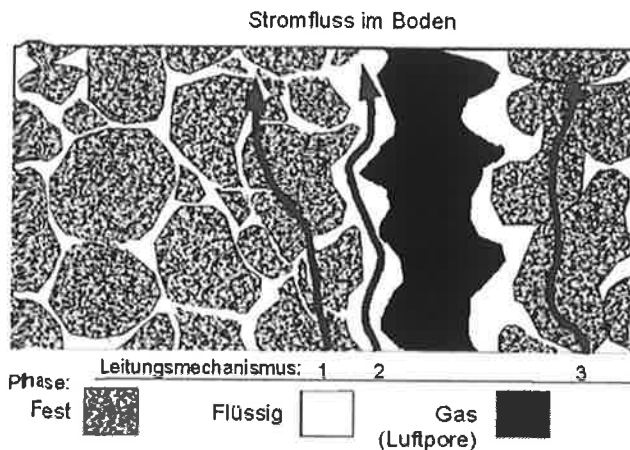


Abb. 1: Schematische Darstellung des Stromflusses im Boden, 1 = Stromfluss durch die feste und flüssige Phase, 2 = Stromfluss durch die flüssige Phase, 3 = Stromfluss durch die feste Phase (Quelle: Rhoades et al. 1989, verändert)

Die elektrische Leitfähigkeit beruht auf verschiedenen Leitungsmechanismen:

- elektronische (metallische) Matrixleitfähigkeit: Stromfluss durch die feste Phase,
- elektrolytische Leitfähigkeit: Stromfluss im Elektrolyt,
- Grenzflächenleitfähigkeit: Stromfluss über die geladene Oberfläche von Bodenbestandteilen (z.B. Tonminerale) und
- elektrische Polarisation: Verschiebungsströme zwischen zwei Elektroden aufgrund von Polarisationserscheinungen (Gebbers und Lück 2006, Schopper et al. 2005, Weidel 2005, Keller und Frischknecht 1977, Bikerman 1935).

Der Hauptanteil der elektrischen Leitfähigkeit (EC) geschieht durch den Stromfluss durch das Elektrolyt in nicht salinen und erzarmen Böden unter gemäßigten Klimabedingungen. In ariden Gebieten mit salinen Böden oder bei Vorhandensein von Erzen in den Böden verschiebt sich dieser Anteil und der Stromfluss durch die feste Phase nimmt zu (Weidel 2005, Keller und Frischknecht 1977)

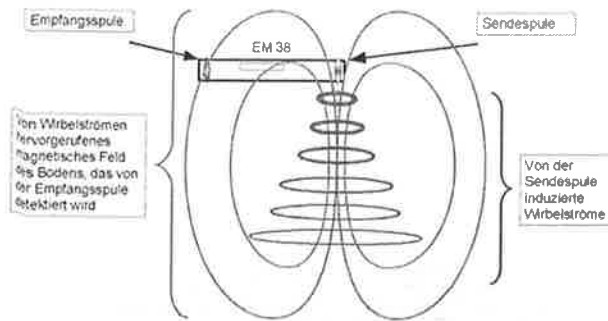
Auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in unseren gemäßigten Klimagebieten, ohne anthropogene Vorbelastung (z.B. Stoffeinträge über die übliche landwirtschaftliche Nutzung hinaus) und nicht grundwasserbeeinflussten bzw. nicht zu staunässeneigenden Böden bestimmt demnach die Nährstoff- und Wasserspeicherfähigkeit des Bodens die elektrische Leitfähigkeit, da die Wasser- und Nährstoffkonzentration im Boden ein Maß der Ionenkonzentration des Elektrolyts sind. Die Speicherfähigkeit von Wasser und Nährstoffen

wiederum steht in den meisten Fällen in Abhängigkeit zum Ton- und Humusgehalt (Scheffer & Schachtschabel 2010). Somit steigt die elektrische Leitfähigkeit des Bodens mit steigendem Tongehalt an, wobei der Tongehalt nur indirekt mit der elektrolytischen Leitfähigkeit in Verbindung steht.

2.2 Geoelektrische Bodensensorsysteme

Es gibt eine Vielzahl an Sensorsystemen zur Detektierung verschiedener Bodeneigenschaften (Hinck 2009 nach Adamchuck et al. 2004). Sehr häufig werden geoelektrische Messsysteme zur Detektierung der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens eingesetzt. Insbesondere die Messprinzipien elektromagnetische Induktion (z.B. EM38, s. Abb. 1) und Vierleitermessung (auch Vier-Punkt-Anordnung genannt / z.B. ARP03 oder Veris 3100, s. Abb. 2) sind häufig in der Landwirtschaft verwendete Bodensensorsysteme zur Erfassung der geoelektrischen Leitfähigkeit. Auch sind verschiedene neue Bodensensorsysteme in der Forschung, z.B. Geophilus electricus (Universität Potsdam / Lück 2011) oder BOs-1EP (Hochschule Osnabrück / Hinck 2009). Das BOs-1EP arbeitet nach dem Messprinzip „Erfassung des komplexen elektrischen Leitwerts“ (s. Abb. 3).

Es werden das BOs-1EP, EM38 und das ARP03 bzw. Veris3100 im Messaufbau beschrieben. Jedes System weist spezielle Vorzüge und für spezifische Fragestellungen im Vergleich zu einem anderen Messsystem Schwächen auf. Beispielsweise ist das EM38 mit dem großen Vorteil der Handlichkeit erwähnt. Es kann maschinengestützt oder von Hand geführt eingesetzt werden. Ein direkter Bodenkontakt ist nicht notwendig, ein evtl. vorhandener Pflanzenbestand wird nicht beeinträchtigt. Aber bei der Zuordnung bzw. bei der Interpretation des Messwertes zu einer bestimmten Tiefe (z.B. Oberboden) ist die Messempfindlichkeitskurve zu beachten (Doolittle et al. 2002) und damit aufwändiger im Vergleich zu den drei anderen vorgestellten Messsystemen. Beim BOs-1EP ist die Tiefenzuordnung des Messwertes durch die Tiefenführung der Messelektroden klar gegeben, allerdings z.Z. beschränkt auf den Oberboden (s. Abb. 3).



EM 38:

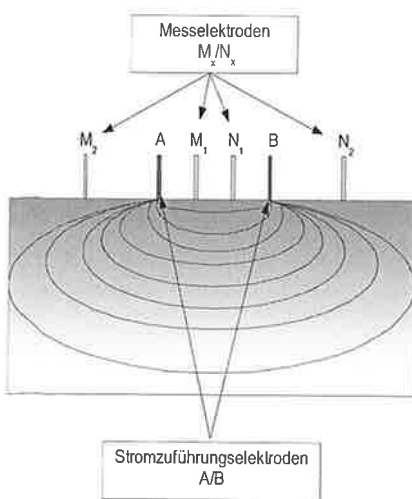
Messverfahren: elektromagnetische Induktion

Messgrößen: scheinbare elektrische Leitfähigkeit, Suszeptibilität

Messtiefen: 2 Modi, horizontal + vertikal

63% des Signalanteils aus einer Tiefe von 0 – 60 cm (hor.) bzw. 0 – 130 cm (ver.), Messergebnis ist das Integral über die jeweilige Messtiefe, Gerätelage bestimmt Messtiefe

Abb. 1: Messprinzip des elektromagnetischen Messsystems EM38 der Firma Geonics (Quelle: Hinck 2009)



ARP03 / Veris3100:

Messverfahren: Gleichstromelektrik (Vier-Punktanordnung)

Messgröße: scheinbarer elektrischer Widerstand

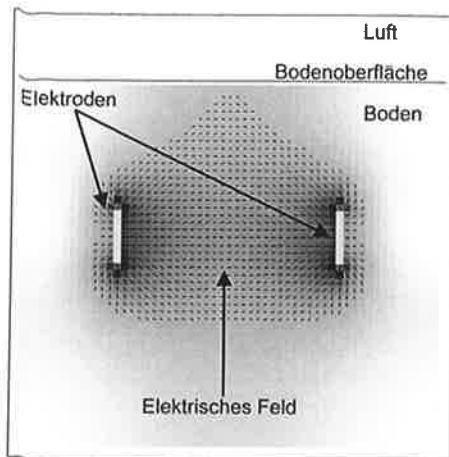
Messtiefen:

ARP03: 3 Messtiefen: 0 – 50 cm, 0 – 100 cm, 0 – 200 cm

Veris 3100: 2 Messtiefen: 0 – 30 cm, 0 – 90 cm

Messergebnis ist das Integral über die jeweilige Messtiefe, Elektrodenabstand bestimmt Messtiefe

Abb. 2: Messaufbau einer geoelektrischen Vierleitermessung (Vier-Punkt-Anordnung) am Beispiel des Messsystems Veris3100, Anordnung der Elektroden: Stromzuführungselektroden (A, B) und Messelektroden M_1, N_1 (kleiner Elektrodenabstand) für eine Messung in der Tiefe 0 bis 30 cm und M_2, N_2 (großer Elektrodenabstand) für die Messtiefe 0 bis 90 cm (Quelle: Gebbers und Lück 2006, verändert)



BOs-1EP:

Messverfahren: Erfassung des komplexen elektrischen Leitwerts

Messgrößen: Elektrische Leitfähigkeit und Kapazität;
Rauschen des Messstroms, Bodentemperatur

Messtiefe: 0 cm bis 25 cm; Messelektroden tiefenjustierbar,
Messergebnis kann einem definierten Volumen in einer
definierten Tiefe zugeordnet werden

Abb. 3: BOs-1EP (Bodensensorsystem Hochschule Osnabrück): Verhalten des elektrischen Felds im Boden zwischen den beiden Elektroden (Quelle: Hinck 2009 nach Emeis 2007)

3 Messergebnisse

In Abb. 4 ist die räumliche Verteilung des Tongehalts im Oberboden (0 – 30 cm Tiefe) für die Versuchsfläche „Im Berge“ dargestellt. Es zeigen sich Tongehalte von 9 % im südlichen Bereich der Fläche bis 40 % im nördlichen Bereich. Die elektrische Leitfähigkeit (EC) ist auf dieser Fläche mit Hilfe der drei Messsysteme BOs-1EP, ARP03 und EM38 detektiert worden (s. Abb. 5, 6 und 7). Es zeigen sich ähnliche Verteilungsmuster der EC-Werte im Vergleich zur räumlichen Verteilung des Tongehalts (vgl. Abb. 4 mit Abb. 5, 6 und 7). Wird die elektrische Leitfähigkeit des jeweiligen Messsystems mit dem Tongehalt im Oberboden korreliert, zeigen sich für verschiedene Messtermine folgende Korrelationen:

BOs-1EP	0,7 – 0,8
ARP03	0,7
EM38 horizontal	0,1 – 0,6
EM38 vertikal	0,1 – 0,3. (Hinck 2009)

Auf einer anderen Untersuchungsfläche zeigen sich schwächere Zusammenhänge im Vergleich zur Fläche „Im Berge“. Auffallend hohe elektrische Leitfähigkeiten zeigen sich auf jener Fläche auf dem grundwasserbeeinflussten Bereich. In diesem Bereich wird die

elektrische Leitfähigkeit vom höheren bodenartunabhängigen Wassergehalt stark beeinflusst (Hinck 2009).

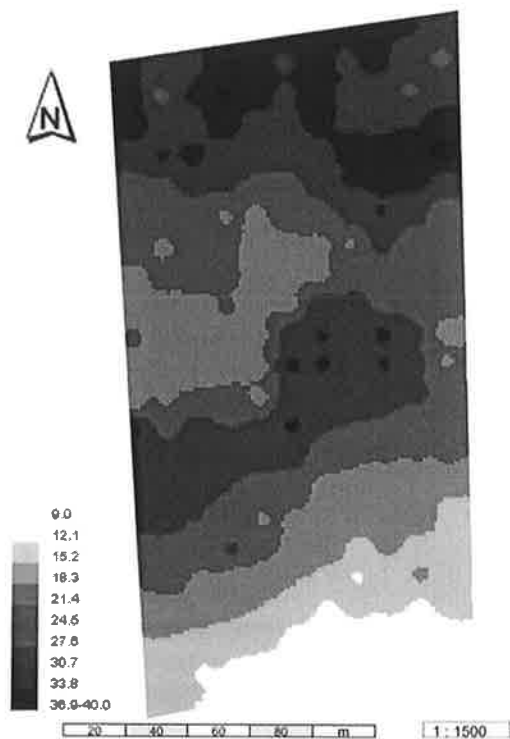


Abb. 4: Räumliche Verteilung des Ton-gehalts (Angabe in %) in der Tiefe von 0 - 30 cm, Fläche „Im Berge“ (Quelle: Hinck 2009)

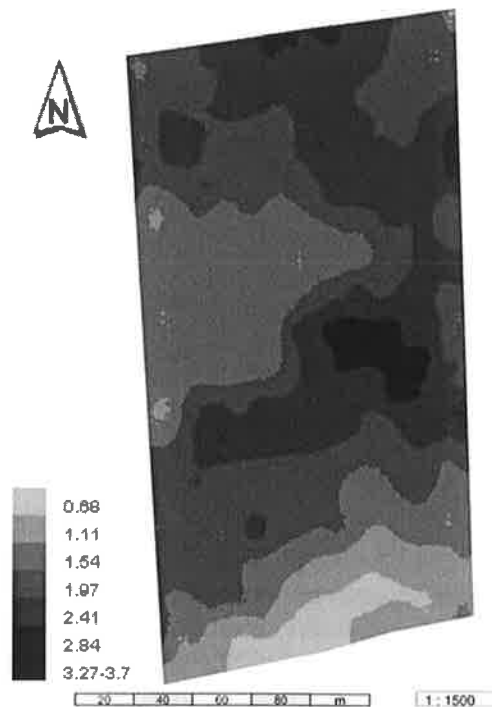


Abb. 5: BOs-1EP; Räumliche Verteilung des elektrischen Leitwerts (Angabe in mS) auf der Fläche „Im Berge“, Messtiefe: ca. 25 cm, Messtermin: 15.03.2005 (Quelle: Hinck 2009)

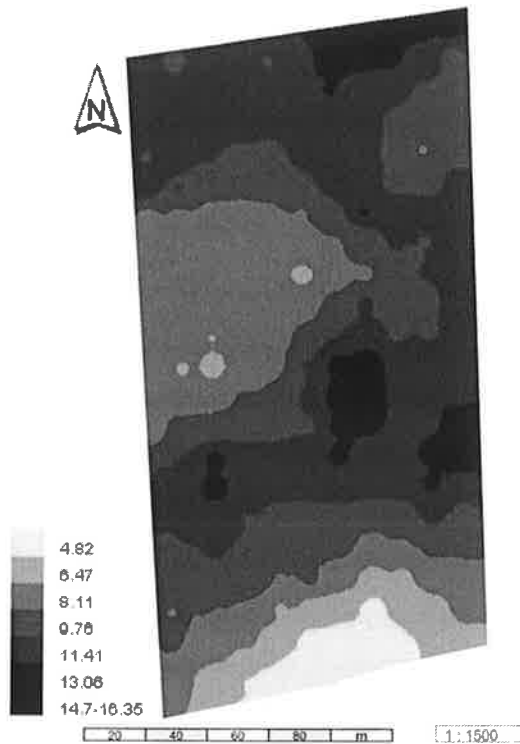


Abb. 6: ARP03, Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (EC1 / Angabe in mS/m) auf der Fläche „Im Berge“, Mess-tiefe: 0 - 50 cm, Messtermin: Herbst 2004 (Quelle: Hinck 2009)

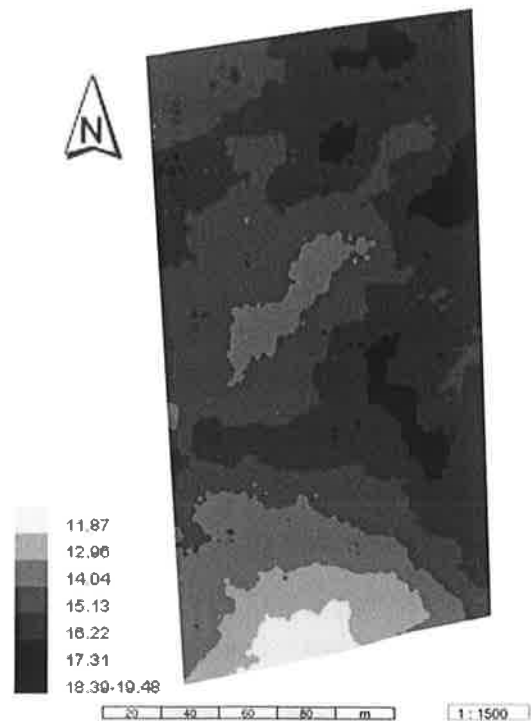


Abb. 7: EM38 (horizontaler Messmodus), Räumliche Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (Angabe in mS/m) auf der Fläche „Im Berge“, Messtermin: 14.03.2007, Interpolationsmethode „Kriging“ (Quelle: Hinck 2009)

Die geoelektrischen Messergebnisse zeigen, dass die räumliche Verteilung des Tongehalts mit einer hohen Ähnlichkeit dargestellt werden kann. Dieses gilt insbesondere für die Messsysteme BOs-1EP und ARP03. Werden Abb. 4 und Abb. 5 miteinander verglichen, ist zu erkennen, dass die südliche eher sandige bzw. schwach bindige Teilfläche niedrige EC-Werte aufweisen. Hohe Tongehalte sind in der Flächenmitte und im nördlichen Teil der Fläche erkennbar mit entsprechenden hohen EC-Werten. Mittlere EC-Werte sind auf der mittleren westlichen Teilfläche mit mittleren Tongehalten erkennbar. (vgl. Abb. 4 mit Abb. 5).

Die Feldkarte mit den EC-Werten kann genutzt werden, um z.B. einen Beprobungsplan zu erstellen. Die Annahme ist, dass auf grundwasserfernen und nicht zu staunässeneigenden Böden sich die Tongehalte bzw. die Bodenarten anhand der EC-Werte unterscheiden lassen. Deutliche Änderungen in der Höhe der EC-Werte werden mit einer entsprechenden Änderung gleichgesetzt. Werden die EC-Werte mit Hilfe einer Clusteranalyse für eine Flächenaufteilung analysiert, ist es möglich die Fläche „Im Berge“ in zwei Teilflächen mit unterschiedlichen

Korngrößenzusammensetzungen zu unterteilen (Hinck et al. 2009). Auch ist es möglich die Fläche „Im Berge“ mit Hilfe einer Klassifizierung der EC-Werte in Teilflächen mit niedrigen, mittleren und hohen EC-Werten einzuteilen. Diese Teilflächen sind nicht nur in den EC-Werten bzw. Korngrößenzusammensetzung unterschiedlich sondern auch in den Nährstoffgehalten (Hinck et al. 2009). Corwin et al. 2003 weisen in deren Arbeit ebenfalls auf solch eine Möglichkeit hin. Weiter bietet sich die Möglichkeit gezielt Bodenproben von ausgewählten Teilflächen mit unterschiedlichen EC-Werten zu entnehmen und die Bodenart zu ermitteln. Mit Hilfe der EC-Werte und der jeweiligen Kalibrier-Korngröße kann eine Schätzung der Korngrößenverteilung bzw. Bodenart für nicht beprobte Bereiche vorgenommen werden (Hinck 2009). Hinck et al. (2011), Sudduth et al. (2003) oder Mueller et al. (2003) weisen in ihren Arbeiten auf die Möglichkeit hin, mit Hilfe der EC-Werte die Sandüberlagerungsmächtigkeit, die Tiefe eines tonreichen Horizonts bzw. die Tiefe des Ausgangsgestein zu ermitteln. Diese Autoren weisen aber ebenfalls in ihren Arbeiten daraufhin, dass eine Bodenbeprobung oder auch eine klassische bodenkundliche Kartierung notwendig ist, um die gewünschte Ziel-Information kleinräumig zu ermitteln.

4 Zusammenfassung

Für das Managementsystem „Precision Farming“ sind kleinräumige Bodeninformationen auf Feldmaßstab notwendig und von hoher Bedeutung. Eine entsprechende klassische Kartierung mit Bohrstock und das Anlegen einer Kartiergrube sind in der Praxis zu zeit- und damit zu kostenintensiv. Es werden neue und innovative Methoden benötigt. Hierzu bietet der Einsatz von geoelektrischen Bodensensorsystemen Möglichkeiten, eine Fläche anhand der geoelektrischen Leitfähigkeit (EC) in Teilflächen aufzuteilen. Da ein indirekter Zusammenhang zwischen der Bodenart und den EC-Werten vorhanden ist, kann angenommen werden, dass unterschiedliche EC-Werte unterschiedliche Bodenqualitäten abbilden. Aber ein direkter Vergleich der EC-Werte mit einer Zielgröße ist nicht immer zielführend. Die Fläche kann vorab mit Hilfe der EC-Werte-Feldkarte in Teilflächen unterteilt werden. Die erkannten Teilflächen werden gezielt aufgesucht und die entsprechenden Kartierungen durchgeführt. Die klassische Bodenkartierung kann durch Vorab-Kartierungen mit Bodensensorsystemen unterstützt, ergänzt und optimiert werden.

Literaturverzeichnis

Adamchuck, V. I., Hummel J.W., Morgan, M.T., Upadhyaya, S.K. (2004): On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* Jahrgang 44, S. 71 - 91.

Bikermann, J. J. (1935): Die Oberflächenleitfähigkeit und ihre Bedeutung. *Kolloid-Zeitschrift* 72, S. 100 - 108.

Corwin, D.L., Lesch, S.M., Shouse, P.J., Soppe, R., Ayars, J.E. (2003): Identifying Soil Properties that Influence Cotton Yield Using Soil Sampling Directed by Apparent Soil Electrical Conductivity. *Agron. J.*, Jahrgang 95, S. 352 - 364.

Doolittle, J.A., Indorante, S.J., Potter, D.K., Hefner, S.G., MC Cauley, W.M. (2002): Comparing three geophysical tools for locating sand blows in alluvial soils of southeast Missouri. *Journal of Soil and Water Conservation*, Jahrgang 57, S. 175 - 182.

Emeis, N. (2007): Numerische Rechnung - BOs - 1EP (Bodensensorsystem Fachhochschule Osnabrück) (unveröffentlicht). Teilprojektleiter Bodensensorik im Forschungsschwerpunkt PIROL an der Fachhochschule Osnabrück

Gebbers, R., Lück, E. (2006): Geoelektrische Methoden zur Bodenkartierung in der Landwirtschaft, S. 3.2.3-113 - 3.2.3-135 in *Precision Farming (KTBL-Schrift 419)*, Hrsg.: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. Druckerei Lokay, Reinheim (Ergänzungslieferung 8/2006)

Hinck, S. (2009): Ermittlung pflanzenbaulich relevanter Bodenkenndaten mit Hilfe von ausgewählter Bodensensorik. Dissertationsschrift an der Martin-Luther-Universität zu Halle-Wittenberg. Der Andere Verlag, Tönning. Internet-Link: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3:4-1547>

Hinck s., Kielhorn, A., Mueller, K. (2011): Kleinräumige Standortkartierung in einer Fichten-Reinkultur mit Hilfe des EM38 als eine Möglichkeit zur optimalen Bestandsführung (Anwendungsbeispiel), Vortrag auf der DBG-Tagung vom 03. - 09.09.2011 in Berlin, im Druck.

Hinck, S., Emeis, N., Mueller, K. (2009): Beprobungsarme bodenkundliche Kartierung mit Hilfe des Bodensensorssystem „BOs-1EP“, S. 43 – 114 in PIROL. Hrsg.: Arbeitsgruppe PIROL. Selbstverlag, Osnabrück.

Keller, G.V., Frischknecht, F.C (1977): *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press, New York.

Lück, E. (2011): Leitfähigkeitskarten für mehrere Tiefenstufen gewonnen aus Daten des Geophilus electricus. Vortrag auf der DBG-Tagung vom 03. - 09.09.2011 in Berlin.

Mueller, T.G., Hartsock, N.J., Stombaugh, T.S., Shearer, S.A., Cornelius P.L., Barnhisel, R.I. (2003): Soil Electrical Conductivity Map Variability in Limestone Soil Overlain by Loess. *Agron. J.*, Jahrgang 95, S. 496 - 507.

Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Shouse, P.J., Alves, W.J. (1989): Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibrations. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, Jahrgang 53/1989a, S. 433 – 439.

Roemer, Th. und Scheffer, F. (1949): Lehrbuch des Ackerbaues. Paul Parey Verlag, Berlin.

Scheffer&Schachtschabel (2010): Blume, H.-P; Brümmer, G. W.; Horn, R.; Kandeler, E.; Kögel-Knabner, I.;Kretzschmar, R.; Stahr, K.; Wilke, B.-M. : Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Schopper, J.R., Kulenkamp J.M., Debschütz, W.G. (2005): Grenzflächenleitfähigkeit, S. 1014 - 1017 in Geophysik, Hrsg.: Knödel, K., Krummel, H., Lange, G. Springer- Verlag, Berlin.

Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Bollero, G.A., Bullock, D.G., Wiebold, W.J. (2003): Comparison of Electromagnetic Induction and Direct Sensing of Soil Electrical Conductivity. Agron. J., Jahrgang 95, S. 472 - 482.

Weidel, P. (2005): Grundlagen, S. 71 - 100 in Geophysik, Hrsg.: Knödel, K., Krummel, H., Lange, G. Springer- Verlag, Berlin.

Online-Messung von Boden-pH-Werten

- Erfassung mittels Veris MSP -

Anne Borchert, Dieter Trautz, Hans-Werner Olf

1 Einleitung

Die Eignung eines Bodens als Pflanzenstandort hängt maßgeblich von seinem pH-Wert ab. Als eine der wichtigsten chemischen Eigenschaften des Bodens, hat dieser Einfluss auf Nährstoffverfügbarkeit und -festlegung, Bodenorganismen, Struktur des Bodens und somit auf das gesamte Pflanzenwachstum (Kretzschmar 2010). Bei Absinken des pH-Wertes unter das Optimum können landwirtschaftliche Kulturpflanzen daher mit erheblichen Ertragsdepressionen reagieren.

Natürliche Prozesse und ackerbauliche Maßnahmen führen stetig zur Versauerung landwirtschaftlich genutzter Böden, so dass sich eine regelmäßige Ausbringung basisch wirkender Düngemittel (z.B. Kalkstein, Mergel, Dolomit) zur Anhebung auf den optimalen pH-Wert in der landwirtschaftlichen Düngepraxis etabliert hat. Die hiesige Kalkdüngempfehlung stützt sich dabei auf Messung des Boden-pH-Wertes entsprechend der VdLUFA Verbandsmethode (VdLUFA 2000). Hierfür wird eine repräsentative Bodenprobe aus der Krume des zu untersuchenden Schlages entnommen und nach Erstellung einer homogenen Mischprobe diese an ein Bodenuntersuchungslabor zur pH-Wert-Bestimmung geschickt. Unter Berücksichtigung von Bodenart und Humusgehalt wird anhand von Tabellen die nötige Kalkdüngemenge ermittelt, die in der Regel schlageinheitlich appliziert wird.

Landwirtschaftliche Flächen sind allerdings oft nicht einheitlich. Zurückzuführen ist dies sowohl auf die Entstehungsgeschichte der Böden, aber auch auf die zurückliegende und/oder heutige Bewirtschaftung wie beispielsweise ungleichmäßige Applikation von Düngern, nicht einheitliche Einarbeitung von Ernteresten oder Zusammenlegung von Flächen zu größeren Schlägen. Diese Flächenheterogenität kann in einer kleinräumigen Differenzierung der pH-Werte im Boden resultieren (Bianchini und Mallarino 2002; McBratney und Pringle 1997), so dass sich eine teilflächenangepasste Kalkapplikation anbietet. Die dazu notwendige Entnahmedichte der Bodenproben zur Gewährleistung einer zufriedenstellenden Genauigkeit

(je nach Standorteigenschaften 10 – 20 getrennte Proben á 8 – 10 Einstiche) ist aus Zeit- und Kostengründen mithilfe der Standardbodenprobenahme und anschließender Laboranalyse jedoch nicht praktikabel. Die Kalkung des Bodens erfolgt daher in der Praxis auch auf heterogenen Schlägen zumeist flächeneinheitlich. Um die gewünschte intensive Boden-pH-Wert-Kartierung zu ermöglichen, wurde in den USA von der Firma VERIS Technologies in Zusammenarbeit mit der University of Nebraska die Sensorplattform Veris MSP entwickelt. Diese ermittelt durch Online-Messung kleinräumig pH-Werte und die elektrische Leitfähigkeit (EC) des Bodens (Adamchuk et al. 1999; Lund et al. 2005).

Im Rahmen eines durch das Land Niedersachsen (NBank) und dem EU-Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) geförderten Forschungsprojektes an der Hochschule Osnabrück wird seit 2009 die Eignung dieses Sensors unter hiesigen Praxisbedingungen getestet und bewertet. Hierzu ist das Gerät auf seine Möglichkeiten zur Erfassung der räumlichen Variabilität von pH-Werten im Boden hin untersucht worden. Weiterhin ist die Vergleichbarkeit der online erfassten pH-Werte mit nach VdLUFA Verbandsmethode analysierten Bodenproben überprüft und daraus eine praxisorientierte Vorgehensweise zur teilflächenspezifischen Kalkdüngung erstellt worden.

2 Schlag-Kartierung mittels Veris MSP

Seit Frühjahr 2010 wurden mit der Sensorplattform insgesamt ca. 150 ha, verteilt auf 25 Ackerschläge (2 – 45 ha; S12 – Lt2), in Niedersachsen beprobt. Eine Beprobungsdichte von ca. 20 – 50 pH-Werten pro ha konnte dabei durch Fahrspurabständen von 15 - 30 m und Fahrgeschwindigkeiten von 5 – 13 km/h erzielt werden.

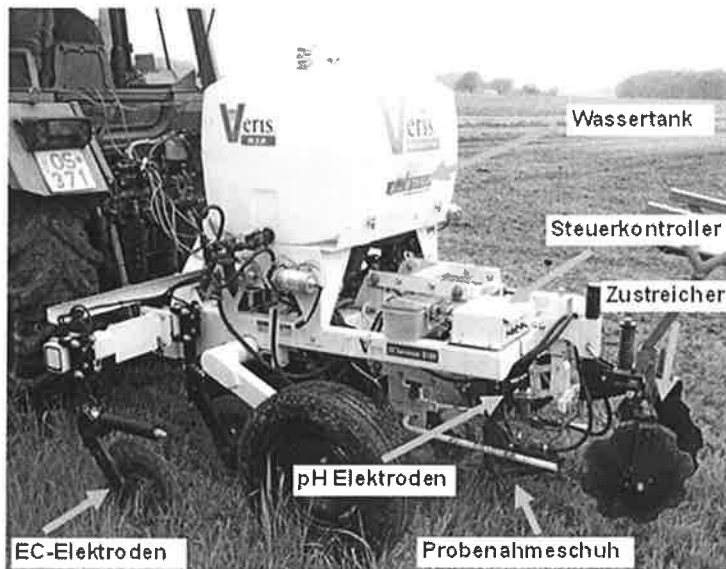


Abb. 1: Sensorplattform Veris MSP

Der als Anbaugerät an der Hochschule Osnabrück zur Verfügung stehende Sensor Veris MSP umfasst die Module „pH-Manager“ und „Soil EC Surveyor“ (Abb. 1), wobei letzteres die elektrische Leitfähigkeit (EC) des Bodens in einer Tiefe von 0 – 30 cm sowie 0 – 90 cm misst (vgl. Hinck et al. 2011). Für die Bestimmung des Boden-pH-Wertes ist das Veris MSP mit einem hydraulisch gesteuerten Probenahmeschuh ausgerüstet, welcher während der Fahrt in einer Bodentiefe von 8 – 10 cm geführt und anschließend mit Boden gefüllt ausgehoben wird. Dabei entsteht ein direkter Kontakt zwischen feldfeuchter Bodenprobe und zwei parallel angeordneten pH-Elektroden, welche den pH-Wert des Bodens messen. Bei Unterschieden zwischen den Messergebnissen beider Elektroden von mehr als 0,5 pH-Wert Einheiten wird der Messwert verworfen. Die durchschnittliche Messzeit beträgt ca. 6 – 9 sec. Jeder Messzyklus wird durch die Reinigung der Elektroden mit Wasser abgeschlossen, während der Probenahmeschuh bereits die nächste Bodenprobe sammelt. Alle erfassten Daten werden zusammen mit den dazugehörigen geografischen Positionen zur weiteren Verarbeitung auf einer Speicherkarte gespeichert.

Auf vier Schlägen wurde zusätzlich die Vergleichbarkeit der sensor-erfassten pH-Werte mit nach VdLUF A Verbandsmethode ermittelten Werten durch manuelle Vergleichsbodenprobenahme in 0 – 30 cm und anschließender Laboranalyse überprüft. Durch Rasterbeprobung sind dabei Probenahmedichten von 7 – 12 Proben/ha erzielt worden. Die Auswertung der Daten erfolgte durch deskriptive Statistik (Boxplot mit Median, $Q_{0,25}$, $Q_{0,75}$,

Minimum, Maximum), Regressionsberechnung sowie Korrelationsanalyse und durch Interpolation mittels Punkt-Kriging wie in Webster und Oliver (2007) beschrieben.

3 Ergebnisse und Weiterentwicklung

Über alle 25 kartierten Schläge hinweg sind mittels Veris MSP Messung deutliche kleinräumige Differenzen der Boden-pH-Werte nachweisbar. Die dabei auftretenden Spannweiten der gemessenen Veris pH-Werte variieren zwischen 0,9 – 3,1 Veris pH-Wert-Einheiten und sind somit von Schlag zu Schlag unterschiedlich ausgeprägt (Abb. 2).

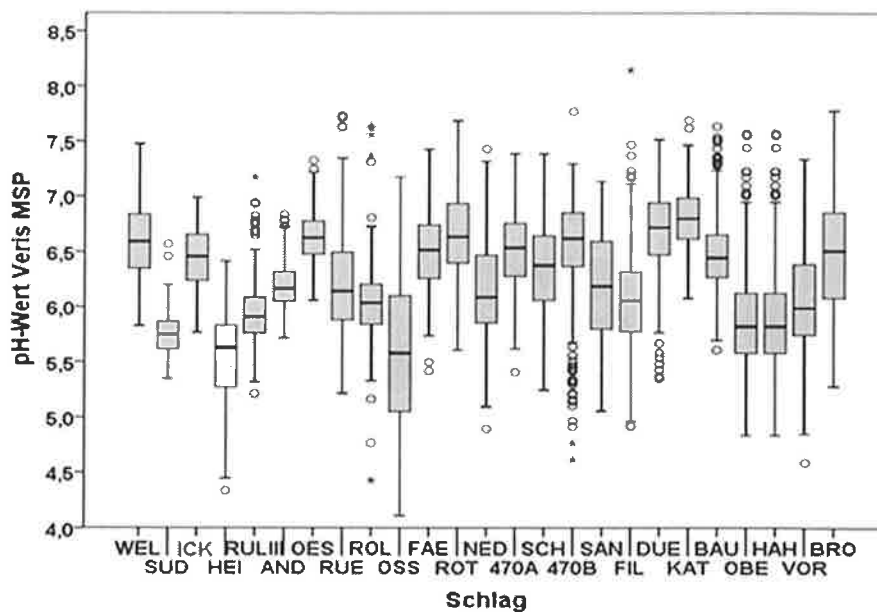


Abb. 2: Darstellung und statistische Auswertung der pH-Wert Analyseergebnisse nach Anwendung des pH-Wert Messverfahrens Veris MSP auf 25 Ackerschlägen in Niedersachsen

Die auf vier weiteren Schlägen parallel zur Sensor pH-Wert-Messung manuell entnommenen Bodenproben zeigen im direkten Vergleich, dass die pH-Wert-Differenzen innerhalb der Schläge bei der Messung nach VdLUF A Verbandsmethode ausgeprägter sind (Abb. 3). Dabei lässt sich insbesondere im tiefen pH-Wert Bereich unter pH 5,5 eine Überschätzung der pH-Werte durch das Veris MSP feststellen (Abb. 4). Dies ist, wie in weiteren Detailuntersuchungen gezeigt werden konnte, sowohl auf die unterschiedliche Bauart der

Messelektroden, auf das Fehlen der Austauschlerlösung mit Ca^{2+} -Ionen sowie auf die sehr kurze Messzeit bei der Online-Messung zurückzuführen (vgl. Borchert et al. 2010).

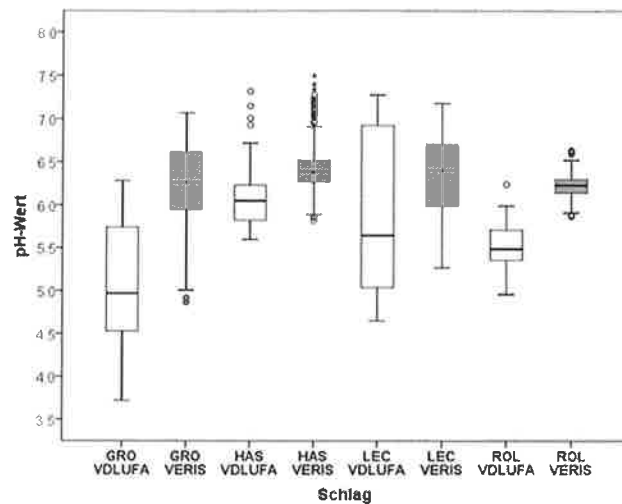


Abb. 3: Darstellung und statistische Auswertung der pH-Wert Analyseergebnisse Veris MSP Messung (Veris; grau) und VdLUFA Verbandsmethode (LUFA; weiß) auf vier Schlägen

Bei Zusammenfassung der vier Schläge ($n = 236$), ergibt sich mit $r^2 = 0,59$ ein zufriedenstellender Zusammenhang zwischen den im Online-Verfahren ermittelte pH-Werten und denen bei praxisüblicher Vorgehensweise nach VdLUFA Verbandsmethode (Abb. 4), der jedoch von Schlag zu Schlag unterschiedlich ausfällt (vgl. Olf et al. 2010).

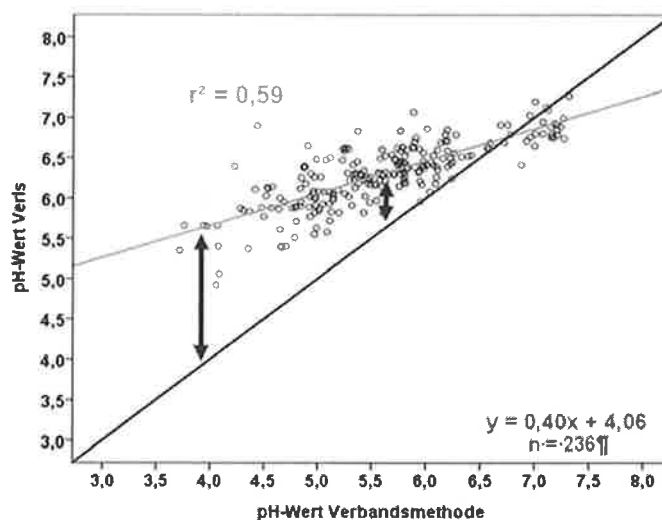


Abb. 4: Vergleich der pH-Wert Ergebnisse nach VdLUFA Verbandsmethode und Veris MSP ($n = 236$)

Weiter lassen sich mithilfe von interpolierten Karten der Veris-pH-Werte innerhalb der beprobten Schläge Zonen unterschiedlicher pH-Werte abgrenzen (Abb. 5 links), bei denen eine variable Kalkdüngung sinnvoll wäre. Diese Zonen decken sich gut mit dem pH-Wert-Verteilungsmuster, welches sich durch pH-Wert Messung nach VdLUFA Verbandsmethode ergibt (Abb. 5 rechts). Das pH-Wert-Niveau ist allerdings, wie bereits erwähnt, verschieden, so dass zur Verwendung der Veris MSP Daten für eine teilflächenspezifische Kalkdüngung eine Transformation der Sensor Messdaten mittels Referenzprobenahme nötig wird.

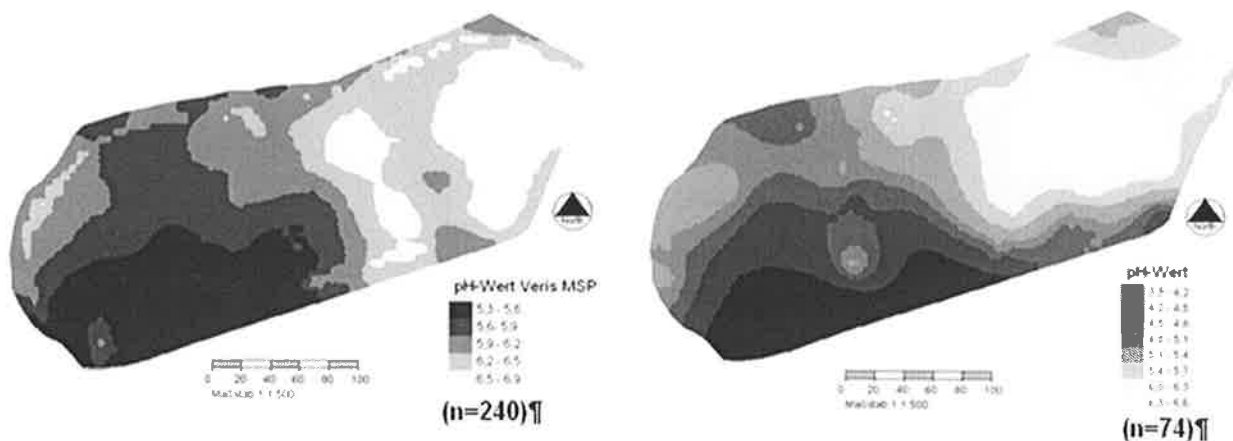


Abb. 5: Interpolierte pH-Wert-Karten nach Veris MSP Kartierung (n = 240; links) und pH-Wert Messung nach VdLUFA Verbandsmethode (n = 74; rechts) des Schlags GRO (5,9 ha)

Eine praxistaugliche Vorgehensweise ist hierfür an der Hochschule Osnabrück entwickelt worden. Dabei werden nach der Sensor-Messung die pH-Wert-Daten in eine auf Excel basierende Software eingelesen und in drei Klassen (niedrig, mittel- orientiert am Median, hoch) eingruppiert. Die Darstellung der einzelnen Veris-pH-Wert-Messpunkte erfolgt als Schlagkarte, anhand derer für jede Klasse eine repräsentative Zone auf dem Schlag ausgewählt wird. Die Abb. 6 zeigt beispielhaft für den Schlag Rottland (12 ha; S13 – Lt2) die Veris-pH-Wert-Messpunkte eingeteilt nach Klassen und die ausgewählten Referenzprobenorte. Aus jeder dieser drei Zonen wird eine Bodenmischprobe (15 Einstiche mit dem Bohrstock auf 0 – 30 cm) als Referenzprobe entnommen und deren pH-Wert nach VdLUFA Verbandsmethode analysiert. Mithilfe einer Regressionsfunktion werden anschließend die Veris-pH-Werte transformiert, so dass sie konform zur VdLUFA Verbandsmethode sind. Aus diesen Werten wird mittels GIS-Software (z.B. OpenJump) eine pH-Wert-Schlagkarte im Raster der Arbeitsbreite des Düngerstreuers erstellt. Diese ist durch weitere

Schluginformationen wie beispielsweise den Veris MSP EC-Werten und/oder digitalen Reichsbodenschätzungskarten zu ergänzen, um daraus eine optimierte Kalkapplikationskarte zu generieren.

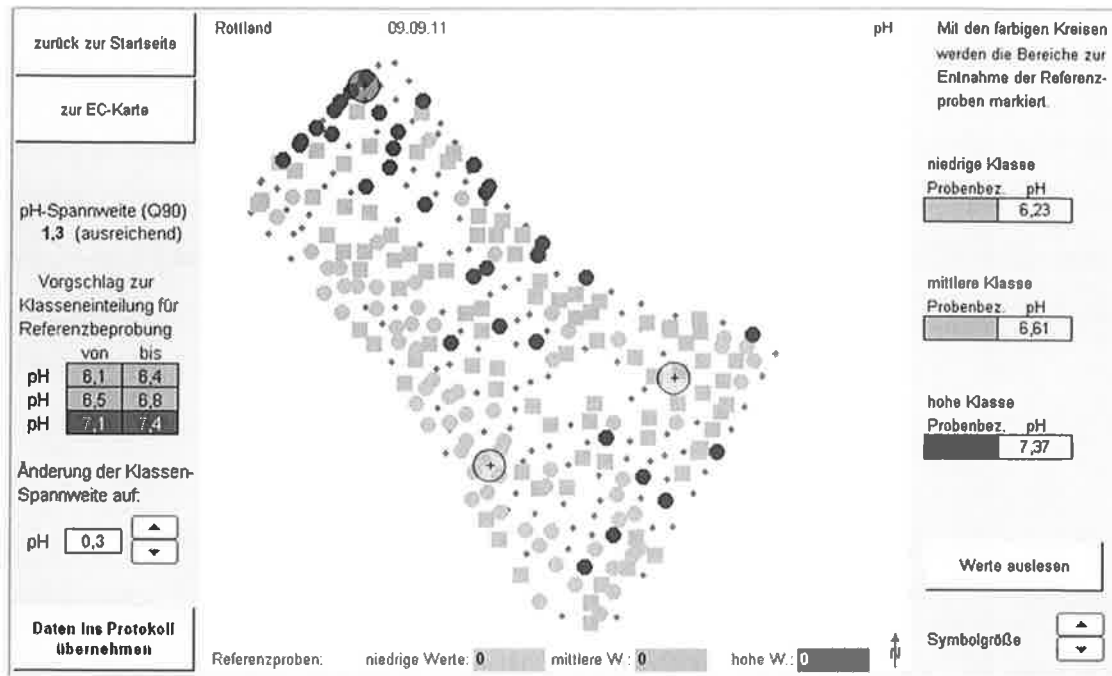


Abb. 6: Darstellung der Veris pH-Werte des Schlags Rottland mittels Excel basierter Software zur Identifizierung von Referenzprobenahmeorten

4 Fazit

Grundsätzlich ist der pH-Wert-Sensor Veris MSP geeignet, kleinräumige pH-Wert-Differenzen zu erfassen und Zonen mit unterschiedlichen pH-Werten innerhalb der Schläge abzugrenzen. Da die online ermittelten pH-Werte vor allem im tiefen pH-Wert-Bereich höher als bei der üblichen Praxismethode (VdLUFA Verbandsmethode) liegen, können die Daten nicht direkt in der hiesigen Kalkdüngemethode Verwendung finden. In der Praxis lässt sich somit eine Flächenkartierung mit dem Veris MSP nur mithilfe von Referenzbodenprobenahmen für die Kalkdüngemethode nach VdLUFA Verbandsmethode nutzen. Die anwenderorientierte Vorgehensweise, die von der Hochschule Osnabrück entwickelt wurde, bietet dabei die Möglichkeit vor Ort Referenzprobenahmeorte schnell und einfach zu bestimmen und mittels eines schlagspezifischen Algorithmus die Veris MSP pH-Werte VdLUFA konform umzurechnen.

Literaturverzeichnis

- Adamchuk, V.I., Morgan, M.T., Ess, D.R. (1999): An automated sampling system for measuring soil pH. *Trans. ASAE* 42, S. 885–891.
- Bianchini, A. A. und Mallarino, A. P. (2002): Soil-sampling alternatives and variable-rate liming for a soybean-corn rotation. *Agronomy Journal* 94, 1355-1366.
- Borchert, A., Trautz, D. und Olf, H.-W. (2010): Eignung des Online-Messverfahrens VERIS MSP zur Erfassung der räumlichen Variabilität von pH-Werten in Ackerböden: Validierung anhand von Labor- und Felduntersuchungen. *VDLUFA-Schriftenreihe* 66.
- Hinck, S., Mueller, K., Emeis, N. und Christen, O. (2011): Online-Messung von geoelektrischer Leitfähigkeit. *Diskussionsforum Bodenwissenschaften „Boden und Messverfahren – Aktuelle Entwicklungen“*, Osnabrück, 28. Oktober 2011.
- Kretschmar, R. (2010): Bodenreaktion und pH Pufferung. In: Blume, H.P., Brümmer, G.W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K. und Wilke, B.-M. (Hrsg.): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Lund, E.D., Adamchuk, V.I., Collings, K.L., Drummond, P.E. und Christy, C.D. (2005): Development of soil pH and lime requirement maps using on-the-go soil sensors. In: J.V. Stafford (Hrsg.) *Precision Agriculture 2005*, 457–464. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- McBratney, A. und Pringle, M. (1997): Spatial variability in soil implications for precision agriculture. In: J.V. Stafford (Hrsg.): *Precision Agriculture '97*, 3-31. BIOS, Oxford, UK.
- Olf, H.-W., Borchert, A. und Trautz, D. (2010): Validation of on-the-go soil pH-measurements - primary results from Germany. In: R. Khosla (Hrsg.) "Proceedings of the 10th International Conference on Precision Agriculture", Denver, CO, USA (CD-Rom).
- VDLUFA (2000): Ermittlung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden auf Basis des pH-Wertes. In: *Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (Hrsg.) Methodenbuch I „Die Untersuchung von Böden“*. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- Webster, R. und Oliver, M. (2007): *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley & Sons, New York, USA.

Neue Sensoren und Datenerfassung in der Bodenhydrologie

Thomas von Oepen

Zusammenfassung

Aufgrund von konstanten Klimaveränderungen der gemäßigten Breiten nimmt die Bedeutung der Messung des Parameters Bodenfeuchte in den letzten 10 Jahren rapide zu. Es werden die zur Zeit gängigen elektrischen Messmethoden an Sensorbeispielen vorgestellt und dabei werden auch die modernen Möglichkeiten der automatischen Datenerfassung, Datenfernübertragung und der internetbasierten Datenvisualisierung am Beispiel WEBvis erläutert.

1 Einleitung

Die Bodenfeuchte ist in der Hydrologie eine zentrale Größe. Sie beeinflusst alle physikalischen, biologischen und chemischen Prozesse in der ungesättigten Bodenzone. Die zeitliche und räumliche Erfassung der Bodenfeuchte ist deshalb für viele Anwendungen von großer Bedeutung. Der Begriff Bodenfeuchte wird in der Literatur mit verschiedener Bedeutung verwendet. Betrachten wir das System Pflanze-Boden, so ist in der Regel das Wasserpotential Ψ_t die treibende Kraft für den Wassertransport in die und durch die Pflanze. Dabei bildet das Matrixpotential Ψ_M für den Boden den Hauptteil, der als Bodenwasserpotential oder Wasserspannung (Saugspannung) bezeichnet wird.

$$\Psi_t = \Psi_M + \Psi_G + \Psi_O \quad (\text{Gl.1.1}) \quad [\Psi_G: \text{Gravitationspotential}, \Psi_O: \text{osmotisches Potential}]$$

Betrachten wir den Boden als Wasserspeicher mit all seinen hydrologischen Eigenschaften, so wird meistens der Begriff des volumetrischen Wassergehaltes Θ verwendet um die Wassermenge die der Boden in seinen Poren gespeichert hat zu beschreiben. Der maximale Wassergehalt eines Bodens ist somit im wesentlichen von der Porenstruktur abhängig.

Die sogenannte pF-Kurve beschreibt den Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Wasserspannung.

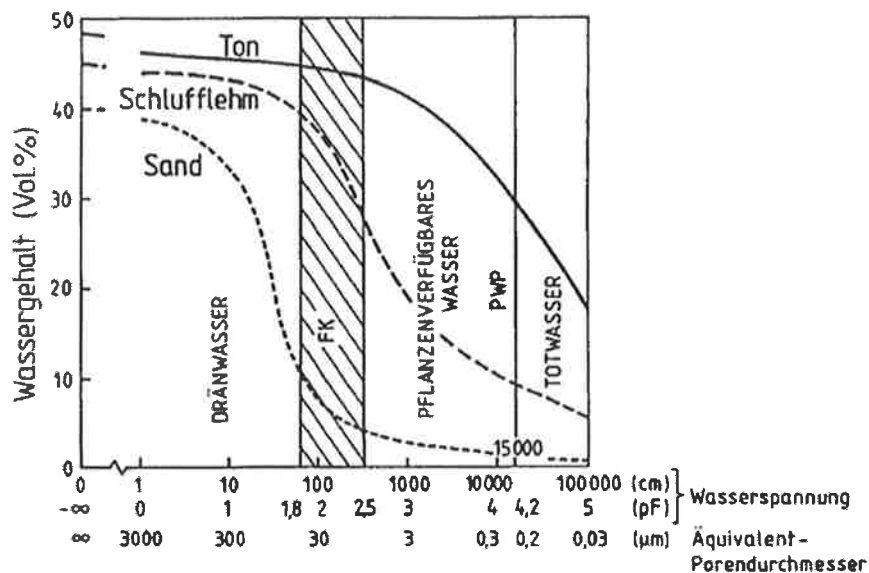


Abb. 1: Die Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserpotential bei Sand, Schluff und Lehm (Quelle: Ehlers, *Wasser in Boden und Pflanze*, 1996)

Sensorisch werden die Parameter Wassergehalt und Wasserpotential über verschiedene messtechnische Prinzipien erfasst. Diese Messprinzipien werden im weiteren an Beispielsensoren erläutert. Allen Sensoren ist gemeinsam das sie heute mit einem Microcontroller bzw. AD/DA-Wandler ausgestattet sind und sie so als genormtes Analogsignal oder digitales Bussignal von Datenloggern bzw. Anzeigeeinheiten automatisiert weiterverarbeitet werden können. Für die Freifeld- und Gewächshausmontage sind aufgrund des geringen Eigenstromverbrauches und speziell entwickelter Sensorinterfaces auch kabellose Sensornetzwerke realisierbar. Anwendungsbeispiele und Sensorinterfaceentwicklungen werden im Bereich Datenerfassung vorgestellt.

Neben der Messwerterhebung durch Sensoren und Datenlogger nimmt auch die Datenvisualisierung und der Datenzugriff über das Internet einen immer größeren Stellenwert in den vernetzten wissenschaftlichen Arbeitsgruppen ein. Mit der Vorstellung von WEBvis soll ein kurzer Einblick in die Möglichkeiten des Vergleiches von bodenhydrologischen Messstellen gegeben werden.

2 Messmethoden für Wassergehalt

2.1 FDR Messtechnik am Beispiel der Thetasonde ML2x

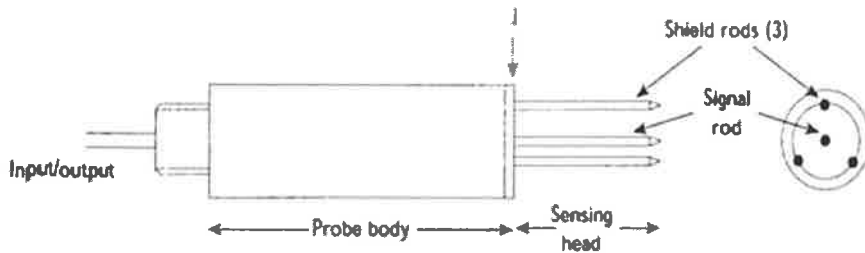


Abb. 2: Schematische Darstellung der Thetasonde ML2x

Die Bestimmung des volumetrischen Feuchtegehaltes erfolgt bei den FDR-Sonden über eine Messung der Impedanz. Die Stäbe der Sonde verhalten sich dabei wie ein Koaxialkabel (siehe Abbildung 2). Werden die Spieße in den Boden gesteckt, verhält sich der Boden wie ein Dielektrikum. Die von der Sonde gemessene Impedanz hängt dann von der Dielektrizitätszahl des Bodens zwischen den Spießen ab. Da die Dielektrizitätszahl von Wasser bei ca. 80 und die von Bodenteilchen zwischen 2-4 und von Luft bei 1 liegen, kann aus der Messung der Dielektrizitätszahl direkt auf den Wassergehalt geschlossen werden. Das Gerät rechnet die ϵ_r -Werte für mineralische Böden über folgende Formel in Feuchtwerte um (Gaskin und Miller, 1996):

$$\Theta = \frac{(\sqrt{\epsilon_r} - 1.6)}{8.4} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

2.3 FDR Technik am Beispiel der SM300



Abb. 3: Neueste FDR Sonde von Delta-T Devices

Es wird wie bei der ML2x mittels der FDR Technik (Frequency Domain Reflectometry) der Wassergehalt Θ gemessen. Jedoch werden bei der SM300 nicht zirkulare elektromagnetische Felder erzeugt, sondern es werden keulenförmige Felder erzeugt. Die Sonde ist wesentlich kompakter und daher besser für Topfmessungen geeignet. Außerdem wird aufgrund eines in den Sondenkörper eingebauten Thermistors auch die Bodentemperatur mit als analoges Messsignal ausgegeben.



Abb. 4: Bodenprofilsonden PR2 für Wassergehaltsmessungen

2.4 FDR Technik am Beispiel der Profilsonde PR2

Die Profilsonde misst Bodenwassergehalt in verschiedenen Tiefen im Bodenprofil. Sie besteht aus einer dichten Kunststoff-Composite-Lanze von rd. 25 mm Durchmesser, mitelektronischen Sensorelementen (in Form von paarweise angeordneten Edelstahlringen), die an vorgegebenen Stellen angeordnet sind. Während der Messung wird die Sonde in ein Messrohr eingeführt. Diese Messrohre sind speziell angefertigte,

dünnwandige Röhren aus GfK (Glasfaser-verstärktem Kunststoff), die das Eindringen der elektromagnetischen Strahlung in den Boden optimal gewährleisten. Wenn die Stromversorgung an die Profilsonde angelegt wird, erzeugt Sie ein 100MHz-Signal. Dieses Signal wird auf die Sensorpaare der Sonde gelegt, die somit ein elektromagnetisches Feld aufbauen, das ca.100 mm in den Boden hinein reicht. (Das elektromagnetische Feld dringt sehr gut durch die Messrohre, aber weit weniger gut, durch Lufttaschen/-löcher entlang der Messrohre. Der Wassergehalt des die Messringe umgebenden Bodens bestimmt die dielektrischen Eigenschaften. Wenn die dielektrischen Eigenschaften des Bodens verschiedenen von denen der Sondenelektronik sind, wird ein Teil des 100Mhz Signals zurückreflektiert. Dieser reflektierte Teil des Signals überlagert sich mit dem anregenden Teil zu einer stehenden Welle. Die Spannung dieser stehenden Welle dient schließlich als eine einfache, aber empfindliche Messung des Bodenwassergehalts Θ .

$$\Theta = \frac{(1.125 - 5.53V + 67.17V^2 - 234.42V^3 + 413.56V^4 - 356.68V^5 + 121.53V^6) - a_0}{a_1}$$

[a_0, a_1 sind die Kalibrierkoeffizienten] (Delta-T Devices, PR2-UM-3.0,2011)

2.5 TDR Messtechnik am Beispiel der TRIME Pico64



Abb. 6: Prinzipskizze einer TRIME Sonde

TRIME (Time Domain Reflectometry mit Intelligenten Micromodul Elementen) basiert auf dem TDR-Prinzip (auch Kabelradar genannt). Ein im TRIME-Gerät erzeugter hochfrequenter (1GHz) TDR-Impuls läuft entlang von metallischen Stäben oder Halbschalen (je nach Sonde) und baut ein elektromagnetisches Feld um diese Leiter und damit um die TRIME-Sonden auf. Am Ende der Leiter wird der Impuls vollständig reflektiert und wandert wieder zurück zur Quelle. Die Laufzeit t des Impulses (10ps ..2ns !) steht über die Dielektrizitätskonstante in direktem Zusammenhang mit dem volumetrischen Wassergehalt im gemessenen Medium.

$$t = \frac{2l}{c_0} \sqrt{\epsilon_r} \quad (\text{Gl. 2.2}) \text{ und}$$

$$\Theta = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_r - 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_r^2 - 4.3 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon_r^3 \quad (\text{Gl. 2.3})$$

[c_0 : Lichtgeschwindigkeit, l : Länge der Stäbe] (Topp, 1980)

Neben dem Bodenwassergehalt Θ gibt die TRIME Pico64 auch noch die Bodentemperatur T und die elektrische Leitfähigkeit EC heraus.

Für beide Messmethoden (FDR, TDR) gilt das man mittels bodenspezifischer Kalibrierung sehr genaue Messergebnisse bei geringem Energieverbrauch erzielen kann.

Mit beiden Messmethoden können nicht nur der Wassergehalt eines Bodens, sondern auch die elektrische Leitfähigkeit (EC) bestimmt werden. Als Beispiel sei hier die Hydraprobe erwähnt.

2.6 FDR Messtechnik am Beispiel der Hydraprobe



Abb. 7: Hydraprobe – VWC/EC Sonde

Die Sonde misst die Bodenfeuchte und den Salzgehalt über eine konstante, dielektrische Messung im hohen Frequenzbereich (50MHz). Simultan werden dabei der Imaginärteil (konduktiver Teil) und der Realteil (kapazitiver Teil) des elektrischen Widerstands des Bodens ermittelt. Der kapazitive Teil gibt Auskunft über den Bodenwassergehalt Θ (siehe Gleichung 2.1) und der konduktive Anteil über die Bodenleitfähigkeit EC . Die Temperatur T wird über einen Temperaturfühler im Kopf der Sonde gemessen. Je besser der Strom fließt, desto größer der Wasseranteil des Bodens und desto kleiner der Luftanteil. In einem nassen

Boden steigt der kapazitive Widerstand stetig an. Anhand einer Kalibrierkurve ist der direkte Zusammenhang zur Bodenfeuchte sichtbar. Gelöste Salze steigern die sonst geringe Leitfähigkeit des Bodens. Mit Hilfe der Bodenleitfähigkeitsmessung EC und dem Betrachten des kapazitiven Widerstands lassen sich Aussagen zum Salzgehalt machen.

$$EC = 2\pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{i(TC)} \quad (\text{Gl. 2.4}) \quad (\text{Stevenswater, 2007})$$

[f : Frequenz, ε_0 : Dielektrizitätskonstante fürs Vakuum, $\varepsilon_{i(TC)}$: imaginär Teil der temperaturkompensierten Dielektrizitätskonstante]

In der Sonde lassen sich bodenspezifische Kalibrierungen hinterlegen. Außerdem gibt es die Hydraprobe nicht nur mit analogen Ausgängen, sondern auch mit dem digitalen SDI-12 Bus.

3 Messmethoden für Wasserpotential

3.1 Elektronische Tensiometer am Beispiel des T8 Tensiometer



Abb.7: T8-Tensiometer als schematisch Schnitt und Foto (T8 Tensiometer Handbuch, 2009)

Das Bodenwasser und das Wasser im Tensiometer haben Kontakt über die poröse Keramik, die wasserdurchlässig ist. Die Bodenwasserspannung überträgt sich direkt auf den Sensor, der das entsprechende analoge elektronische Messsignal liefert. Der atmosphärische Referenzdruck wird durch das Kabel und eine Membrane am Kabel übertragen.

Da es hierbei um eine Referenzdruckmessung handelt endet der Messbereich bei typischerweise -850 hPa, d.h. pF 2.3. Darüber hinaus laufen die Tensiometer aus und müssen wieder über die Befüllkapillare mit entgastem Wasser befüllt werden, was in Trockenperioden einen erhöhten Wartungsaufwand bedeutet.

Es gibt auch selbst befüllende Tensiometer wie das TS1, die jedoch einen erhöhten Energieverbrauch haben.

Neben dem Wasserpotential Ψ_M wird auch die Bodentemperatur T gemessen und als Analogausgang zur Verfügung gestellt. Aufgrund des integrierten Microprozessors können die Messwerte und die Füllstandsanzeige auch digital über den Tensiolink Bus (RS485) oder den SDI-12 Bus ausgegeben werden.

3.2 Equitensiometer am Beispiel EQ15



Abb. 8: Equitensiometer EQ15

Equitensiometer bestehen aus 2 Teilen, nämlich einer Wassergehaltssonde in diesem Fall eine ML2x und einem Gleichgewichtskörper mit bekannter pF-Kurve. Für die Messung muss der Gleichgewichtskörper mit dem Boden so in Kontakt gebracht werden, dass sich ein Gleichgewicht des Matrixpotentials im Boden und im bekannten Material ausbildet. Durch Messung des Wassergehaltes und unter zu Hilfenahme der bekannten pF-Kurve kann man das

Wasserpotential des Bodens bis -15000 hPa bestimmen. Für die Berechnung wird mit jedem Sensor eine Stützwerttabelle geliefert.

3.3 Wasserpotentialmessung mit pF-Meter

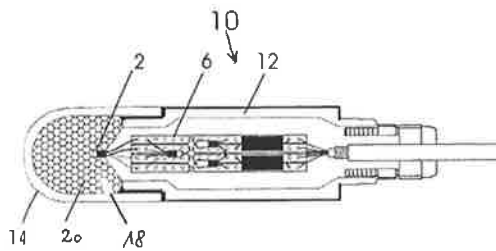


Abb. 9: Schematisch Skizze des pF-Meters (Patentschrift DE000010164018A1)

Mittels temperaturabhängiger Widerstände wird eine Wheatstonsche Brückenschaltung aufgebaut, die nach Aufheizung der Widerstände ein Spannungsdifferenzsignal abhängig von der Wärmekapazität des substratähnlichen Materials liefert. Da die Wärmekapazität des Wassers weitaus höher liegt als die Wärmekapazität von Luft, Mineralien und organischen Stoffen, korrelieren die Spannungsdifferenzen sehr gut mit dem Wassergehalt des im Keramikkörper integrierten Substrats. Auch hier wird davon ausgegangen das sich ein Gleichgewichtszustand bezüglich des Wassergehaltes zwischen Boden und bekannten Sondensubstrat einstellt. Mittels einer pF-Kurven Kalibrierung jeder Sonde ab Werk und den dadurch eingetragenen Kalibrierwerten im Microprozessor der Sonde, kann der pF-Wert direkt als Analogsignal oder über einen digitalen SDI-12 Bus ausgegeben. Außerdem wird die Bodentemperatur T mit ausgegeben.

4 Datenerfassung

Eine immer größer werdende Anzahl von Sensoren mit SDI-12 Bus Protokoll etablieren sich auf dem europäischen Markt. Das SDI-12 Kommunikationsprotokoll wurde in Kooperation mit dem USGS (U.S. Geological Survey) für Pegelsonden auf dem amerikanischen Markt entwickelt. Es handelt sich hierbei um ein Serial Data Interface mit 1200baud, dessen Protokoll von der SDI-12 Support Group z.Zt. in der Version 1.3 standardisiert vorliegt (SDI-12, 2009).

Auch andere Busprotokolle auf RS485 Basis werden von verschiedenen Anbietern zur Verfügung gestellt. Durch die Verwendung von Microcontrollern beim Bau von Sensoren, können diese auch für die digitalisierte Kommunikation mit den Sensoren benutzt werden. Durch die Einführung von Busprotokollen wie z.B. dem SDI-12 Protokoll können heute viele Sensoren über eine einzige Busleitung ihre Messwerte (auch mehrere pro Sensor) an einen Datenlogger, der dieses Protokoll unterstützt, weitergeben. Dadurch sind wesentlich größere und verteilte Sensornetzwerke mit deutlich geringerem Kabelaufwand möglich.

Nicht nur Sensoren können über Bus-Leitungen miteinander verbunden werden, auch mehrere Datenlogger können per seriellen Busprotokoll vernetzt werden. Für den Bodenfeuchtebereich wurde speziell der kleine GP1 – Irrigation Monitor mit Steuerungsmöglichkeiten entwickelt, der über ein serielles RS232 Businterface mit mehreren Datenlogger zu einem kleinen Netzwerk zusammen geschlossen werden kann und über nur eine Auslesestelle kann dann auf alle Datenlogger zugegriffen werden, was im besonderen für eine Funkdatenübertragung per GSM (M2M) von Vorteil ist. Neben den kabelgebundenen Bus-Topologien entwickeln sich in den letzten Jahren auch vermehrt Kurzstreckenfunklösungen für Sensoren, bei denen analoge Sensoren über Sensorinterfaces an zentrale Datenloggereinheiten, sogenannte Basisstationen, ihre Werte in digitaler Form per Funk (868 MHz, 2.4GHz etc.) weitergeben. Auch die Weitergabe der in Datenloggern gespeicherten Werte über Langstreckenfunk (GSM oder GPRS) ist heute Stand der Technik.

4.1 Datenlogger mit kompletter SDI-Funktionalität am Beispiel des SDI-Log



Abb.10: SDI-Log mit Kompakt-Wetterstation und Thetasonden (UP GmbH, Prospekt, 2009)

Der SDI-Log ist ein 4 Kanal-Datenlogger mit SDI12-Schnittstelle der bis zu 50 unterschiedlich SDI-12 Befehle bearbeiten und abspeichern kann. Er verfügt über einen 1GByte großen SD-Kartenspeicher. Über die Konfigurationssoftware kann jeder SDI-Sensor nach dem SDI-Standard 1.3 konfiguriert und ausgelesen werden. Über ein zusätzliches integrierbares GPRS-Modem können die Daten automatisiert auf einen FTP-Server übertragen werden. Über zusätzliche SDI-Verteilerdosen können schnell größere vernetzte Sensortopologien erreicht werden.

Für den Bereich der Bodenhydrologie gibt es viele SDI-12 Sensoren: Bodentemperaturlanzen, Tensiometer, VWC/EC Sonden, pF-Meter, Pegelsonden, pH-, Leitfähigkeits-, O₂- und Trübungssonden, Kompakt-Wetterstationen, 6fach Counter. Alle anderen analogen Sensoren können über ein Analog-SDI- Interface angeschlossen werden.

4.2 Ein kabelloses Datenloggersystem am Beispiel des Scatter100

S Sensorinterfaces Basisstation Interface Log, Monitor, Alarm

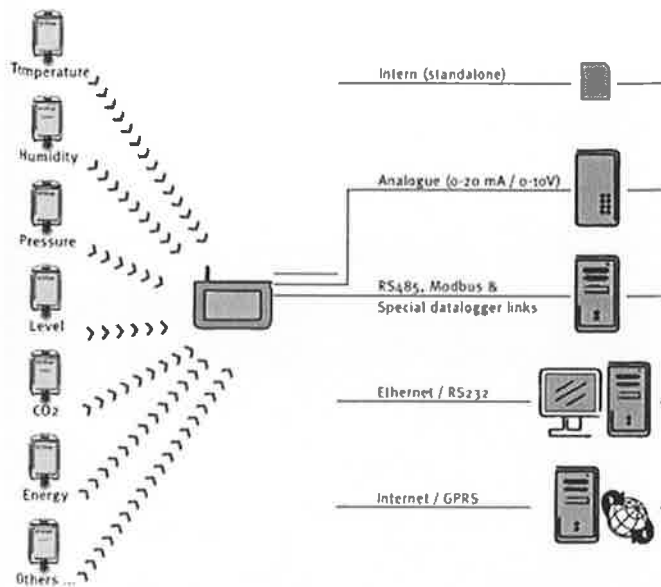


Abb. 11: Prinzip des Scatter100 Funknetzes (Wireless Value, Brochure, 2009)

Das Scatter100 Funknetz besteht aus bis zu 100 Sensorinterfaces, einer Basisstation mit SD-Kartenspeicher und einem optional integrierten GSM Modem, sowie der Scatter100 Software.

Jedes Sensorinterface selbst kann bis zu 10000 Datensätze speichern, wenn es keine Funkverbindung zur Basestation hat. Die Basestation speichert die einlaufenden Daten der Sensorinterfaces auf seiner SD-Karte. Das Auslesen der Basestation erfolgt direkt über RS232 oder über eine konfigurierbare Callback-Funktion des GSM Modems. Die Sensorinterfaces arbeiten im 868-870 MHz Bereich und haben eine Reichweite bis zu 1000m bei freier Sicht. In Gewächshäusern und im Wald ist eine reelle Reichweite von bis zu 100m und im freien Feld eine Reichweite von 400m erreicht worden. Für den Bereich Bodenhydrologie und Pflanzenphysiologie wurden spezielle Sensorinterfaces z.B. ein Switching Interface zum Einschalten einer Warmup-Spannung oder ein Potentiometer Interface für Dendrometer entwickelt. Ende des Jahres 2011 wird es ein neues SDI12 Interface geben.

4.3 Internetbasierte Datenvisualisierung am Beispiel WEBvis

Die Entwicklungen auf dem GSM und GRPS Markt der letzten Jahre ermöglicht heute für fast jedermann zu vertretbaren Kosten die automatische Datenübertragung der Messdaten direkt auf den Büro-PC – oder direkt in eine internetbasierte Datenbank. Letzteres bietet zusätzlich den Vorteil, dass der Anwender auf „seinem“ PC's gar nicht erst spezifische Fremdsoftware installieren muss, sondern über einen Passwort-geschützten Zugang im Internet Zugriff auf seine Messdaten erhält. Aufgrund der höheren IT-Beschränkungen in den Instituten ist dies ebenfalls ein weiterer positiver Nebeneffekt. Die tägliche Aktualisierung der Messdaten im Internet erhöht auch die prinzipielle Datenverfügbarkeit, da Service-Einsätze besser nach Bedarf geplant werden können und so Ersparnissen bei den Reisekosten erzielt werden können.

Moderne Online-Monitoring-Software wie z.B. die WEBvis bietet dem Anwender weitere nützliche Features zur besseren Übersicht von Messdaten mehrerer Stationen, wie z.B. eine statistische Auswertung der Daten in Tages- Monats- und Jahresstatistiken, die tabellarisch und graphisch dem Anwender zur Verfügung stehen. Der Datendownload erfolgt direkt von der WEBvis in Excel. Ein automatischer Alarm meldet fehlende Daten direkt an die zuständige Person per Email. Neben den Messdaten können auch Kamerabilder zu der Station eingeblendet werden. Außerdem kann die WEBvis Messdaten verschiedener Stationen in eine Grafik einblenden.

5 Literaturangaben

Gaskin, G. J. und Miller, J. D., 1996, Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique: Journal of agricultural engineering research, **68**, 153-160.

Topp, G.C., J.L. Davis & A.P. Annan (1980): Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res. 16, 574-582.

Delta-T Devices, PR2 User Manual, PR2-UM-3.0, 2011

Stevenswater Inc., Hydraprobe Manual , 2007

UMS GmbH, T8 – Tensiometer Handbuch, 2009

Wollesen, Patentschrift DE10164018A1, 2003

SDI-12 Support Group, A Serial-Digital Interface Standard Version 1.3, 2009

UP GmbH, Scatter100 Leaflet, 2009

Wireless Value, WiSensys Brochure, 2009



Hochschule Osnabrück
University of Applied Sciences



IMPRESSUM

Für den Inhalt der Einzelbeiträge zeichnen die Autoren verantwortlich.

Diskussionsforum Bodenwissenschaften, Heft 11 (2011):
Boden und Messverfahren – Aktuelle Entwicklungen

Herausgeber:
Hochschule Osnabrück
Fakultät Agrarwissenschaften & Landschaftsarchitektur
Am Krümpel 31
49090 Osnabrück
Telefon: 0541-969-5110
Telefax: 0541-969-5170
E-Mail: al@hs-osnabrueck.de
Internet: <http://www.al.hs-osnabrueck.de>

Redaktion:
Prof. Dr. Rüdiger Anlauf (r.anlauf@hs-osnabrueck.de)
Prof. Dr. Helmut Meuser (h.meuser@hs-osnabrueck.de)