Das Lebensministerium



Handbuch Agrogeophysik

Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Heft 25/2008

Freistaat Sachsen

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Potenzial und Anwendungsbeispiele geophysikalischer Techniken in Landwirtschaft und Bodenkunde

Dr. Martin Müller, Prof. Dr. Ugur Yaramanci

Dr. Olaf Nitzsche

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung **1**

1.1 Hintergrund/Anlass . . . 2

1.2 Ziele . . . 3

1.3 Struktur . . . 3

2 Zielgrößen geophysikalischer Verfahren auf landwirtschaftlichen Flächen **3**

2.1 Parameter/Bodenkennwerte . . . 3

2.1.1 Bodenart/Tiefgründigkeit/Horizontierung . . . 4

2.1.2 Bodengefüge/Bodenstruktur/Porosität . . . 5

2.1.3 Aktueller Bodenwassergehalt, Bodenfeuchte . . . 7

2.1.4 Organische Bodensubstanz . . . 8

2.1.5 Grundwasserflurabstand . . . 9

2.2 Nutzung der gewonnenen Parameter . . . 9

2.2.1 Teilflächenspezifische Landwirtschaft . . . 9

2.2.2 Ableitung von Bodenkennwerten für planerische Belange . . . 10

3 Geophysikalische Verfahren und ihre Anwendung **11**

3.1 Messgebiet . . . 12

3.2 Georadar (GPR) . . . 14

3.2.1 Beschreibung des Verfahrens . . . 14

3.2.2 Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft/Bodenkunde . . . 14

3.2.3 Aussagekraft der Ergebnisse . . . 15

3.2.4 1. Feldbeispiel . . . 16

3.2.5 2. Feldbeispiel . . . 18

3.2.6 Entwicklungsstand / Praxisreife / flächenhafte Exploration . . . 19

3.2.7 Entwicklungsperspektiven für das Verfahren . . . 19

3.2.8 Kosten . . . 19

3.3 Feuchtesensoren (TDR) . . . 19

3.4 Geoelektrik (DC) . . . 20

3.4.1 Beschreibung des Verfahrens . . . 21

3.4.2 Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft/Bodenkunde . . . 23

3.4.3 Aussagekraft der Ergebnisse . . . 23

3.4.4 Feldbeispiel . . . 24

3.4.5 Entwicklungsstand / Praxisreife / flächenhafte Exploration . . . 26

3.4.6 Entwicklungsperspektiven für das Verfahren . . . 26

3.4.7 Kosten . . . 27

3.5 Elektromagnetik (EM) . . . 27

3.5.1 Beschreibung des Verfahrens . . . 27
3.5.2 Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft/Bodenkunde . . . 27
3.5.3 Aussagekraft der Ergebnisse . . . 28
3.5.4 Feldbeispiel . . . 29
3.5.5 Entwicklungsstand / Praxisreife / flächenhafte Exploration . . . 32
3.5.6 Entwicklungsperspektiven für das Verfahren . . . 32
3.5.7 Kosten . . . 32
3.6 Kernspinresonanz (SNMR) . . . 32
3.6.1 Beschreibung des Verfahrens . . . 33
3.6.2 Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft/Bodenkunde . . . 33
3.6.3 Aussagekraft der Ergebnisse . . . 34
3.6.4 Feldbeispiel . . . 34
3.6.5 Entwicklungsstand / Praxisreife / flächenhafte Exploration . . . 38
3.6.6 Entwicklungsperspektiven für das Verfahren . . . 38
3.6.7 Kosten . . . 39
3.7 Gamma-Spektrometrie . . . 39
3.7.1 Beschreibung des Verfahrens . . . 39
3.7.2 Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft/Bodenkunde . . . 40
3.7.3 Aussagekraft der Ergebnisse . . . 40
3.7.4 1. Feldbeispiel . . . 40
3.7.5 2. Feldbeispiel . . . 41
3.7.6 Entwicklungsstand / Praxisreife / flächenhafte Exploration . . . 41
3.7.7 Entwicklungsperspektiven für das Verfahren . . . 42
3.7.8 Kosten . . . 43
3.7.9 Bemerkungen . . . 43
3.8 Induzierte Polarisation (IP/SIP) . . . 43
3.8.1 Beschreibung des Verfahrens . . . 43
3.8.2 Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft/Bodenkunde . . . 44
3.8.3 Aussagekraft der Ergebnisse . . . 44
3.8.4 Feldbeispiel . . . 44
3.8.5 Entwicklungsstand / Praxisreife / flächenhafte Exploration . . . 46
3.8.6 Entwicklungsperspektiven für das Verfahren . . . 46
3.8.7 Kosten . . . 46
3.9 Seismik . . . 46
3.9.1 Beschreibung des Verfahrens . . . 46
3.9.2 Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft/Bodenkunde . . . 47
3.9.3 Aussagekraft der Ergebnisse . . . 47
3.9.4 Feldbeispiel . . . 47

3.9.5 Entwicklungsstand / Praxisreife / flächenhafte Exploration 47
3.9.6 Entwicklungsperspektiven für das Verfahren 48
3.9.7 Kosten 48
3.10 Kombination von geophysikalischen Verfahren zur Verbesserung der Aussagekraft . . 48
3.10.1 GPR + TDR 48
3.10.2 DC + EM 49
3.10.3 GPR + DC 49
3.10.4 NMR + SIP 49

4 Schlußfolgerungen **51**
4.1 Vor- und Nachteile der Verfahren 51
4.2 Perspektiven für den Einsatz der Geophysik in Landwirtschaft und Bodenkunde . . . 54
4.3 Hinweise zur Ausschreibung und Beauftragung geophysikalischer Leistungen 55

Abkürzungsverzeichnis **57**

Literaturverzeichnis **58**

Impressum **62**

1 Einführung

Da der Mensch mit der Nutzung des Bodens dessen Eigenschaften verändert, dessen Wechselwirkungen mit der Umgebung und dessen Ertragsfähigkeit, ist es von großer Bedeutung, die Bodeneigenschaften zu ermitteln und zu deuten. Ohne exakte Daten fehlt jede Grundlage für die Diskussion von Umweltfragen oder für eine effiziente Bewirtschaftung zu landwirtschaftlichen und anderen Zwecken (ROWELL 1997).

Wasser- und Stoffflüsse im Boden werden durch wichtige Bodeneigenschaften maßgeblich beeinflusst. Ebenso beeinflussen Bodeneigenschaften z.B. landwirtschaftliche Bewirtschaftungsentscheidungen. Bei einer Betrachtungsebene über verschiedene Bodenlandschaften hinweg ist diese Feststellung trivial. Aber auch das Auftreten kleinräumiger Heterogenitäten z.B. auf der Feldskala beeinflusst den Landschaftswasser- und -stoffhaushalt und kann entsprechende Anpassungen bei der Bewirtschaftung erforderlich machen.

Die im Hinblick auf eine ökonomisch und ökologisch nachhaltige Nutzung einer Landschaft erforderliche Reaktion auf kleinräumig variierende Bodeneigenschaften setzt deren genaue Kenntnis voraus. So reagiert die Landwirtschaft auf die kleinräumige Variabilität von Standort- oder Bodeneigenschaften z.B. mit dem Konzept der „Precision Agriculture“. Bewirtschaftungsentscheidungen werden hierbei auf Basis möglichst detailliert und flächenhaft vorliegender Informationen zu bewirtschaftungsrelevanten Parametern getroffen. Durch die Hinterlegung der erfassten Parameter in Karten, kann die automatisierte Anpassung der Bewirtschaftung an die wechselnden Bodeneigenschaften anhand vorgegebener Algorithmen erfolgen. Die Schwierigkeit bei der Umsetzung dieses Bewirtschaftungskonzeptes besteht derzeit hauptsächlich in der schnellen und kostengünstigen Gewinnung von geeigneten, aussagekräftigen und flächenhaften bodenkundlichen Informationsgrundlagen zu den bewirtschaftungsrelevanten Standorteigenschaften.

Gleiches gilt bei der Bestimmung wichtiger Prozesse des Landschaftswasser- und -stoffhaushaltes. Die in diesem Zusammenhang relevanten Prozesse werden wesentlich von Bodeneigenschaften beeinflusst. Die Kenntnis der auftretenden kleinräumigen Heterogenität kann zu einer deutlichen Verbesserung von Prognosen zu umweltrelevanten Prozessen beitragen (DFG 409 – Interurban). Die klassische Bodenkunde kennt drei Wege, Informationen über Bodeneigenschaften zu erhalten. Anhand der Beobachtung und direkten Messung im Freiland (Schürfgrube), In-situ-Messungen mit Hilfe von Geräten, die meist stationär in den Boden eingebracht werden sowie Labormessungen an Proben aus dem Freiland.

Die Bereitstellung der wichtigsten bodenkundlichen Parameter ist für den oben beschriebenen teilflächenspezifischen Ansatz in der erforderlichen räumlichen Auflösung mit den herkömmlichen boden-

kundlichen Methoden aufgrund des damit verbundenen Arbeitszeit- und/oder Ausrüstungsbedarfes i.d.R. nicht realisierbar. Neben der Nutzung bereits flächenhaft vorliegender Bodeninformationen ist in Zukunft der Einsatz neuartiger Technologien erforderlich, die bei vertretbarem Kosten- und Zeitaufwand in der Lage sind, relevante Informationen detailliert und flächenscharf zu liefern. Neben Daten, die direkt bei der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung messbar sind, wie z.B. der Ertrag oder die für bestimmte Bearbeitungsgänge benötigte Zugkraft, stehen in diesem Zusammenhang besonders geophysikalische Methoden im Mittelpunkt des Interesses, da sie in der Lage sind, verschiedenste Bodeninformationen in situ zu messen.

Durch die rasante technische Weiterentwicklung geophysikalischer Verfahren steht heutzutage ein Instrumentarium zur Verfügung, welches es ermöglicht, Bodenparameter bzw. Hilfsgrößen, die über wichtige Bodeneigenschaften Aufschluss geben, kontinuierlich und mit deutlich geringerem Aufwand, als es mit klassischen bodenkundlichen Methoden der Fall ist zu erfassen. In dieser Publikation werden verschiedene bewährte und neue geophysikalische Verfahren in ihrem aktuellen Entwicklungsstand sowie deren Kombinationsmöglichkeiten beschrieben und ihre Möglichkeiten und Grenzen im Hinblick auf die Gewinnung der erforderlichen Bodeninformationen in der gewünschten Auflösung unter Beachtung des (personellen und zeitlichen) Messaufwandes und der dadurch entstehenden Kosten beschrieben.

1.1 Hintergrund/Anlass

Von Oktober 2003 bis Ende 2005 führte die Technische Universität Berlin (TUB), Institut für Angewandte Geowissenschaften, im Auftrag der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) ein vom Freistaat Sachsen finanziertes Forschungsvorhaben zur Ermittlung des Wasserretentionsvermögens mittels geophysikalischer Techniken durch.

Ziel des Vorhabens war die Erarbeitung, Überprüfung und Bewertung eines integrierten geophysikalischen Verfahrenskonzeptes zur Erfassung des Wasserretentionspotenzials auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in Sachsen mit Hilfe bewährter und neuer geophysikalischer Methoden. Das Vorhaben dient der Erarbeitung von Grundlagen zur Integration dieses Wasserrückhaltepotenzials in Hochwasserschutzkonzepten unter gleichzeitiger Beachtung einer nachhaltigen und bodenschonenden landwirtschaftlichen Produktion.

Die regelmäßigen Diskussionen im Rahmen des Projektes bei der Vorstellung der Ergebnisse haben den erheblichen Aufklärungsbedarf über die Möglichkeiten und die Fähigkeiten, aber auch über die Einschränkungen bezüglich der Anwendung geophysikalischer Techniken in der Landwirtschaft und Bodenkunde aufgezeigt. Es gab bisher noch kein Projekt, das sich in dieser Intensität und Vielfalt mit der Anwendung der Geophysik in der Landwirtschaft beschäftigt hat.

Deshalb wurde von Seiten der LfL der Bedarf an einer Übersicht über den Stand der Technik zur Anwendung der Geophysik in Landwirtschaft und Bodenkunde geäußert. Dieser Bedarf soll mit dem vorliegenden Handbuch befriedigt werden, indem auch Ergebnisse aus anderen, verwandten Projekten gezeigt werden. Dieses Handbuch ist in diesem Sinne ein Spinoff des Projektes „Ermittlung des Wasserretentionsvermögens von Ackerflächen mit Hilfe der Kombination geophysikalischer Methoden“.

1.2 Ziele

Ziel dieses Handbuches ist es eine umfassende Präsentation von Anwendungen geophysikalischer Techniken in der Landwirtschaft zu Verfügung zu stellen. Zum einen soll dieses Handbuch dem (geophysikalischen) Laien einen Überblick über die Möglichkeiten zur flächenhaften Erfassung von Bodenparametern auf Ackerflächen durch geophysikalische Messungen liefern. Zum anderen soll es auch über die (derzeitigen) Grenzen der Geophysik informieren. Beides ist unserer Einschätzung nach sehr wichtig, um dem Endnutzer eine objektive und realistische Einschätzung, dessen was machbar ist, zu ermöglichen. Dies wird insbesonders dann wichtig, wenn in Vorhaben, z.B. bei teilflächenspezifischer Bewirtschaftung (precision farming) Geophysik als Fremdleistung beauftragt werden soll.

1.3 Struktur

Zunächst werden die aus landwirtschaftlicher Sicht sinnvollerweise zu bestimmenden Parameter und Bodenkennwerte (Zielparameter) kurz vorgestellt. Dann die unterschiedlichen geophyikalischen Verfahren, in folgender Gliederung:

- Theorie — kurze Beschreibung des Verfahrens
- Erläuterung der Anwendungsmöglichkeit in der Landwirtschaft
- Entwicklungsstand bezogen auf Anwendungen in der Landwirtschaft
- Beispiele für Feldmessungen
- Aufzeigen des Entwicklungsbedarfes, bzw. der aktuellen Grenzen

2 Zielgrößen und Anwendungsbereiche geophysikalischer Verfahren auf landwirtschaftlich genutzten Flächen

2.1 Parameter/Bodenkennwerte

In diesem Kapitel werden Bodenparameter erläutert, die z.B. im Hinblick auf die landwirtschaftliche Nutzung oder Fragen des Landschaftswasser- und -stoffhaushalts wichtige Hinweise zu Eigenschaften des Standortes liefern. Darüber hinaus wird die Messung oder Bestimmung der jeweiligen Ausprägung des genannten Parameters mit klassischen bodenkundlichen Methoden dargestellt.

Allen diesen Parametern ist gemein, dass eine kontinuierliche und möglichst flächenhafte Messung ihrer Ausprägung mit geophysikalischen Verfahren wünschenswert wäre. Die Nennung in diesem Kapitel bedeutet nicht, dass in jedem Fall schon geeignete geophysikalische Verfahren für den jeweiligen Parameter bekannt oder verfügbar sind. Zur Bewertung, welche der genannten Parameter schon heute mit geophysikalischen Verfahren zu erfassen sind, sei auf das Kapitel 3 verwiesen.

Für verschiedene Fragestellungen kann auf verfügbare Bodenkarten zurückgegriffen werden. Je nach Region existieren oftmals Bodenkarten in unterschiedlichen Maßstäben (z.B. BÜK 50, BÜK 200). Auch wenn die Detailliertheit des vorhandenen Kartenmaterials für viele ökologische Fragestellungen meist als befriedigend einzustufen ist, so gilt dies keinesfalls für die Anwendung im Rahmen der precision agriculture. Hierfür können die angebotenen Karteninformationen lediglich einen Überblick über das betrachtete Gebiet geben. Die in vielen Landwirtschaftsbetrieben vorliegenden Informationen aus der Reichsbodenschätzung enthalten zwar Informationen mit einem vergleichsweise hohen Detailliertheitsgrad, jedoch ist auch diese Detailliertheit für die meisten Anwendungen, die auf Informationen zur kleinräumigen Variabilität setzen müssen, als nicht ausreichend einzustufen. Allerdings kann auf Basis der genannten Karteninformationen unter Hinzuziehung von Erfahrungswissen eine Abschätzung erfolgen, ob auf dem betrachteten Standort überhaupt mit einer für die jeweilige Fragestellung relevanten kleinräumigen Heterogenität zu rechnen ist.

2.1.1 Bodenart/Tiefgründigkeit/Horizontierung

Von hoher Bedeutung bei der Beurteilung von Böden und ihrer Eigenschaften sind neben der Bodenart auch deren Tiefgründigkeit sowie das Vorhandensein von Horizonten unterschiedlicher Textur. Die Erfassung der Bodenart in tieferen Horizonten steigert den Aufwand für die Probenahme erheblich, so dass in noch stärkerem Umfang Restriktionen in Bezug auf die Erfassung der kleinräumigen Heterogenität bestehen.

Die Beschreibung eines Bodens anhand seiner Korngrößenverteilung oder Textur gibt wichtige Hinweise auf wesentliche Bodeneigenschaften. So ist die Korngrößenanalyse eine der grundlegenden Bestimmungen, die an einem Boden durchgeführt werden. Die Kenntnis der Korngrößenverteilung liefert gute Näherungswerte z.B. für Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt, plastische Eigenschaften, Quellfähigkeit, Austauschkapazität und Nährstoffgehalte (HARTGE & HORN 1989, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992). Aus landwirtschaftlicher Sicht ist auf dieser Basis eine grobe Beurteilung der Ertragsfähigkeit eines Bodens möglich.

Boden ist ein Gemisch aus fester Bodensubstanz, Wasser und Luft. Die Festsubstanz setzt sich zusammen aus dem groben Material (sog. Skelettanteil > 2mm ø) und unterschiedlichen Anteilen verschiedener Korngrößenklassen < 2mm ø (Sand, Schluff, Ton). Der Anteil der unterschiedlichen Korngrößenklassen ist Grundlage für die Einteilung des Bodens in definierte Bodenarten, die in

Deutschland konventionsgemäß nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5, 2005) erfolgt.

Zur Beurteilung wichtiger Standorteigenschaften wie der Ertragsfähigkeit, dem Nährstoffhaltevermögen, der Wasserverfügbarkeit oder der Wasserleitfähigkeit ist insbesondere der Tongehalt (Anteil von Partikeln <0,02 mm ø) oder der Feinanteil (Anteil von Partikeln <0,063 mm ø) ein wesentlicher Parameter.

Für die Erfassung der Korngrößenverteilung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Die quantitativen Methoden wie z.B. die Sieb- und Schlämmanalyse nach Köhn oder die Laseranalyse erfordern einen hohen Zeit- und/oder Geräteaufwand. Als semiquantitativ ist die Bestimmung der Bodenart mittels Fingerprobe anzusehen. Sie erfordert eine große Erfahrung des Beurteilenden, um eine hinreichende Genauigkeit zu gewähren. In jedem Fall verlangt die klassische Bestimmung der Korngrößenverteilung die Entnahme von Bodenproben, die für sich alleine schon einen großen Zeit- und Arbeitsaufwand bedeutet.

Von hoher Bedeutung bei der Beurteilung von Böden und ihrer Eigenschaften sind neben der Bodenart auch deren Tiefgründigkeit sowie das Vorhandensein von Horizonten unterschiedlicher Textur. Die Erfassung der Bodenart in tieferen Horizonten steigert den Aufwand für die Probenahme erheblich, so dass in noch stärkerem Umfang Restriktionen in Bezug auf die Erfassung der kleinräumigen Heterogenität bestehen.

2.1.2 Bodengefüge/Bodenstruktur/Porosität

Das Bodengefüge oder die Bodenstruktur, also die räumliche Anordnung der Bodenbestandteile und ihr Zusammenhalt ist eine veränderliche Bodeneigenschaft und nimmt Einfluss auf das Porenvolumen und damit den Wasser- und Lufthaushalt eines Bodens. Die Stabilität des Bodengefüges beeinflusst die Tragfähigkeit eines Bodens bzw. den Widerstand, den der Boden einer mechanischen Belastung z.B. durch Befahrung oder Bearbeitung entgegen setzen kann.

Bestimmte Gefügeeigenschaften des Bodens sind bereits mit bloßem Auge zu erkennen. So können Gefügeformen unterschieden werden, die auch Einfluss auf die Porosität des Bodens nehmen. Wichtige Gefügeformen sind z.B. das Plattengefüge, das Polyeder- oder Subpolyedergefüge sowie das Einzelkorn-, Bröckel- oder Krümelgefüge. Letztgenannte Gefügeform ist die auf ackerbaulich genutzten Böden im Krumenbereich anzustrebende.

Weitere Gefügeeigenschaften sind ebenfalls oft mit dem bloßen Auge zu erkennen, wie das Vorhandensein von Makroporen (z.B. Spalten oder Bioporen) oder das Auftreten von dichter lagernden Horizonten bis hin zu schadverdichteten Horizonten. Bodenverdichtung wird oftmals indirekt durch ein ungleichmäßiges Wurzelwachstum angezeigt. Im Umkehrschluss kann festgestellt werden, dass

ein optimales Bodengefüge Voraussetzung für einen ungestörten Wasser- und Lufthaushalt sowie für gute Wachtumsbedingungen für Kulturpflanzen ist.

Durch die Gefügeausbildung des Bodens in Kombination mit Textur und Humusgehalt werden auch die Porosität und die Funktionalität des Porenraumes geprägt. Das Porenvolumen bestimmt die Wasseraufnahmekapazität eines Bodens. Durch die Porengrößenverteilung werden Eigenschaften wie z.B. die Speicherung pflanzenverfügbaren Wassers bestimmt. Die Kontinuität der Poren in einem Boden und das Auftreten von Makroporen kann die Wasser- und Luftbewegung im Boden stark beeinflussen.

Zur Ermittlung der wichtigsten Gefügeeigenschaften wird neben der direkten Ansprache an einer Schürfgrube im Gelände i.d.R. auch auf die Messung von Hilfsgrößen wie z.B. den Eindringwiderstand oder die Untersuchung von Stechzylinderproben zurückgegriffen.

Die Messung des Eindringwiderstandes mit einem Penetrometer oder Penetrologger ist ein Verfahren, dass sich sehr gut automatisieren lässt und auch auf großen Flächenumfängen für eine Rasterbeprobung anwendbar ist, zumal bereits fahrzeuggestützte automatische Systeme angeboten werden. Nachteilig bei diesem Verfahren ist jedoch die unspezifische Aussage des Messwertes Eindringwiderstand. Ein direkter Rückschluss z.B. auf die Rohdichte oder das Porenvolumen eines Bodens ist nicht möglich, da das Verfahren z.B. empfindlich auf wechselnde Feuchtezustände des Bodens reagiert. Sehr gut abbilden lässt sich jedoch das Auftreten von Schicht- oder Horizontwechseln.

Durch die Entnahme von ungestörten Proben mit Stechzylindern bekannter Größe kann durch Trocknung bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz die Rohdichte erfasst werden, die einen ersten Hinweis auf den Zustand des Bodengefüges gibt. Die Rohdichte erlaubt zudem eine näherungsweise Berechnung des Porenvolumens, unter Verwendung einer üblicherweise als näherungsweise konstant angenommenen Festsubstanzdichte von 2,65.

Nicht möglich ist auf dieser Basis eine Bestimmung der Porengrößenverteilung des Bodens. Diese ist von vielen Einflussgrößen abhängig. So nimmt z.B. die Textur, der Gehalt an organischer Substanz, die vorhergehende Belastung des Bodens durch Befahrung oder Bodenbearbeitung, aber auch die Aktivität des Bodenlebens Einfluss auf diesen Parameter. Auch bei gegebener Bodenart kann die Porengrößenverteilung in weitem Umfang schwanken. Die Kenntnis der Porengrößenverteilung ist jedoch Voraussetzung für die Erarbeitung sicherer Aussagen zu allen Stoff- und Wassertransportprozessen in einem Boden.

Die Beschreibung der Porengrößenverteilung erfolgt üblicherweise durch die Messung der Wassergehalts-Wasserspannungsbeziehung (pF-Kurve) meist an ungestörten Stechzylinderproben. Alterna-

tiv ist eine Messung auch über die gleichzeitige In-situ-Messung von Wassergehalt und Wasserspannung im anstehenden Boden möglich. Beide Verfahren sind sehr aufwändig. Im Falle der Ermittlung der pF-Kurve durch die gezielte Entwässerung von Stechzylinderproben ist sowohl ein hoher Aufwand für die Probenahme als auch ein hoher Zeit- und Ausrüstungsaufwand im Labor einzuplanen. Vorteilhaft ist allerdings die sehr genaue Bestimmung dieses Parameters durch die Labormessung.

Die geschilderte In-situ Messung dagegen erfordert einen großen Aufwand an geeigneter Messtechnik (Bodenfeuchtemesssonden und Tensiometer mit entsprechender Ausstattung zum Auslesen und Speichern der Messdaten). Um kleinräumige Heterogenität abzubilden, ist letztere Methode daher kaum geeignet.

Zwei weitere Parameter, die auf Basis der Bodentextur maßgeblich von der Bodenstruktur abhängen, sind die Luftleitfähigkeit und die Wasserleitfähigkeit des Bodens. Beide Parameter nehmen sowohl Einfluss auf landwirtschaftlich interessierende Größen wie die Wasserverfügbarkeit für den Kulturpflanzenbestand, die Nährstoffdynamik und -nachlieferung im Boden, die Wurzelentwicklung etc.. Darüber hinaus ist aber auch eine Beinflussung von Parametern des Landschaftswasser- und -stoffhaushaltes insbesondere an dem Parameter Wasserleitfähigkeit festzumachen.

Da anhand der Ausprägung dieser beiden Parameter wichtige Schlussfolgerungen in Bezug auf die Standorteigenschaften festgemacht werden können, kommt ihrer Messung eine hohe Bedeutung zu. Die praktische Anwendung wird jedoch mit den klassischen bodenphysikalischen Methoden durch einen extrem hohen Arbeits- und/oder Geräteaufwand limitiert.

2.1.3 Aktueller Bodenwassergehalt, Bodenfeuchte

Der aktuelle Wassergehalt eines Bodens erlaubt bei Kenntnis der Standortbedingungen Rückschlüsse auf wichtige Bodeneigenschaften und kann somit als gute Hilfsgröße angesehen werden. So ist bei aktueller Wassersättigung des Bodens der volumetrische Wassergehalt annähernd mit dem Gesamtporenvolumen gleichzusetzen. Kleinräumige Unterschiede im aktuellen Bodenwassergehalt können Aufschluss über das Wasserrückhaltevermögen des Bodens geben.

Die Möglichkeit, aufgrund des aktuellen Bodenwassergehaltes Rückschlüsse auf andere Bodeneigenschaften zu ziehen, bedeutet auch, dass dieser Parameter als eine Grundlage für Bewirtschaftungsentscheidungen des Landwirtes dienen kann. Neben der Entscheidung für ein bestimmtes Bodenbearbeitungsgerät und die Wahl der geeigneten Bodenbearbeitungsintensität und -tiefe werden durch den aktuellen Wassergehalt auch Entscheidungen für die optimale Saatstärke und -tiefe beeinflusst. Darüber hinaus kann auf Basis der Kenntnis einer kleinräumigen Variation des Bodenwassergehaltes eine Anpassung in den Bereichen Düngung und Pflanzenschutz erfolgen, in Erwartung

einer unterschiedlichen Ertragsfähigkeit der Bereiche mit variierendem, aktuellem Bodenwassergehalt.

Zur Messung des aktuellen Bodenwassergehaltes stehen verschiedene Methoden bereit. Die klassische bodenphysikalische Methode zur direkten Bestimmung der Bodenfeuchte ist die gravimetrische Bestimmung anhand des Gewichtsverlustes der Probe beim Trocknen bis zur Gewichtskonstanz bei 105°C im Labor. Wie schon für alle vorgenannten Parameter ausgeführt, ist dieses Vorgehen nicht für die Ermittlung der kleinräumigen Heterogenität eines Standortes geeignet, da der Aufwand für die erforderliche Probenahme als limitierender Faktor wirkt.

Indirekte Verfahren zeichnen sich durch die Messung physikalischer oder physikalisch-chemischer Eigenschaften aus, die in funktionellem Zusammenhang mit dem Wassergehalt stehen. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang einige für die stationäre Messung bereits sehr gut etablierte Verfahren, wie die Tensiometrie, radiometrische Verfahren, die Leitfähigkeitsmessung sowie die Messung der dielektrischen Eigenschaften des Bodens. Da letztere Methoden zu den geophysikalischen zählen, die an anderer Stelle dargestellt werden, sei an dieser Stelle nur auf die Tensiometrie näher eingegangen.

Die Bestimmung der Bodenfeuchte über die Tensionsmessung basiert auf der pF-Funktion, die für einen gegebenen Boden jedem Saugspannungsmesswert einen Wassergehalt zuweist. Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis der pF-Funktion des Bodens (s.o.). Die Messung der Saugspannung erfolgt mit Hilfe von wassergefüllten Ton- oder Keramikzellen, die in den Boden eingebracht werden. Von Nachteil ist neben der notwendigen Kalibrierung insbesondere der begrenzte Saugspannungsbereich, der mit Tensiometern messbar ist. Die Erfassung der kleinräumigen Heterogenität ist mit dieser Methode ebenso wenig zu leisten wie mit der direkten Messung der Bodenfeuchte, da letztlich neben dem Einbringen der Tensiometer auch die Bestimmung der pF-Beziehung wie oben beschrieben erforderlich ist.

2.1.4 Organische Bodensubstanz

Die Organische Bodensubstanz oder auch Humus ist ein komplexes Gemisch von organischen Stoffen pflanzlichen, mikrobiellen und tierischen Ursprungs in verschiedenen Zersetzungsstadien (MUNZERT & FRAHM 2006). Sowohl der Humusgehalt als auch die Humuszusammensetzung werden durch Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren bestimmt (Klima, Textur (insb. Tongehalt), Wasserhaushalt, Bodenbearbeitung, Fruchtfolge, Düngung etc.). Die organische Bodensubstanz übt ihrerseits wesentlich Einfluss auf wichtige Eigenschaften eines Bodens wie z.B. Nährstoffspeicherung, Bodenstruktur, Ionenaustausch oder Wasserspeichervermögen aus. Da der Gehalt und die Zusammensetzung der organischen Bodensubstanz kleinräumig variieren können, ist der Humusgehalt ein Parameter, dessen zumindest näherungsweise Erfassung im Rahmen von Konzepten der teilflächenspezifischen

Bewirtschaftung einen erheblichen Erkenntnisgewinn verspricht.

Organische Bodensubstanz besteht maßgeblich aus C, H, O, N, P und S. Der Gesamtgehalt des Bodens an organischem Kohlenstoff stellt einen geeigneten Kennwert zur Ermittlung und Beschreibung des Gehaltes an organischer Bodensubstanz dar.

Üblicherweise wird der Ct-Gehalt eines Bodens anhand von Bodenproben durch die Verbrennung bei hoher Temperatur im Sauerstoffstrom bestimmt, was zu exakten Angaben führt, aber einen erheblichen Beprobungs- und Analyseaufwand mit sich bringt. Feldmethoden setzen auf die Bestimmung des Humusgehaltes aufgrund der Färbung des Bodens unter Kenntnis der klimatischen und pedologischen Standortbedingungen. Unabhängig von der Erfordernis einer großen Erfahrung des Beurteilenden ist diese Methode jedoch von großer Unsicherheit geprägt, da z.B. der aktuelle Wassergehalt oder die Mineralzusammensetzung des Bodens das Ergebnis stark verfälschen können.

2.1.5 Grundwasserflurabstand

Wesentlichen Aufschluss über das Wasserangebot an einem Standort, z.B. über den kapillaren Aufstieg ebenso wie über das Wasserspeichervermögen kann über den Grundwasserflurabstand gewonnen werden. Informationen zum Grundwasserflurabstand sind in Form von Karten i.d.R. verfügbar. An vielen Standorten ist der Grundwasserflurabstand jedoch eine im Jahresverlauf und jahresübergreifend variable Größe. Inwiefern auch kleinräumig mit einer relevanten Heterogenität des Grundwasserflurabstandes zu rechnen ist, bleibt zu diskutieren.

Die Messung des Grundwasserflurabstandes erfolgt i.d.R. über Sonden bzw. Brunnen. Für eine kleinräumige Erfassung eignet sich dieses Vorgehen nicht.

2.2 Nutzung der gewonnenen Parameter

Anhand von zwei Beispielen soll auf die mögliche Nutzung der mit Hilfe geophysikalischer Methoden ermittelbaren Daten eingegangen werden und ein mögliches Vorgehen skizziert werden.

2.2.1 Teilfächenspezifische Landwirtschaft

Physikalische Bodeneigenschaften bestimmen die primären Wachstumsbedingungen für jede Vegetation (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992). Heterogene Schläge führen demnach zu inhomogen aufgebauten Pflanzenbeständen, differenzierten Erträgen und unterschiedlichen Ausprägungen der Pflanzenqualitätsmerkmale. Einheitliche Bewirtschaftungsmaßnahmen sind auf eine durchschnittliche Standortqualität abgestimmt. Dadurch werden Ertrags- und Qualitätsziele nicht ausgeschöpft und unter- sowie überversorgte Bereiche innerhalb eines heterogenen Schlages in Kauf genommen.

Das Konzept der teilflächenspezifischen Landwirtschaft reagiert auf kleinräumige Heterogenitäten, indem Bewirtschaftungsmaßnahmen (Bodenbearbeitung, Aussaat, Düngung, Pflanzenschutz) an die jeweiligen Standortbedingungen angepasst wird. Voraussetzung ist die möglichst genaue Kenntnis der relevanten Bodeneigenschaften und ihrer Heterogenität. Da die direkte Messung dieser Eigenschaften mit klassischen Feldmethoden i.d.R. zu aufwändig und dadurch zu teuer ist, werden Methoden benötigt, die eine flächenhafte Bestimmung wichtiger Standorteigenschaften mit vertretbarem Aufwand ermöglichen. Diese z.B. mit geophysikalischen Methoden ermittelten Daten können in Form von Karten bei der Bewirtschaftung der Schläge hinterlegt sein und auf Basis von geprüften Algorithmen landwirtschaftliche Bewirtschaftungsmaßnahmen kleinräumig an die jeweiligen Bedingungen anpassen helfen.

2.2.2 Ableitung von Bodenkennwerten für planerische Belange am Beispiel dezentraler Hochwasserschutz

In der Folge des Elbehochwassers im Jahr 2002 wurde neben dem Ausbau der klassischen Hochwasserschutzmaßnahmen eine Reihe von innovativen, vorbeugenden Hochwasserschutzstrategien erarbeitet und zur Anwendung vorgeschlagen.

Der Kerngedanke der vorbeugenden, dezentralen Hochwasserschutzkonzepte ist die optimierte Nutzung möglichst aller in der Landschaft vorhandenen Elemente der Wasserspeicherung, mit dem Ziel einer Minderung oder Verzögerung der hochwasserwirksamen Abflüsse. Eine Beurteilung der potenziellen Möglichkeiten des vorbeugenden Hochwasserschutzes durch Wasserrückhalt in der Fläche ist an die Kenntnis der Abflussprozesse und an die standortbezogene Beurteilung des Speichervermögens des Gebietes geknüpft.

Grundlage für die großräumige Ermittlung des theoretischen Wasserrückhaltepotenzials ist die Verwendung flächenhaft vorliegender boden- und standortkundlicher Informationen. Aus diesen kann unter Einbeziehung der zu erwartenden Abflussprozesse ein Wasserrückhaltepotenzial errechnet werden, das es durch geeignete Maßnahmen zu erschließen gilt.

Bei der Umsetzung dieser Konzepte auf lokaler Ebene und der Erschließung der verfügbaren Rückhaltepotenziale ist z.B. zur Optimierung der Verortung der infiltrationsfördernden Maßnahmen, die möglichst exakte Kenntnis des tatsächlichen Speichervermögens der Böden von Vorteil. Die verfügbaren Kartengrundlagen geben i.d.R. über die kleinräumige Heterogenität keine ausreichend genaue Auskunft.

In diesem Fall wäre die flächenhafte Ausweisung relevanter Bodenparameter z.B. durch die Anwendung geophysikalischer Verfahren bei einem überschaubaren finanziellen und zeitlichen Aufwand

wünschenswert, um sie in die notwendigen Modellrechnungen flächenscharf einbeziehen zu können.

3 Geophysikalische Verfahren und ihre Anwendung

Bei geophysikalischen Techniken werden **physikalische** Messgrößen wie Spannungen, Ströme, Wellenlaufzeiten, Wellenamplituden, Feldstärken oder Zählraten aufgenommen. Aus diesen Messgrößen wird dann durch (heutzutage überwiegend) numerische Verfahren (Modellierung, Inversion) eine räumliche oder zeitliche Verteilung der physikalischen Parameter im Untergrund abgeleitet. Im letzten Schritt werden dann die physikalischen Parameter in die interessierenden Strukturgrößen überführt, z.B. der elektrische Widerstand in den Wassergehalt. Die Verbindung und Überführung der physikalischen Parameter in die interessierenden Strukturgrößen erfolgt durch bestimmte physikalische oder empirische Modelle, die z.T. messgebietsbezogen kalibriert werden müssen. Die Auflösung der geophysikalischen Techniken hängt im wesentlichen ab von

- der Messgröße
- der Entfernung zwischen Sensor und Messgröße
- dem Verhältnis der Messgröße und der Entfernung zwischen Sensor und Messgröße
- der Ausdehnung des Messobjektes
- dem Material zwischen Sensor und Messobjekt
- Störsignalen (Rauschen)
- Qualität der Apparatur
- Qualität der Messungen

Planung und Durchführung geophysikalischer Messungen bestehen typischerweise aus folgenden Arbeitsschritten:

- Aufgabendefinition, Zielstellung
- geophysikalische Messung
- Auswertung der Messung (Modellierung/Inversion)
- Interpretation der resultierenden Modelle
- Bewertung der Ergebnisse

In der Landwirtschaft und Bodenkunde werden derzeit vor allem folgende Techniken eingesetzt:

- Gleichstromgeoelektrik
- Radar

- Elektromagnetik
- Gamma-Spektrometrie

Der Erfolg hängt dabei in Wesentlichen ab von der

- Empfindlichkeit der Methode bezogen auf den interessierenden Parameter,
- der Eindeutigkeit der Bestimmung des interessierenden Parameters aus den gemessenen physikalischen Größen und
- der Automatisierbarkeit der Methode.

Der große Vorteil bei der Erfassung von Bodeneigenschaften durch geophysikalische Verfahren gegenüber „herkömmlichen“ Verfahren liegt vor allem in der im Wesentlichen nichtinvasiven Arbeitsweise dieser Verfahren begründet. Im einzelnen sind die Vorteile:

- Sie sind zerstörungsfrei, es werden keine Bohrungen benötigt.
- Die Messungen sind zum größten Teil berührungslos.
- Die meisten Verfahren sind nicht penetrierend, und wenn, dann nur in den obersten 0.1 – 0.2 m.
- Geophysikalische Verfahren sind schnell und können somit flächenhaft eingesetzt werden.
- Sie sind skalierbar, je nach Bedarf von wenigen Zentimetern bis 10 Kilometer.
- Es werden nur wenige Proben zur Kalibration benötigt.

3.1 Messgebiet

Die (meisten) Beispiele zu geophysikalischen Messungen in diesem Handbuch sind, falls nicht anders gekennzeichnet, dem vom Freistaat Sachsen geförderten und durch die TUB bearbeiteten Projekt „Ermittlung des Wasserretentionsvermögens von Ackerflächen mit Hilfe geophysikalischer Verfahren” entnommen.

Auf der Versuchsfläche am Standort Lüttewitz, Mittelsächsisches Lößhügelland (Abb. 1), wurden drei Teilflächen genutzt, die sich durch die Anwendung verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren unterscheiden. Teilfläche 1 (Feld 1) wird jährlich bis zu einer Tiefe von 30 cm gepflügt. Auf Teilfläche 2 (Feld 2) wird seit 1992 auf jegliche Bodenbearbeitung verzichtet. Die Aussaat erfolgt als Direktsaat. Auf Teilfläche 3 (Feld 3) erfolgt seit 1992 eine nicht wendende konservierende Bearbeitung mit einer Bearbeitungstiefe von max. 10 cm und nachfolgender Mulchsaat. Die übrigen Bewirtschaftungsmaßnahmen (Fruchtfolge, Düngung etc.) erfolgen auf allen drei Teilflächen in gleicher Form.

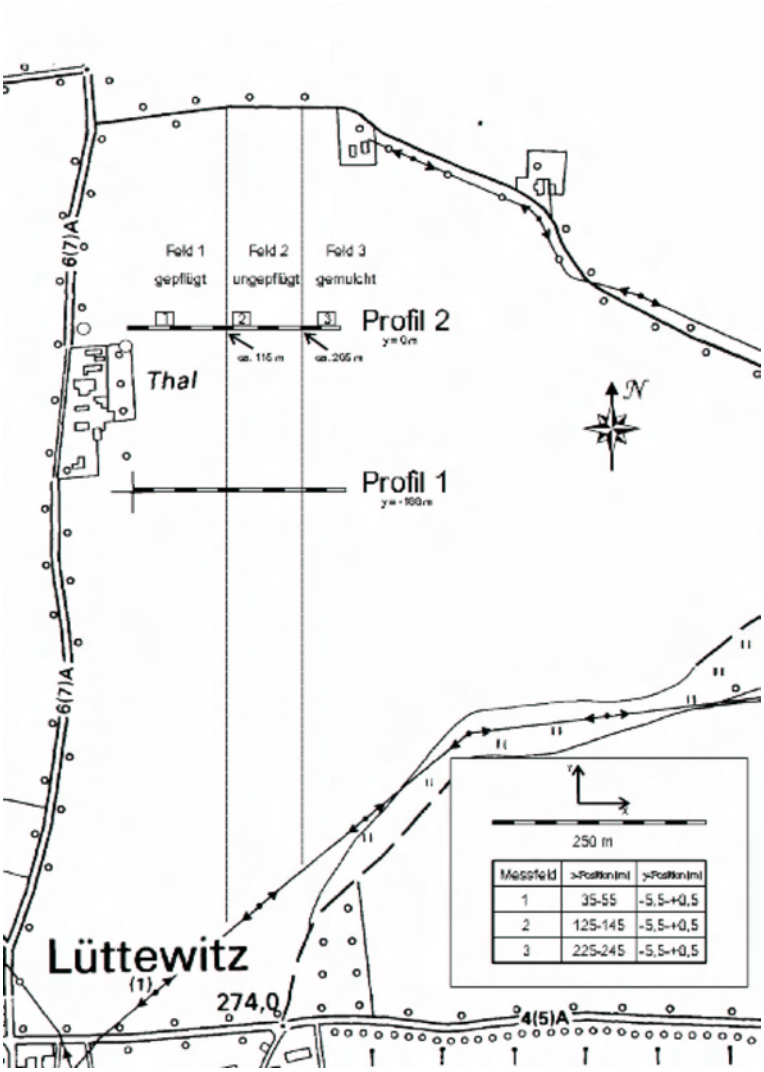


Abbildung 1: Der Schlag „Gasthof“ bei Lüttewitz und seine Einteilung in die Varianten gepflügt, pfluglos und gemulcht. Neben den Profilen 1 und 2 sind zusätzlich die Lage der 3D-Messflächen mit 1, 2 und 3 bezeichnet.

3.2 Georadar (GPR)

Das Messverfahren Georadar (engl. Ground Penetrating Radar – GPR – manchmal auch im deutschen Sprachraum Elektromagnetisches Reflexionsverfahren – EMR – genannt) eignet sich besonders für die hochauflösende geologische Strukturerkundung oberflächennaher Bereiche (ca. 0.5 – 20 m). GPR wird vor allem zur Lokalisierung von Strukturen und Objekten hinsichtlich Tiefenlage und Größenordnung genutzt. Da Wasser einen großen Einfluss auf die Messung besitzt, ist die Bestimmung des Wassergehaltes in Böden möglich und deshalb die Anwendung des GPR auf Böden interessant.

3.2.1 Beschreibung des Verfahrens

Über eine auf dem Boden aufliegende (Sende-)antenne wird ein hochfrequenter elektromagnetischer Impuls abgestrahlt, der dann mit einer räumlich getrennten Empfangsantenne aufgenommen wird. Die elektromagnetische Energie erreicht auf verschiedenen Wegen die Empfangsantenne: Durch die Luft (direkte Luftwelle), direkt durch den Boden (direkte Bodenwelle) oder durch Luft oder Boden nach Reflexion der Welle.

Der Parameter, der die Ausbreitungsgeschwindigkeit im wesentlichen beeinflusst, ist die relative Permittivität (ϵ_r, auch Dielektrizitätskoeffizient DK). Je größer der DK des Mediums, desto langsamer die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen. Da Wasser einen DK von ca. 81 aufweist, bodenbildende Mineralien wie Quarz oder Ton jedoch nur einen DK von etwa 3 – 6, beeinflusst der Wassergehalt die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

3.2.2 Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft/Bodenkunde

Die Parameter, über die mit GPR Aussagen gemacht werden können, sind:

- Bodenstruktur/Schichtabfolgen
- Bodenart/Tiefgründigkeit/Horizontierung
- Wassergehalt/Bodenfeuchte
- Grundwasserflurabstand, Übergang ungesättigte/gesättigte Zone

Eine Spezialanwendung ist die Messung der Bodenwellengeschwindigkeit zur kleinräumigen Bestimmung des Wassergehaltes oberflächennaher Bodenbereiche durch Auswertung der wassergehaltsabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit. Normalerweise werden Sender und Empfänger mit einem geringen Abstand über das Profil bewegt. Allerdings hat das den Nachteil, dass sich die direkte Bodenwelle und die direkte Luftwelle überlagern und nicht getrennt ausgewertet werden können. Da beide Wellen aber eine unterschiedliche Geschwindigkeit besitzen (Luft: 300 m/ns ; Boden:

ca. 100 m/ns), werden durch sukzessives Erweitern des Antennenabstandes die Luft- von der Bodenwelle getrennt (Move-Out). Im Radargramm bilden sich die Ersteinsätze der direkten Luftwelle und der direkten Methoden Bodenwelle als Geraden aus. Bei einem Antennenabstand, bei dem die Bodenwelle von der Luftwelle optisch klar zu trennen ist, werden der Antennenabstand fixiert und die Antennen mit diesem festen Abstand entlang des Profils bewegt. Um die Bodenwelle klar zu identifizieren, hat sich bewährt, auch am Profilende den Abstand zwischen beiden Antennen zu verringern (Move-In) (Abb. 2).

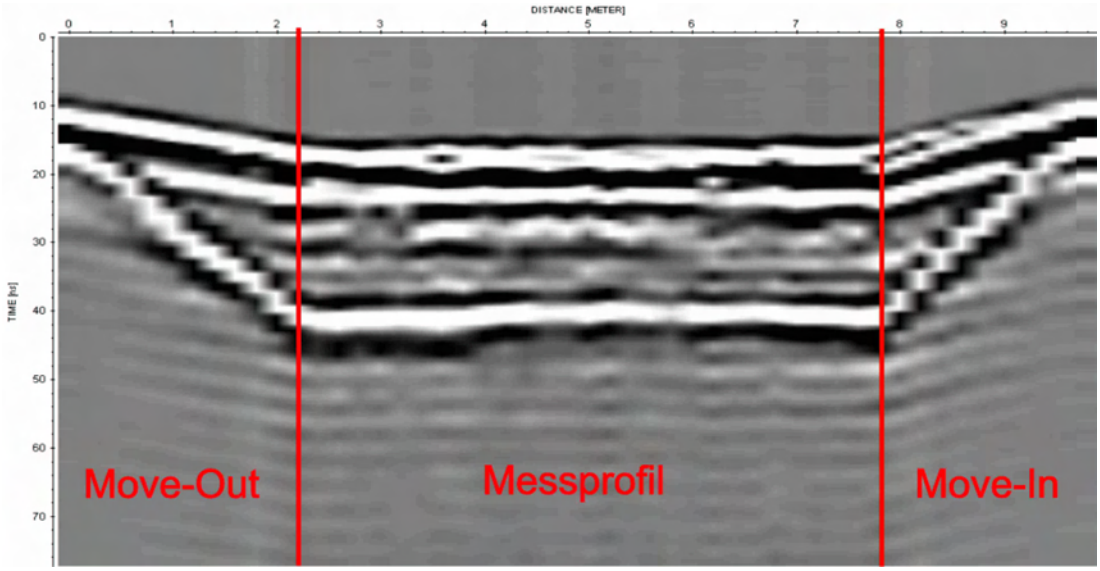


Abbildung 2: Aufnahme eines Bodenprofiles mit dem Georadar. Durch Vergrößern des Abstandes zwischen Sender und Empfänger wird ein sogenannter Move-Out am Profilanfang erzeugt und am Profilende wird der Abstand wieder verkleinert.

Aus der Steigung der Geraden des Bodenwellenersteinsatzes im Radargramm am Anfang und am Ende des Profils lässt sich jetzt die Bodenwellengeschwindigkeit berechnen. Die Änderungen der Laufzeit der Bodenwelle innerhalb des Profils lassen sich relativ zu der Anfangs- oder Endgeschwindigkeit in Beziehung setzen und somit die Bodenwellengeschwindigkeitsänderung zwischen Sender und Empfänger entlang des Profils bestimmen. Die Geschwindigkeit wird direkt in die Dielektrizitätszahl ϵ_r umgerechnet. Danach wird aus ϵ_r über empirische Beziehungen (TOPP ET AL. 1980) oder Mischungsgesetze (GRAEVES ET AL. 1996, WILSON ET AL. 1996) der Wassergehalt bestimmt. Die Wassergehalte werden profilhaft, bei mehreren benachbarten parallelen Profilen auch flächenhaft interpoliert dargestellt.

3.2.3 Aussagekraft der Ergebnisse

Der Tiefenbereich, für den der Wassergehalt durch das o.g. Bodenwellenverfahren integral bestimmt wird, ist von der Frequenz der benutzten Antennen abhängig und nimmt mit höherer Frequenz ab.

Die absolute Genauigkeit des Verfahrens beträgt etwa 5 %. Grundsätzlich ist eine Kalibration sinnvoll v.a. mit TDR-Messungen oder gravimetrischen Bestimmungen des Wassergehalts.

Die elektrische Leitfähigkeit σ des Untergrundes ist der maßgebliche Parameter für die Dämpfung der Welle. Eine hohe elektrische Leitfähigkeit (z.B. in Tonen, Schluffen) bedeutet hierbei eine hohe Abschwächung der Amplitude und damit geringe Eindringtiefen.

3.2.4 1. Feldbeispiel

Dieses Beispiel stammt nicht von einer landwirtschaftlich genutzten Fläche, sondern von einem Profil über einer Wiese im Tiergarten (städt. Parkanlage in Berlin). Aufgrund der geringeren elektrischen Leitfähigkeit und der damit verbundenen höheren Eindringtiefen des Signales konnte hier mit zwei 1 GHz Antennen gemessen werden. Zu Vergleichszwecken wurde parallel zu den GPR-Messungen alle 0,5 m eine TDR-Messung durchgeführt.

Abb. 3 zeigt den Wassergehalt aus GPR und den TDR-Wassergehalt. Der GPR-Wassergehalt wurde aus der elektrischen Permittivität durch die Laufzeit des GPR-Signales berechnet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des GPR-Signales im Untergrund ist mit der elektrischen Permittivität wie folgt verknüpft:

$$v_s = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_s}}$$

wobei c_0 die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und ϵ_s die elektrische Permittivität im Untergrund sind. Der volumetrische Wassergehalt wird dann mittels Mischungsgesetzen wie die theoretische nach Hanai-Bruggeman, die semi-empirische CRIM-Formel oder die rein empirische nach TOPP ET AL. (1980).
Um zu einer räumlichen Auflösung in der Größenordnung von einem Dezimeter zu kommen, müssen die Daten invertiert werden. Bei einem Antennenabstand von 0,72 m und einem Schuss alle 0,04 m wird jeder Bodenbereich 18 mal überdeckt und die gewünschte Auflösung erhalten. Wenn man die unterschiedlichen Integrationsvolumina und -tiefen berücksichtigt, ergibt sich eine gute Korrelation von TDR und GPR-Feuchte.

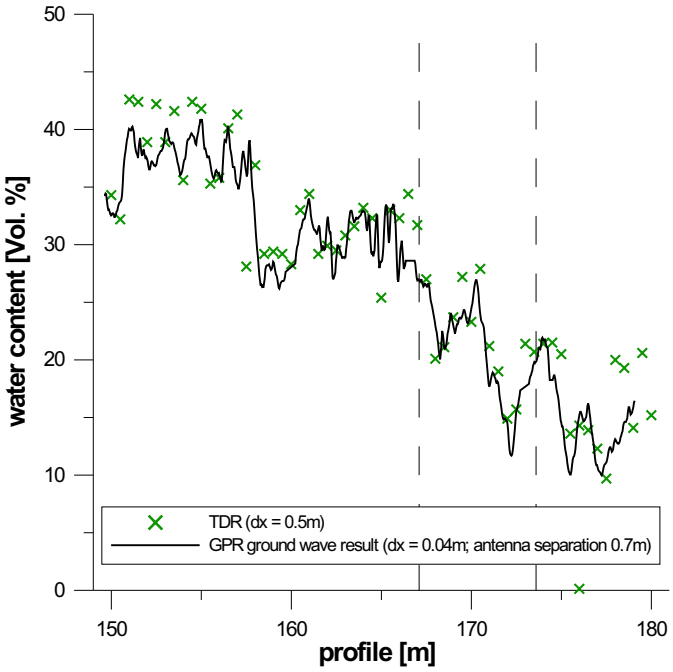


Abbildung 3: Volumetrischer Wassergehalt (VWC), abgeleitet aus Georadarbodenwelle (Linie) sowie TDR-Feuchtewerte (Kreuze) auf einem Profil im Tiergarten (Berlin). Die Bodenwellen-VWC wurden alle 4 cm, die TDR-Wassergehalte alle 50 cm bestimmt (s.a. MÜLLER ET AL., 2003).

3.2.5 2. Feldbeispiel

Die Messungen, die zu den hier gezeigten Ergebnissen führten wurden über die jeweiligen Feldgrenzen hinweg entlang des Profils 1 (Abb.1) durchgeführt. Aus unseren früheren Untersuchungen war bekannt, dass sich bei den Bodenverhältnissen in Lüttewitz anbot, eine ungeschirmte 200 MHz-Senderantenne und eine geschirmte 250 MHz-Antenne als Empfänger zu verwenden. Vier ca. 40 m lange Profile mit einem Abstand von ca. 1 m wurden angelegt und dabei alle 0,1 m eine Spur aufgezeichnet. Wie in Kap. 3.2.2 beschrieben, wurde dann der Wassergehalt aus der Bodenwelle berechnet und die Ergebnisse auf die Fläche übertragen und dargestellt (Abb. 4). Die flächenhafte Darstellung ergibt sich aus den insgesamt vier parallelen Profilen.

Zunächst fallen die Gemeinsamkeiten zwischen Feld 2 und Feld 3 auf. Für beide Felder wird ein ähnlicher volumetrischer Wassergehalt von 35 bis 36 % ermittelt. Beide Felder erscheinen gleichmäßig durchfeuchtet, wenngleich auf Feld 3 leichte Variationen zu erkennen sind. Demgegenüber wird bei Feld 1 ein Streifenmuster deutlich. Dort liegen die Feuchtewerte zwischen 28 % und 34 %. Damit ist Feld 1 um bis zu 7 Prozentpunkte trockener als die anderen beiden Felder.

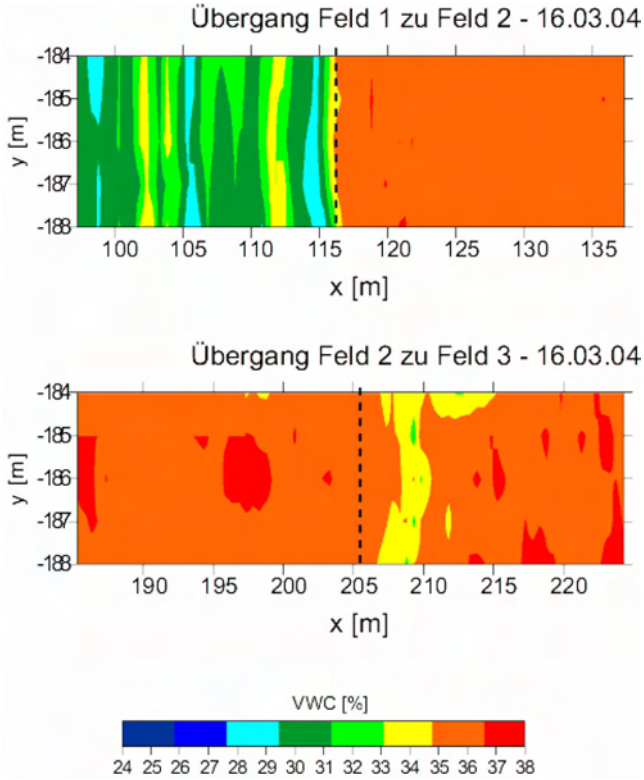


Abbildung 4: Wassergehalte abgeleitet aus Georadarmessungen auf 4 parallelen Profilen über die Grenzfläche von Feld 1 zu Feld 2, sowie von Feld 2 zu Feld 3.

Eine Interpretationsmöglichkeit wäre, dass der Boden durch den Pflug aufgelockert wird und somit

anfälliger für Austrocknungsprozesse an der aufgebrochenen Krume ist. Gleichzeitig wird durch das Streifenmuster die Bearbeitungsrichtung auf dem Feld sichtbar. Negativ auf die Ankopplung wirkte sich die Baulänge der Antennen und die Mulchauflage auf der Ackeroberfläche aus.

3.2.6 Entwicklungsstand / Praxisreife / flächenhafte Exploration

Die derzeit erhältlichen Apparaturen sind technisch ausgereift und auch zur flächenhaften Erkundung einsetzbar. Speziell in Kombination mit Differenziellem GPS (DGPS) ist eine präzise örtliche Zuordnung der Messergebnisse leicht möglich. Bei Nutzung spezieller, auf die Nutzung in der Landwirtschaft optimierter Geräte (Fahrzeugmontage), könnten bis zu mehreren zehn Hektar am Tag abgedeckt werden.

3.2.7 Entwicklungsperspektiven für das Verfahren

Die Apparatur der Fa. Geocarta (Frankreich) besitzt auf ihrem Arp-System (s.a. 3.4) ein automatisches Geoelektriksystem, auf dem zusätzlich ein GPR montiert ist. Derzeit wird dieses GPR nur zur Telemetrie genutzt, grundsätzlich ist aber eine Kombination beider Verfahren (DC & GPR) auf einer Plattform sinnvoll. Messungen vom Hubschrauber sind schnell und kostengünstig, derzeit (2006) aber noch in der Erprobungsphase. Gute Perspektiven bietet sicher die Kombination aus landgestützten GPR-Messungen, Hubschrauber-GPR und Satellitenmessungen, z.B. zur lokalen Kalibration der Satellitendaten, die dann sinnvoll zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung aufbereitet werden können.

3.2.8 Kosten

Der personelle Auswand beträgt, je nach Anwendungsart, ein bis drei Personen pro Messtrupp, evtl. ein Fahrzeug. Die Messungen können zu Fuß, vom Auto/Traktor, Hubschrauber oder Flugzeug betrieben werden. Je nach gewünschter Auflösung beträgt die Tagesproduktivität mehrere hundert Profilmeter (2D) bis zu mehreren Hektar (3D). Der Spurabstand orientiert sich auf Ackerflächen naturgemäß an den Fahrspuren, beträgt also zwischen 6 und 36 m.

3.3 Feuchtesensoren (TDR)

Die Methode Time-Domain-Reflectometry (TDR) zählt zu den etablierten Verfahren zur Bestimmung der Bodenfeuchte in der Bodenkunde. Ursprünglich wurde die Methode verwendet, um elektrische Leitungen bezüglich eines Kabeldefektes zu untersuchen. Mittlerweile hat sie sich aber für Untersuchungen der Materialfeuchte etabliert, indem sie die Abhängigkeit der Geschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle von der Feuchte ausnutzt (s.a. Kap. 3.2.4). Es gibt verschiedene technische Ansätze, die in der Literatur mit ihren Besonderheiten beschrieben sind. (s. z.B. NOBORIO 2001, ROBINSON ET AL. 2003, STACHEDER 1996, IMKO 2005). In der Geophysik wird das TDR-Verfahren im Zusammenhang mit der Ableitung der Bodenfeuchte eingesetzt (WHALLEY 1993, SCHMALHOLZ ET

AL. 2004).

Beim TDR wird die Geschwindigkeit einer geführten elektromagnetischen Welle, die durch einen Spannungsimpuls ausgelöst wird, entlang paralleler Metallstäbe bestimmt. Die Besonderheit liegt darin, dass die Welle mit der bodentypischen Geschwindigkeit und nicht mit der für den Metallstab charakteristischen Geschwindigkeit läuft. Der Metallstab dient lediglich zur Führung der Welle, was eine exakte Angabe des Laufweges ermöglicht. Die Notwendigkeit zur Trennung von direkter Boden- und Luftwelle wie beim GPR entfällt (s.a. Kap. 3.2.4). Die Geschwindigkeit bestimmt sich aus der Laufzeit (t), die die Welle benötigt, um den Boden entlang des Stabes zweimal (Hin- und Rückweg) zu durchlaufen.

Im Gegensatz zum Georadar, bei dem der Feuchtegehalt auf ein relativ großes Volumen bezogen wird (wg. des Abstandes zwischen Sender und Empfänger), wird bei der TDR-Sonde der Feuchtegehalt innerhalb eines kleineren Volumens bestimmt. Das zu erfassende Volumen wird durch den Sondendurchmesser (ca. 0,06 m), die Eindringtiefe der Sonde (0,16 m) sowie die geometrische Anordnung der Spieße (drei Spieße mit gleichem Abstand) bestimmt. Da die Messempfindlichkeit senkrecht zu den Metallstäben exponentiell abnimmt, ergibt sich für die hier verwendete Sonde ein erfassbares Volumen von ca. 100 cm^3 (IMKO 2005). Dies entspricht also einer punktuellen Erfassung der Bodenfeuchte.

Die Berechnung des Wassergehaltes erfolgt direkt geräteintern, wobei ähnliche Berechnungen wie beim Georadar beschrieben eingesetzt werden. Zuerst wird die Geschwindigkeit und danach entweder durch Mischungsgesetze bzw. durch physikalisch begründbare Formeln der Wassergehalt bestimmt (s. a. Kap. 3.2). Die TDR-Technik wird hier nicht weiter behandelt, da sie weniger eine geophysikalische als eine bodenkundliche Standardanwendung ist, ein Messbeispiel findet sich in Kap. 3.2.4 (S. 16).

3.4 Geoelektrik (DC)

Unter dem Begriff Geoelektrik werden in der Geophysik eine ganze Reihe von elektrischen und elektromagnetischen Verfahren zusammengefasst. Alle Verfahren dienen der räumlichen Erfassung der elektrischen Leitfähigkeit σ [S/m]. In der Geophysik wird oft auch der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit, der spezifische elektrische Widerstand ρ [$\Omega * m$], benutzt (KNÖDEL ET AL. 1997).

Die verschiedenen elektrischen Messverfahren unterscheiden sich im wesentlichen durch die Art der Ankopplung, den benutzten Frequenzbereich und die Messgeometrie. In diesem Kapitel wird zunächst die Gleichstromgeoelektrik (direct current, DC) exemplarisch für die elektrischen Verfahren vorgestellt. In einem späteren Kapitel wird dann noch ein weiteres, häufig in der Landwirtschaft angewandtes Verfahren, die Elektromagnetik (z.B. EM38), vorgestellt (s.a. Kap. 3.5).

3.4.1 Beschreibung des Verfahrens

Bei der Geoelektrik wird elektrischer Strom über zwei Elektroden (Metallspieße oder -räder) in den Boden eingespeist und mit Hilfe von zwei weiteren Elektroden (s.g. Sonden) die dann anliegende Potenzialdifferenz (Spannung) gemessen. Die Elektroden werden entweder galvanisch (Gleichstromgeoelektrik, niederfrequent, wenige Hz bis mHz) oder kapazitiv an den Boden angekoppelt (Wechselstromgeoelektrik, hochfrequent, bis zu mehreren kHz, z.B. bei Ohmmapper).

Die Anordnung (Konfiguration) der Elektroden zueinander ist nahezu beliebig, doch haben sich spezielle Konfigurationen aufgrund ihrer Auflösungseigenschaften und des Messfortschrittes für geophysikalische Fragestellungen etabliert. Befinden sich alle Elektroden auf einer Linie mit gleichem Elektrodenabstand zueinander und die Potenzialelektroden zwischen den Stromelektroden, dann handelt es sich um eine sogenannte Wenner-Anordnung. Weitere Anordnungen sind die Dipol-Dipol-, die Schlumberger- oder Wenner-Schlumberger-Anordnung (Abb. 5).

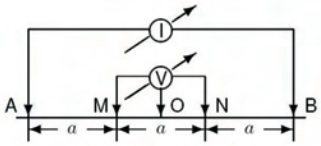
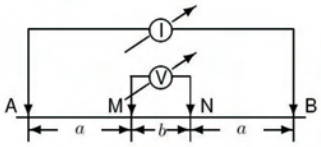
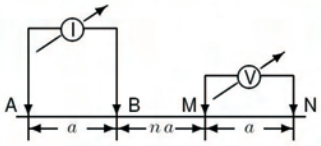
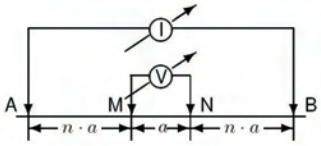
Verfahren	Elektrodenkonfiguration	Konfigurationsfaktor
Wenner		$K = 2\pi a$
Schlumberger		$K \approx \frac{\pi(2a+b)^2}{4b}; \quad b \ll a$
Dipol-Dipol		$K = \pi \cdot n(n+1)(n+2)a$
Wenner-Schlumberger		$K = \pi \cdot n(n+1)a$

Abbildung 5: Prinzipskizze der vier Standardauslagen der Geoelektrik: Wenner, Schlumberger, Dipol-Dipol und Wenner-Schlumberger. A und B sind die Stromelektroden, über die der elektrische Strom in den Untergrund eingespeist wird und M und N sind die Sonden für den Abgriff der Potenzialdifferenz (Spannung). Für die Erhöhung der Erkundungstiefe wird jeweils a vergrößert, für die laterale (seitliche) Erkundung die komplette Auslage bewegt.

Die Erkundungstiefe und die Auflösung des Verfahrens sind sowohl von der Elektrodengeometrie (s.o.) als auch von der elektrischen Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund abhängig. Im allgemeinen gilt, je größer der Abstand zwischen den Stromelektroden, desto tiefer dringt das Stromsystem in den Untergrund ein. Als Faustregel gilt eine Erkundungstiefe von 1/6 bis 1/3 des Stromelektrodenabstandes.

Zur Vereinfachung der Auswertung werden mehrere Einzelmessungen entlang eines Profils zu zweidimensionalen Auslagen (s.g. Pseudosektionen) zusammengefasst. Berücksichtigt werden dabei Messungen mit verschiedenen Elektrodenabständen und damit verschiedenen Eindringtiefen. Im Ergebnis erhält man eine zweidimensionale Verteilung (in Abhängigkeit von Profilentfernung und Tiefe) der elektrischen Leitfähigkeit im Untergrund.

Finden die Messungen über homogenem Untergrund statt, entspricht die gemessene elektrische Leitfähigkeit (scheinbare Leitfähigkeit), der „wahren“ elektrischen Leitfähigkeit bzw. dem spezifischen elektrischen Widerstand. In der Regel ist der Untergrund aber nicht homogen, weswegen durch Inversionsrechnungen die Leitfähigkeitsverteilung der „wahren“ elektrischen Leitfähigkeit im Boden hergeleitet werden muss.

3.4.2 Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft/Bodenkunde

Die elektrische Leitfähigkeit wird hauptsächlich von drei Faktoren beeinflusst, der Wassersättigung, dem Chemismus des Wassers (Ionenkonzentration im Porenfluid) sowie der Bodenart (Bodenmatrix). Die Parameter, über die mit DC-Geoelektrik Aussagen gemacht werden können sind deshalb sehr vielfältig:

- Bodenstruktur/Schichtabfolgen/Lithologie
- Bodenart/Tiefgründigkeit/Horizontierung
- Auffüllungen/verfüllte Gräben
- Wassergehalt/Bodenfeuchte
- Tiefe des Grundwassers, Übergang von ungesättigter zu gesättigter Zone
- Porenvolumen
- hydraulische Leitfähigkeit

3.4.3 Aussagekraft der Ergebnisse

Die Ableitung des Wassergehaltes aus den elektrischen Messungen geschieht meistens über die sogenannten Archie-Gleichungen (ARCHIE 1942). Dabei handelt es sich um empirische Beziehungen,

die in ihrer ursprünglichen Form nur für reine Sande gelten. Da die elektrische Leitfähigkeit aber nicht nur vom Wassergehalt abhängt, sondern auch z.B. von der Boden-/Gesteinsart (Tone im Boden erhöhen die elektrische Leitfähigkeit), wurden die Gleichungen weiterentwickelt (siehe SCHÖN 1998), um sie auch für tonhaltige Böden einsetzen zu können. Für die Anwendung der Archie-Gleichung müssen Parameter wie Porosität oder Sättigungsexponent im Labor ermittelt werden. Gleichzeitig kann durch eine Mineralbestimmung im Labor die Vieldeutigkeit in der Aussage der elektrischen Leitfähigkeit verringert werden.

Da sich der elektrische Strom im gesamten Untergrund unter den Elektroden ausbreitet, werden auch Leitfähigkeitsinhomogenitäten, die sich seitlich des Messprofiles befinden, erfasst. Diese seitlichen (lateralen) Anomalien beeinflussen die Messungen und werden mehr oder weniger stark in die 2D-Sektion projiziert. Die Untersuchung dieser lateralen Effekte erfolgt durch den Einsatz von 3D-Auslagen, bei denen die Elektroden in der Fläche ausgebracht werden. Wichtig ist dabei, dass eine 3D-Messung nicht durch einfaches Aneinanderfügen von mehreren 2D-Messungen erzeugt wird, sondern die Messungen auch als 3D-Messungen konzipiert werden (LOKE UND BARKER 1996).

Weitere Einschränkungen bei der Anwendung geoelektrischer Verfahren ergeben sich durch Polarisationtseffekte (Aufladung der Elektroden), die zu einem erheblichen Messfehler führen können. Des weiteren stören hohe Übergangswiderstände (bei trockenem oder gefrorenem Boden), die aber durch Angießen der Elektroden vermieden werden können.

3.4.4 Feldbeispiel

Auf den drei Teilflächen der Versuchsfläche Lüttewitz (Pflug, Direktsaat, Mulchsaat, s. Abb. 1 auf S.13) wurden Messflächen mit einer Größe von 9,5 m x 5,5 m angelegt. Bei der Anlage der Flächen wurde auf einen ausreichenden Abstand zur Parzellengrenze geachtet.

Die 3D-Messungen bestanden aus einzelnen 2D-Profilen, die sowohl parallel als auch senkrecht zur Profilausrichtung angeordnet waren und dann anschließend gemeinsam invertiert wurden. Für die vollständige Abdeckung der Teilflächen waren jeweils drei Rollalongs notwendig. Dadurch konnte ein Gitter von 20 Elektroden in x-Richtung und 12 Elektroden in y-Richtung eingesetzt werden. Um eine ausreichende Überdeckung zu gewährleisten, wurden für alle drei Elektrodenauslagen insgesamt 2612 Quadrupole geschaltet.

In Abb. 6 sind die Inversionsergebnisse für die kleinste Elektrodenauslage (a = 0,5 m) dargestellt. Nach Betrachtung der großskaligen Tiefensektionen können die Vertikalschnitte in drei Bereiche eingeteilt werden: Einen oberflächennahen Bereich, der sehr stark durch den Bodenbearbeitungsprozess (Befahrung, Bearbeitung) und weitere äußere Einflüsse (z.B. Niederschlag, Erosion) beeinflusst wird. Ein relativ leitfähiges Band, mit ca. 1 m Mächtigkeit in ungefähr 1 m Tiefe sowie ein resistiverer

Bereich zum Ende des Vertikalschnittes. Gezeigt werden deshalb jeweils die Horizontalschnitte für die Oberfläche (z = 0 m), die Pflugsohle (z = 0,35 m) und die größte Eindringtiefe (z = 0,85 m) auf den Flächen 1 und 2.

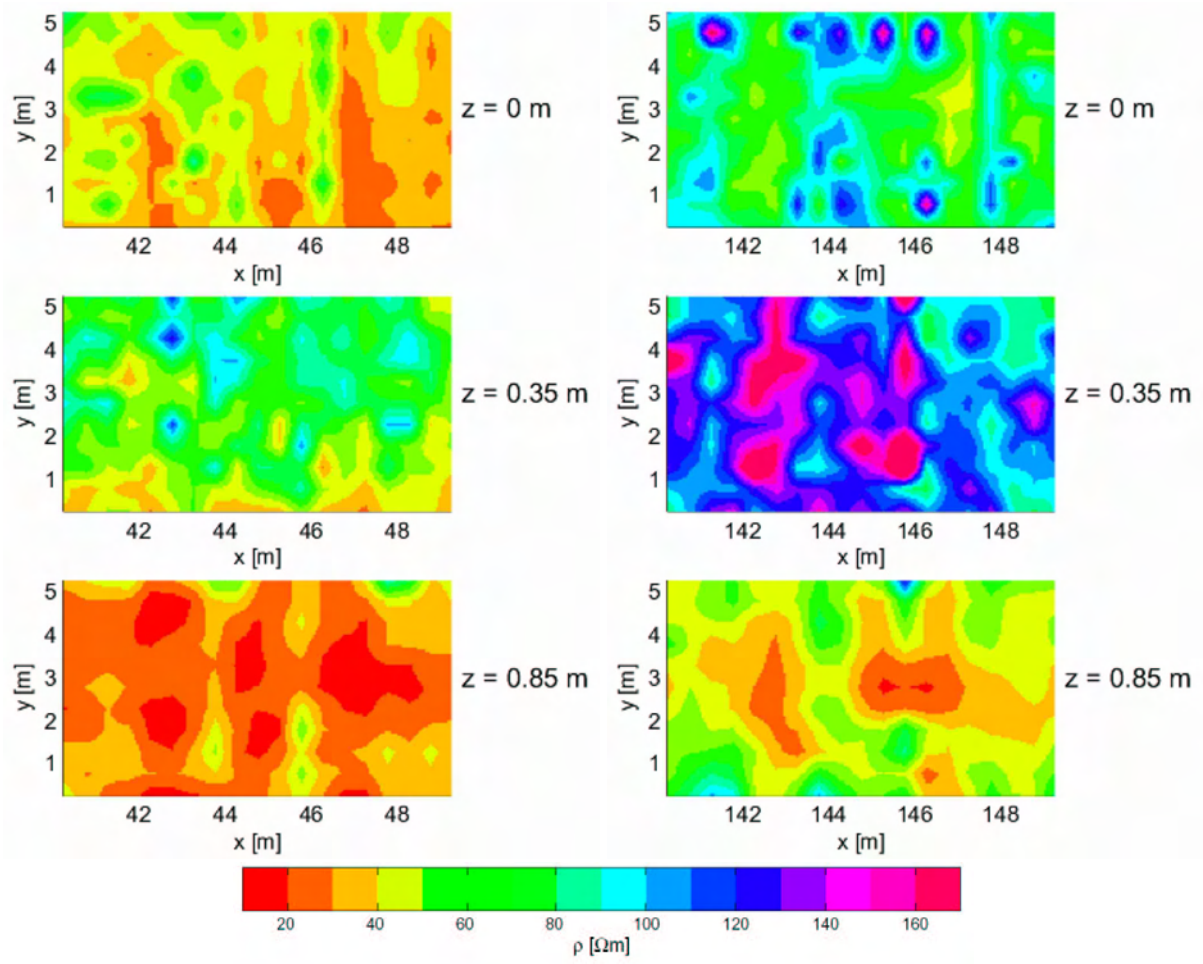


Abbildung 6: Inversionsergebnisse der 3D-Geoelektrik auf Feld 1 (links) und Feld 2 (rechts), Elektrodenabstand 0,5 m. Dargestellt sind jeweils drei Horizontalschnitte in den Tiefen 0 m, bzw. oberflächennah (oben), Pflugsohle (0,35 m, mitte) und 0,85 m Tiefe (unten).

Bei Fläche 1 liegen die Widerstandswerte für den oberflächennahen Bereich um die 40 Ωm für die Pflugsohle bei 60 – 80 Ωm und für den Bereich bei 0,85 m unter 20 Ωm. Bei Fläche 2 liegen die Widerstände oberflächennah bei 70 – 100 Ωm, für die Pflugsohle bei über 120 Ωm und für den Bereich bei 0,85 m unter 50 Ωm.

Die Widerstände zeigen von der Oberfläche in die Tiefe einen Verlauf von hohen zu niedrigen Werten. Dabei sind die Werte auf der Fläche 2 im Vergleich zur Fläche 1 bei gleichem Verlauf um den

Faktor zwei höher.

Da das Bodenmaterial sich von einem Feld zum anderem nicht unterscheidet, muss dieser Unterschied im wesentlichen von einem unterschiedlichem Wassergehalt herrühren. Dies bedeutet, dass die Fläche 1 (gepflügt) deutlich feuchter sein muss, als die unbearbeitete Flache 2. Das gleiche Phänomen zeigte sich bei Widerholungsmessungen nach starkem Regenereignis zwei Monate später.

Beide Flächen zeigen darüberhinaus oberflächennahe Streifenmuster. Diese Streifen können mit Fahrspuren, bzw. Fahrgassen, d.h. der Bearbeitungsrichtung auf dem Feld korreliert werden und könnten als kompaktierte Bodenbereiche interpretiert werden. Sie zeigen sich oberflächennah besonders gut, da die Auflösung dort am höchsten ist.

3.4.5 Entwicklungsstand / Praxisreife / flächenhafte Exploration

Die derzeit erhältlichen Apparaturen für den stationären Einsatz sind technisch ausgereift und auch zur flächenhaften Erkundung einsetzbar. Insbesondere die Multielektroden/Multikanalapparaturen ermöglichen einen hohen Messfortschritt und damit geringen Zeitaufwand/Kosten bei gleichzeitiger hoher räumlicher Auflösung.

Im Vergleich zu den stationären Apparaturen erreicht man allerdings mit Systemen für den mobilen Einsatz um Größenordnungen höhere Produktivität. Mittlerweile gibt es einige Systeme basierend auf galvanischer Ankopplung für den mobilen Einsatz. Die modernsten Systeme sind:

- ARP (Geocarta, Frankreich), automatische gleichzeitige Erfassung von drei Tiefenleveln (Metallräder mit Spießen).
- VERIS 3100 (Veris Technologies, USA), automatische gleichzeitige Erfassung von zwei Tiefenleveln (scharfkantige Metallräder).

Mit kapazitiver Ankopplung gibt es derzeit nur ein System, den Ohmmapper (Geometrics, USA) bei dem die Ankopplung mit rohrförmigen Elektroden, die sich an einem langen Schlauch befinden, der über den Boden gezogen wird.

3.4.6 Entwicklungsperspektiven für das Verfahren

Derzeit befinden sich mindestens zwei weitere Systeme in der Entwicklung, die sich durch die Möglichkeit zur Messung von mehr Tiefenlevel und durch die Erfassung weiterer Parameter auszeichnen:

- Pluripol (Universität Kiel), mehr Tiefenlevel.
- HAHA71 (Universität Potsdam), mehrere Tiefenlevel und Erfassung der Polarisierbarkeit (s.a. Kap. 3.8).

Alle o.g. Systeme werden in Kombination mit DGPS zur präzisen Lokalisierung bestückt. Die ARP-Apparatur der Fa. Geocarta wird zudem mit einem GPR ausgestattet, welches aber bisher nur zur präziseren Ortung eingesetzt wird.

Vielversprechende Anwendungen elektrischer Systeme gibt es in ariden Gebieten, z.B. für die Bewässerungsanalyse oder zur Vorbereitung einer gezielten Bewässerung bzw. den Einsatz wassersparender Bewässerungssysteme.

3.4.7 Kosten

Der personelle Aufwand beträgt, je nach Anwendungsart, ein (mobile Systeme) bis drei (stationäre Systeme) Personen pro Messtrupp. Je nach gewünschter lateraler Auflösung beträgt die Tagesproduktivität mehrere hundert Hektar (mobile Systeme). Eine vollständige Kartierung des Messgebietes in Lüttewitz mit dem ARP-System betrug knapp einen Tag. Bei solchen Systemen liegen die Kosten bei ca. 100 EUR/Hektar.

3.5 Elektromagnetik (EM)

3.5.1 Beschreibung des Verfahrens

Elektromagnetische Verfahren (Induktionsmethoden, EM) sind bei oberflächennaher Erkundung in der Regel Zwei-Spulen-Systeme. In einer Sende-Spule wird ein Wechselstrom einer bestimmten Frequenz eingespeist und dadurch ein primäres Magnetfeld erzeugt. Dieses Magnetfeld induziert in elektrisch leitfähigen Bereichen des Untergrundes Wirbelströme, die ihrerseits ein sekundäres Magnetfeld hervorrufen. An der Empfänger-Spule wird das primäre und sekundäre (zeitabhängige) Magnetfeld als physikalisch komplexes Signal gemessen, d.h. als Real- und Imaginärteil. In der Landwirtschaft wird häufig das EM38 von der Firma Geonics eingesetzt (NEILL 1980). Dabei handelt es sich um ein spezielles Gerät, das sich vor allem wegen seiner einfachen Bedienung und Robustheit in der Landwirtschaft etabliert hat (z.B. DURLESSER 1999, LÜCK 2002).

3.5.2 Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft/Bodenkunde

Wie bei der Geolelektrik wird bei der Elektromagnetik die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Boden bestimmt, daher sind auch die Parameter, über die mit Elektromagnetik Aussagen gemacht werden können, nahezu die gleichen:

- Bodenstruktur/Schichtabfolgen/Lithologie
- Bodenart/Tiefgründigkeit/Horizontierung
- Auffüllungen/verfüllte Gräben
- Wassergehalt/Bodenfeuchte

- Tiefe des Grundwassers, Übergang von ungesättigter zu gesättigter Zone
- Porenvolumen
- hydraulische Leitfähigkeit

3.5.3 Aussagekraft der Ergebnisse

Für die elektrischen Parameter gilt bei der Elektromagnetik, was bereits bei den Gleichstromgeoelektrikmessungen gesagt wurde (s.a. Kap. 3.4.3).

Der wesentliche Unterschied zur Geoelektrik besteht bei der Elektromagnetik darin, dass quantitative Aussagen, v.a. aufgrund von Gerätedriften (starke Temperaturabhängigkeit), kalibrationsabhängig sind. Das bedeutet, dass zusätzlich zur Kalibration von elektrischer Leitfähigkeit mit den Bodenparametern eine weitere Kalibration von gemessener elektrischer Leitfähigkeit und tatsächlicher elektrischer Leitfähigkeit erfolgen muss. Vorteile bestehen durch die vollkommene Berührungsfreiheit, d.h. es gibt keine Ankopplungsschwierigkeiten durch hohe Übergangswiderstände. EM-Verfahren sind deshalb insbesondere für sandige und trockene Böden geeignet.

Ein weiterer Nachteil gegenüber der Gleichstromgeoelektrik ist, dass z.B. bei der Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit (bei EM38) der Realteil des komplexen Signals vernachlässigt und nur der Imaginärteil ausgewertet wird. Diese Vernachlässigung ist aber nur unter bestimmten Bedingungen zulässig und nicht immer gültig. Die Nichtbeachtung des Realteils kann daher zu einer Fehlinterpretation führen.

Die Erkundungstiefe wird durch den Sender-Empfänger-Abstand, die Frequenz, die elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes und die geometrische Anordnung der Spulen beeinflusst. Der Sender–Empfänger Abstand (1 m) und die Messfrequenz (14,6 kHz) sind beim EM38 bereits fest vorgegeben. Die geometrische Anordnung der Spulen ist stark eingeschränkt (horizontal koplanar oder vertikal koplanar). Für die horizontal koplanare Anordnung (Standard-Modus) ergibt sich typischerweise die maximale Erkundungstiefe. Die Erkundungstiefe entspricht dabei dem Abstand zwischen Sender und Empfänger, d.h. beim EM38 ca. 1 m. Allerdings hängt die Erkundungstiefe zusätzlich von der elektrischen Leitfähigkeit ab. Je höher die elektrische Leitfähigkeit, desto niedriger ist die Eindringtiefe.

Die EM–Messverfahren sind damit im wesentlichen für eine schnelle Übersichtsmessung zur qualitativen Beurteilung der elektrischen Leitfähigkeitsverhältnisse geeignet. Vorteilhaft ist, dass es induktiv ankoppelt, also eine umständliche Installation (z.B. das Einstecken von Elektroden wie bei der Geoelektrik) nicht notwendig ist. Allerdings ist es auf den sehr oberflächennahen Bereich beschränkt, d.h. eine detaillierte Tiefeninformation kann mit dieser Methode nicht erhalten werden.

3.5.4 Feldbeispiel

Die EM-Daten stammen vom Schlag „Am Flugplatz“ des LfL-Standortes Köllitsch. Auf dieser Fläche wurden durch die LfL EM38-Messungen durchgeführt.

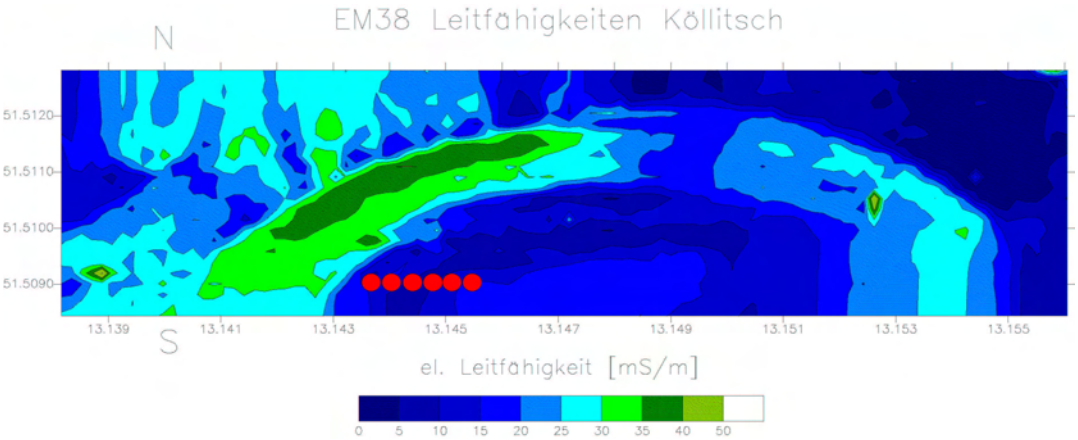


Abbildung 7: Ergebnisse der EM38-Messungen auf der Fläche „Am Flugplatz “ in Köllitsch. Die roten Kreise entsprechen den sechs SNMR-Spulen aus Abb. 9.

Die EM-Kartierung in Abb.7 zeigt zwei wesentliche Anomalien:

1. Einen leitfähigen bogenförmigen Bereich (grün bis hellblau), in dem die mittlere elektrische Leitfähigkeit um einen Faktor 2-4 gegenüber dem Rest der Fläche erhöht ist.

2. Einen Bereich im Nordwesten, in dem der Bogen durch nord-süd-verlaufende Strukturen durchbrochen wird.

Zum Vergleich und zur Interpretation wird ein Luftbild des Feldes herangezogen: Auf Abbildung 8 erkennt man deutliche Unterschiede im Bewuchs (hellgraun/gelb und hellgrün), die mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften korrelieren: Die hellbraunen/gelben Bereiche sind sandiger, die hellgrünen schluffiger. Die Erwartung ist nun, dass sich diese Unterschiede in den physikalischen Parametern widerspiegeln, weil

1. feinkörniges (toniges) Material im Allgemeinen elektrisch leitfähiger ist,

2. feinkörniges Material sich im Allgemeinen durch einen höheren Wassergehalt auszeichnet, der sich wiederum in einer Leitfähigkeitszunahme abbildet.

Auf dem Luftbild ist analog zur EM-Kartierung eine laterale Variation der Feuchte als Variation im Bewuchs erkennbar:

1. Der leitfähige Bereich im EM wird hier durch einen Boden mit sattem, grünem Bewuchs widergespiegelt.

2. Der geringer leitfähige Bereich innerhalb des Bogens ist im Luftbild deutlich durch von einem trockenen (braunen) Bogen durchzogenen Bereich erkennbar.

Zusammenfassend lässt sich an diesem Beispiel zeigen, dass die grobe Struktur (feinkörnig/grobkörnig) mit EM 38 gut wiedergegeben wird, der leitfähige (grüne) Bogen findet sich im Luftbild wieder. Auch lassen sich die hellen, trockenen (elektrisch geringer leitfähigeren) Strukturen innerhalb des feuchten Bogens gut reproduzieren. Unterschiede gibt es bei der Komplexität der Strukturen, so zeigt das Luftbild eine stärkere Substruktur innerhalb des trockenen Bereiches (Bogens), die so von den EM 38 Messungen nicht wiedergegeben wird. Ursache dafür ist vermutlich die Eindringtiefe des EM 38, die dazu führt, dass die Leitfähigkeitsinformation über die obersten dm integriert wird, wogegen das Luftbild nur sehr oberflächennahe Informationen abbildet. Leider gibt es auf dieser Fläche keine zusätzlichen Parameter im oberflächennahen Bereich, so dass eine weiterführende Interpretation nicht möglich ist (die SNMR-Messungen erfassen einen deutlich größeren Tiefenbereich).



Abbildung 8: Ausschnitt einer Luftaufnahme der Fläche „Am Flugplatz“ in Köllitsch. Die sechs Kreise rechts von der Mitte markieren die SNMR-Spulen aus Kap. 3.6.4. Dabei entsprechen 3 und 6 den Lokationen der Spulen aus Abb. 9. Links: Norden, rechts: Süden. Aufgrund der unbekannten Perspektive gibt es keine definierte Skala. Foto: Dr. Eckhard Rexroth, LVG Köllitsch.

3.5.5 Entwicklungsstand / Praxisreife / flächenhafte Exploration

Die derzeit erhältlichen Apparaturen sind bereits für den mobilen Einsatz konzipiert. Außer dem EM 38 gibt es im wesentlichen die abgeleiteten Systeme:

- (EM38), EM38-DD, EM38-MK2 (Geonics, Kanada),
- CM-138 (GF Instruments, Tschechien), im Prinzip ein Nachbau des EM38.

3.5.6 Entwicklungsperspektiven für das Verfahren

Für die flächenhafte Erkundung sind elektromagnetische Verfahren von ihrer Funktionsweise her optimal geeignet, um aber eine quantitav hochwertigere Auswertung zu ermöglichen, müssen die Hersteller die Gerätedrift in den Griff bekommen.

Des weiteren wäre es wünschenswert, mehrere Frequenzen gleichzeitig messen zu können, um damit auch die flächenhafte tiefenabhängige Leitfähigkeitsverteilung zu ermöglichen.

An dieser Stelle sei auf ein Projekt des BMELV verwiesen, bei dem alle am Markt befindlichen elektrischen und elektromagnetischen Geräte getestet und verglichen werden sollen, weitere Informationen dazu bei der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung unter Entscheidungshilfe-Vorhaben (Förderkennzeichen 01HS081):
Evaluierung der Meßmethoden zur Leitfähigkeitskartierung im Feldmaßstab

3.5.7 Kosten

Der personelle Aufwand ist gering, er beträgt, je nach Anwendungsart, ein oder zwei Personen. Je nach gewünschter lateraler Auflösung beträgt die Tagesproduktivität durchaus mehrere hundert Hektar (auf Fahrzeug montierte, mobile Systeme).

3.6 Kernspinresonanz (SNMR)

Kernspinresonanz (nuclear magnetic resonance, NMR) wurde in der Geophysik bis in die 1990er-Jahre überwiegend bei Bohrlochmessungen eingesetzt. Im Rahmen der Erforschung ölführender Gesteine wurden Beziehungen zwischen den NMR-Eigenschaften poröser Medien (z.B. Sandsteine) und deren Durchlässigkeiten abgeleitet (SEEVERS 1966, TIMUR 1968, 1969, LOREN 1972). Wegen ihrer Bedeutung als Speichergesteine für Öl und Gas behandeln deshalb die meisten veröffentlichten Laboruntersuchungen Festgesteine (KENYON 1992, 1997). In den letzten Jahren hat die Oberflächen-NMR (surface NMR – SNMR oder magnetic resonance sounding – MRS) für hydrogeophysikalische Anwendungen Einzug gehalten (SHIROV ET AL. 1991, LEGCHENKO UND SHUSHAKOV 1998, LEGCHENKO UND BEAUCE 1998, LEGCHENKO ET AL. 2002, LEGCHENKO UND VALLA 2002, YARAMANCI

ET AL. 1999, YARAMANCI ET AL. 2002). Um die SNMR-Daten in Aquifermodelle und Strukturparameter übersetzen zu können, rücken deshalb auch die NMR-Eigenschaften von Sedimenten und Böden in den Vordergrund (s.a. YARAMANCI ET AL. 1999, 2002, MÜLLER ET AL. 2003, 2005), z.T. auch in Kombination mit anderen Verfahren (z.B. SIP: MÜLLER UND YARAMANCI 2004).

3.6.1 Beschreibung des Verfahrens

Kernspinresonanz beobachtet man an Elementarteilchen mit Spin (z.B. 1/2 bei ^{1}H), wenn diese Teilchen sich in einem statischen Magnetfeld B_0 befinden und durch ein sekundäres oszillierendes Magnetfeld angeregt werden (ABRAGAM 1983). Das statische Magnetfeld B_0 bewirkt eine Larmorpräzession der Kernmomente mit der Frequenz ω_0. NMR Signale von Wasserstoffkernen wurden erstmalig im Jahre 1946 mit ausreichender Genauigkeit gemessen (BLOCH ET AL. 1946, PURCELL ET AL. 1946). Seitdem hat die NMR-Technik zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten in der Chemie, der Physik, der medizinischen Tomographie und letztlich in der Geophysik erschlossen. In der Geophysik werden im wesentlichen NMR-Effekte von Wasserstoffprotonen in Wasser (H_2O) und in Kohlenwasserstoffen ausgenutzt.

Die Amplitude des NMR-Signals ist direkt proportional zur Anzahl der Wasserstoffprotonen und damit zur Wassermenge. Die Methode kann deshalb zur Messung des Wassergehaltes in Böden und Gesteinen eingesetzt werden. NMR ist nicht nur eine Hilfsmethode zur Bestimmung vielfältiger Gesteins- und Fluidparameter, sondern darüber hinaus die einzige Methode, mit der Wasser (^{1}H-Protonen) im Untergrund bzw. in einer Probe direkt detektiert werden kann. Die Parameter, die mit NMR bestimmt werden können, sind u.a. der Wassergehalt, die effektive Porosität bei Vollsättigung, die Verteilung des Porenraumes und Innere Oberfläche, die Permeabilität und Haftwasseranteile. Gerade die Verteilung des Porenraumes und die letzten beiden Parameter ermöglichen eine indirekte Bestimmung des Wasserretentionsverhaltens, da dies maßgeblich von der Verteilung des Porenraumes abhängt. Bei den Labor- und Bohrlochapparaturen wird jeweils ein spezieller Permanentmagnet, beim SNMR-Verfahren dagegen das Erdmagnetfeld als statisches Magnetfeld genutzt.

3.6.2 Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft/Bodenkunde

Die Parameter, über die mit SNMR Aussagen gemacht werden können, sind:

- Bodenstruktur/Schichtabfolgen
- Übergang gesättigte/ungesättigte Zone
- Wassergehalt
- Wasserbindung

Am Fachgebiet Angewandte Geophysik der TUB wurde eine Dissertation über die speziellen Möglichkeiten bei der Anwendung der separated-loop Technik verfasst (HERTRICH ET AL. 2005). Der bis dahin übliche Aufbau (coincident-loop) besteht aus einer einzelnen Spule, die sowohl für die Anregung als auch die Aufzeichnung genutzt wird. Bei der separated-loop Technik werden zwei unterschiedliche Spulen für Anregung (Sender, T_x) und Aufzeichnung (Empfänger, R_x) des Signales genutzt. Das bedeutet gleichzeitig, dass Senderspule und Empfängerspule auch unterschiedliche Geometrien und Lagen im Raum haben können. Die Ergebnisse dieser Dissertation zeigen, dass für die Projektflächen v.a. die separated-loop Technik in Frage kommt, da bei unverändert großen Spulen und damit hoher Signalqualiät trotzdem eine hohe Auflösung oberflächennaher Schichten erreicht werden kann (s.a. HERTRICH ET AL. 2005). Die Ergebnisse von HERTRICH ET AL. (2005) zeigen, dass die Bestimmung der Variationen im Wassergehalt in den obersten fünf bis zehn Metern mit der Numis-Lite Apparatur und separated loop Technik grundsätzlich möglich sein sollte.

3.6.3 Aussagekraft der Ergebnisse

Siehe Kap. 3.6.5

3.6.4 Feldbeispiel

Am Standort Köllitsch, wurden auf dem Schlag „Am Flugplatz “ Messungen Ende August 2005 durchführt. Aus einer älteren Messung der LfL existieren auch EM38-Ergebnisse, die dankenswerterweise von Dr. Jörg Pößneck zur Verfügung gestellt wurden (s.a. Kap 3.5). Abbildung 8 zeigt die Fläche „Am Flugplatz “ in einer Luftaufnahme mit den angedeuteten Spulen.

Auf dem Luftbild erkennt man deutliche Unterschiede im Bewuchs (hellgraun/gelb und hellgrün), die mit unterschiedlichen Bodenzusammensetzungen korrelieren: Die hellbraunen/gelben Bereiche sind sandiger, die hellgrünen schluffiger. Die Erwartung war nun, dass sich diese Unterschiede in den physikalischen Parametern widerspiegeln, und zwar:

1. im Wassergehalt und damit direkt im SNMR-Wassergehalt und indirekt in einer Leitfähigkeitszunahme,
2. in der Wasserbindung und damit in den NMR-Abklingzeiten.

Insgesamt wurden an zwei Tagen 16 Messungen, davon sechs coincident-loop und 10 separated-loop durchgeführt (s. Abb. 9). Bei den separated-loop Messungen sind alle bis auf eine edge-to-edge, d.h. die Spulen lagen direkt nebeneinander (`sij` außer `s10` in Abb. 9). Der Spulendurchmesser betrug bei allen Messungen 24 m, um die Auflösung zu erhöhen.
Insgesamt ist die Qualität der Daten befriedigend bis gut, die Daten der separated-loop-Messungen sind dabei aufgrund der geringeren Signalamplituden etwas schlechter als die zum Teil sogar guten coincident-loop-Messungen. Eine Ausnahme ist die Messung s10, wo, bedingt durch den großen Abstand von R_x und T_x (ein Spulendurchmesser), die Signalamplituden sehr klein sind und die Daten

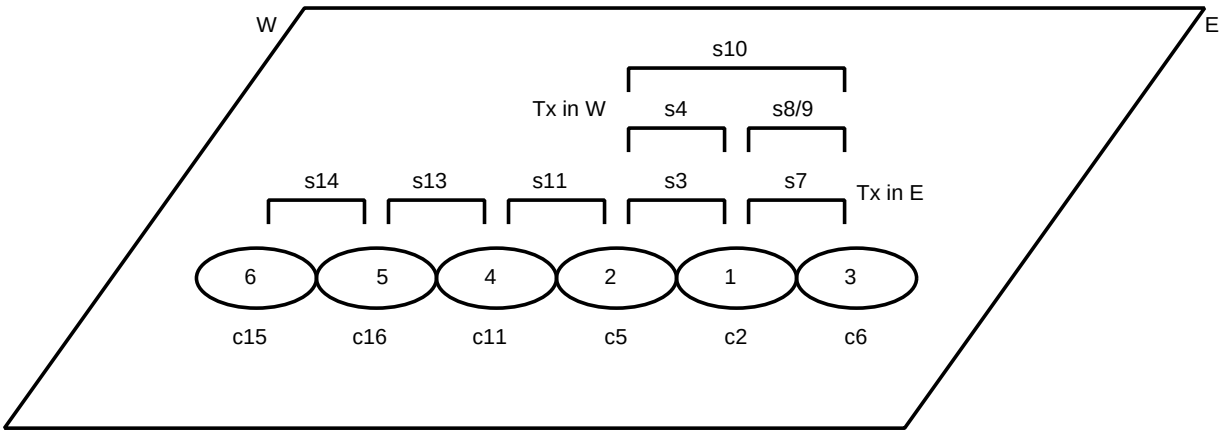


Abbildung 9: SNMR-Spulenauslage in Köllitsch. Die Ziffern in den Spulen bezeichnen die Spulennummer. Zur Nomenklatur siehe Text.

nicht ausgewertet werden konnten. In Abb. 10 sind exemplarisch die Daten (Punkte) und die Anpassung (Linie) der Amplituden der coincident-loop Sondierung s2 an Station 1 gezeigt.

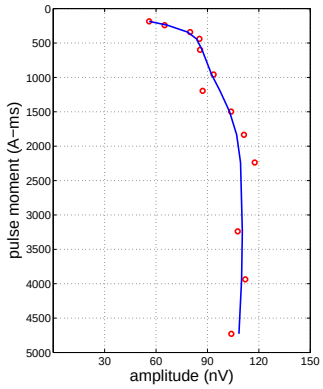


Abbildung 10: SNMR-Daten von Sondierung s2 an Station 1 in Köllitsch. Messdaten (einzelne Punkte) und berechnete Daten (Linien) der SNMR-Amplitude in Abhängigkeit vom Pulsmoment (Energie).

Abb. 11 (oben) zeigt die 2D-Inversionsergebnisse aller coincident- und separated-loop Messungen in Köllitsch. Die 2D-Pseudosektion der 1D-Inversionen der sechs coincident-loop Messungen (unten) zeigt ein relativ grobes Bild, in den obersten 10 m gibt es ein Maximum des Wasssergehaltes an Station P2, darunter sind die lateralen Wassergehaltsvariationen relativ gross. Die echte 2D-Inversion der sechs coincident-loop Messungen (mitte) dagegen zeigt bereits ein deutlich ausgeglicheneres Bild, in Tiefen ab 20 m, vor allem in den obersten 10 m sind die lateralen Variationen aber stärker

ausgeprägt. Die der gemeinsamen 2D-Inversion aller Messungen (oben) sieht man dann ein noch ausgeprägteres Bild in den obersten 10 m, in größeren Tiefen ist gegenüber der 2D-Inversion der coincident-Messungen kaum ein Unterschied festzustellen.

In den obersten 15 m kann man bei der kompletten 2D-Inversion eine schwach ausgeprägte Struktur erkennen, u.a. eine unterschiedlich trockene Deckschicht (rot/braun unter P1-P6 in 0-5 m Tiefe). Die 2D-Inversion der sechs coincident-loop-Messungen (Abb. 11, mitte) zeigt bereits eine laterale Struktur, bei der aber die Wassergehalte der ungesättigten Zone überschätzt werden (zwischen 5 – 10 % anstatt 0 – 5 %). Erst nach der Hinzunahme der separated-loop Daten wird also das Inversionsergebnis detailliert genug, um auch schon in geringen Tiefen Wassergehaltsänderungen bestimmen zu können.

Die Wassergehalte (aus voller 2D-Inversion) zeigen in den obersten 5 m folgenden Verlauf: Von einem Minimum bei P3 (Ost) nimmt der Wassergehalt bei P1 leicht zu, um bei P2 wieder etwas abzunehmen. Ein Maximum befindet sich bei P4, wobei zwischen P5 und P6 ein weiteres Minimum zu sehen ist, um westlich von P6 wieder leicht zuzunehmen.

Da die separated–loop Technik die Sensitivitäten auf geringere Teufen als die coincident–loop Technik fokussiert, sind hier die oberflächennahen Wassergehalte demzufolge besser aufgelöst und damit realistischer. Es ist bereits auf den ersten Blick erkennbar, dass die oberflächennahen Wassergehalte von einer Station zur anderen stärker variieren und sich auch im Verlauf von den coincident-loop-Ergebnissen unterscheiden: So sind die Wassergehalte der separated-loop-Modelle an den Stationen 1 und 2 in den obersten Metern niedriger als bei den coincident-loop-Ergebnissen. Der derzeitige Stand der 2D-Inversion erlaubt leider nicht die Bestimmung der Abklingzeiten, diese können nur bei der 1D-Inversion berechnet werden.

Die Ursache für die relativ geringe laterale Variation des Wassergehaltes liegen möglicherweise in einer nicht optimalen Auswahl der Spulenpositionen auf der Fläche begründet. Die Position des SNMR-Profiles wurde nach einem Bereich mit starken Kontrasten aus dem Luftbild abgeleitet. Wie Abb.7 zeigt, ist dies offenbar nicht identisch mit dem Bereich hohen Kontrastes der elektrischen Leitfähigkeit. Diese Diskrepanz könnte die schwach ausgeprägten lateralen Variationen des Wassergehaltes erklären und zeigt, wie wichtig vor Anwendung der SNMR eine Vorerkundung mit anderen, schnelleren geophysikalischen Verfahren ist.

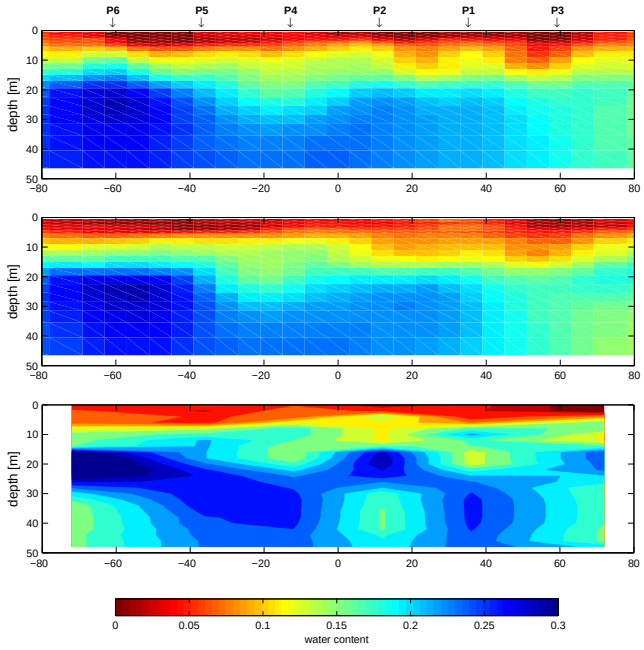


Abbildung 11: Inversionsergebnisse (Wassergehalt über Tiefe und Ort) für separated-loop-Messungen Köllitsch im Vergleich zu den bisherigen „Standard-"Messungen. 2D-Inversion für alle 16 möglichen coincident und separated loop Messungen (oben); 2D-Inversion der sechs coincident-loop Messungen (mitte); 2D-Pseudosektion der 1D-Inversionen der sechs coincident-loop Messungen (bisheriger Standard, unten). P1 – P6 bezeichnet die Position der Mittelpunkte der coincident-loop-Messungen, Spulendurchmesser 24 m.

3.6.5 Entwicklungsstand / Praxisreife / flächenhafte Exploration

Die Hauptnachteile des (derzeit) einzigen existierenden SNMR-Gerätes (NUMIS) für den Feldeinsatz sind:

1. Bei den derzeitig möglichen Konfigurationen beträgt die minimale Eindringtiefe mehrere Meter bzw. das minimale Integrationsvolumen mehrere Zehner m^3.

2. Die Apparatur ist sehr rauschempfindlich, d.h in der Nähe starker anthropogener Störer (Hochspannungsleitungen) kann nur unter großen Schwierigkeiten gemessen werden. Da die Apparatur in der aktuellen Version keinen Zugriff auf die Rohdaten ermöglicht, kann kein weiterführendes Signal-Prozessing durchgeführt werden.

3. Die s.g. Totzeit zwischen dem Ende des anregenden Pulses und der Aufzeichnung ist so groß, dass nur Protonen in mobilem Wasser detektiert werden können.

Die Ergebnisse speziell durchgeführter Modellrechnungen sind wie folgt zusammenzufassen:

1. Sollen geringe Tiefenbereiche mit der SNMR untersucht werden, so müssen die bisherigen Spulendurchmesser (50 – 100 m) deutlich verkleinert werden.

2. Dies geht mit einem Verlust an Signalstärke einher. Ein Erhöhen der Windungszahl führt zwar zu einer Vergrößerung des Signals, aber auch gleichzeitig zu einer Anregung in größeren Tiefen, die durch eine Verringerung der Pulsmomente kompensiert werden müsste.

3. Ein Lösungsansatz liegt in der Verwendung von getrennten Sende- und Empfangsspulen unterschiedlicher Spulengeometrien. Das kleinste Pulsmoment der Numis-Apparatur liegt bei ca. 100 Ams. Verwendet man z.B. eine Sendespule mit 10 m Durchmesser und eine Empfangsspule mit 5 m Durchmesser und 5 Windungen, liegen die modellierten SNMR Amplituden im messbaren Bereich (größer 20 nV) und es können Pulsmomente zwischen 100 und 1000 Ams zur Erkundung der obersten 10 m verwendet werden.

3.6.6 Entwicklungsperspektiven für das Verfahren

Die SNMR-Ergebnisse zeigen gute Datenqualität bei der Bestimmung des Wassergehaltes in den obersten 5 – 10 m. Auch die Abklingzeiten können bestimmt werden, z.Zt. aber nur bei den 1D coincident-loop-Inversionen. Bei den 2D-Inversion noch nicht. Die zeitlichen Veränderungen des elektromagnetischen Rauschens machen eine Prognose über die Anwendbarkeit der Methode schwierig. Diese Schwierigkeiten konnten aber schließlich doch noch durch Wahl einer alternativen Lokation (Köllitsch) überwunden werden.

Insgesamt sind die Ergebnisse für die SNMR-Messungen zwiespältig: Zum einen haben die Modellrechnungen und zum Teil auch die Feldmessungen gezeigt, dass ein Potenzial für sinnvolle und aussagekräftige Anwendungen der SNMR-Methode in der Landwirtschaft existiert. Zum anderen sind die

praktischen Probleme so groß, dass an einen Standardeinsatz mit den derzeitigen Apparaturen leider nicht zu denken ist. Vor allem qualitative Einschränkungen durch elektromagnetisches Rauschen (Hochspannungsleitungen, Windräder) sind hierbei das wesentliche Problem. Für eine quantitative Auswertung muss zudem immer auch die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit bekannt sein.
Aus dem Obengenannten ergeben sich wesentliche Folgerungen:

1. Für exemplarische Messungen ist eine Kombination aus der Numis-Lite Apparatur und separated-loop Technik das derzeit optimale Verfahren.
2. Der Übergang ungesättigt/vollgesättigt kann mit SNMR abgebildet werden, wenn er im Erfassungsbereich der genutzten Konfiguration liegt.
3. Die Technik ist noch nicht reif für den standardisierten (flächenhaften) Einsatz in der Landwirtschaft.
4. Das Potenzial wird als sehr hoch eingeschätzt, allerdings wird bis zu einer regulären Anwendung noch deutliche Entwicklungsarbeit der Hersteller zu leisten sein.

Bei der Übertragbarkeit von Labor-NMR-Ergebnissen in die Fläche haben sich in den letzten Jahren durch diese und andere Arbeiten der TUB wesentliche Fortschritte ergeben. So gibt es nun Methoden (Faustregeln), mit denen die im Gelände bestimmten NMR-Parameter zu den im Labor gemessenen überführt und verglichen werden können.

3.6.7 Kosten

Da sich die Methode für die oberflächennahe Erkundung noch im Erprobungsstadium befindet, ist es nicht sinnvoll hierzu Angaben zu machen. Derzeit werden zwei bis drei Personen für die Durchführung der Messungen im Gelände benötigt, der Messfortschritt hängt stark von der Datenqualität ab (Noise).

3.7 Gamma-Spektrometrie

Dieses Kapitel über Gamma-Spektrometrie basiert im wesentlichen auf einem Text von Herrn Joachim Sauer (SAUER 2002). An diesem Punkt sei ihm deshalb für die Überlassung der Originale der Abbildungen und des Textes gedankt.

3.7.1 Beschreibung des Verfahrens

Die Gamma-Spektrometrie ist ein Verfahren, bei dem die natürliche Gammastrahlung des Oberbodens aufgezeichnet wird (SAUER 2002). Erste Messungen zeigen sehr gute Korrelationen zwischen der Bodenart der obersten 3 bis 4 Dezimeter und der Gamma-Aktivität (Abb. 12). Es konnte die aus Bohrlochmessungen bekannte Abhängigkeit zwischen Tongehalt und Gamma-Aktivität bestätigt werden. Die Messungen wurden auf einzelnen Versuchsschlägen in Niedersachsen mit einem Handmessgerät (Detektor mit Natriumjodid-Kristall von 0,35 l Größe) im 10 x 10 Meter-Raster durchgeführt. Dies bedingte einen relativ großen Messaufwand.

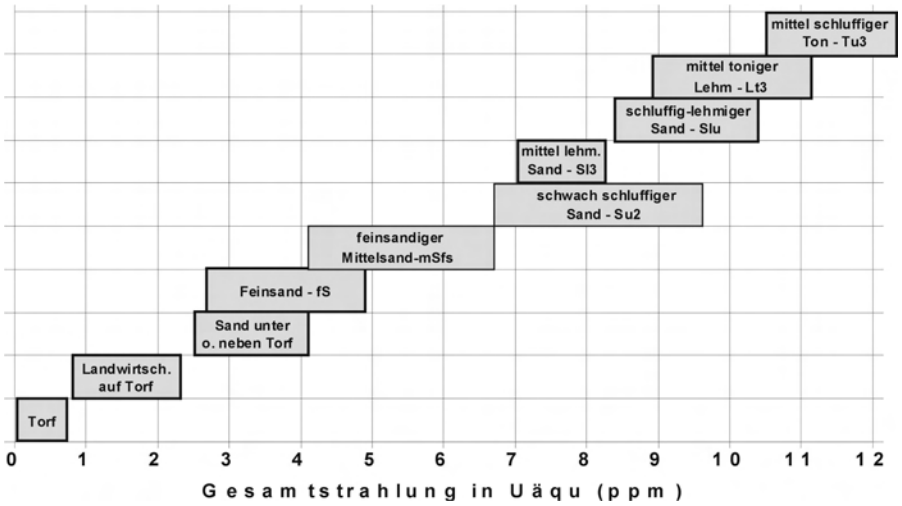


Abbildung 12: Natürliche Gammaaktivität in Abhängigkeit von der Bodenart.

3.7.2 Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft/Bodenkunde

Gamma-Spektrometrie-Messungen können neben gut abzugrenzenden Strukturen auch Hinweise auf die zu erwartende Bodenart liefern und Kartierarbeiten positiv unterstützen. Die Parameter, über die mit Gamma-Spektrometrie Aussagen gemacht werden können, sind:

- Bodenstruktur/Lithologie
- Bodenart
- Auffüllungen/verfüllte Gräben
- Wasserspeichervermögen, pf-Beziehung/Wasserrückhaltevermögen
- hydraulische Leitfähigkeit

3.7.3 Aussagekraft der Ergebnisse

Der Nachteil der Gamma-Spektrometrie, dass nur ein Summenparameter über die gesamte Messtiefe ermittelt wird, kann bei parallelem Einsatz z.B. mit Gleichstromgeoelektrik zum Teil kompensiert werden, da eine Verschneidung von Leitfähigkeitskarten und Karten der Gamma-Aktivität auftretende Materialwechsel zwischen Oberboden und Untergrund erkennen lässt.

3.7.4 1. Feldbeispiel

Abb. 13 zeigt Daten von einem Versuchsfeld der Universität Potsdam. Längs eines Profiles wurden dort in einem Punktabstand von 10 m in verschiedenen Tiefen Bodenproben für eine Sand-Schluff-Ton-Analyse entnommen. An diesen Punkten wurde dann jeweils auch eine γ–Kartierung an der Oberfläche durchgeführt.

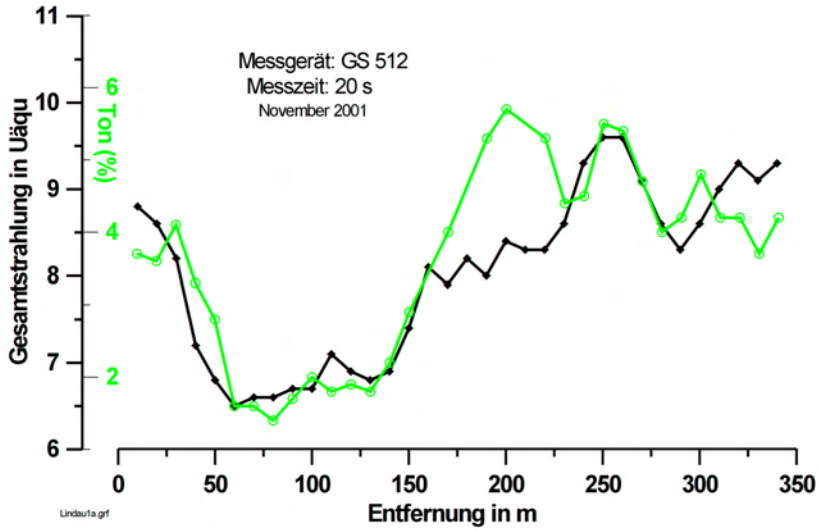


Abbildung 13: Vergleich zwischen γ-Aktivität an der Oberfläche und Tongehalt in 15 cm Tiefe (aus SAUER 2002).

Ein Vergleich der γ–Werte und des Tongehaltes zeigt eine gute Korrelation. Die Abweichungen im Bereich 170 – 220 m konnten nicht eindeutig geklärt werden.

3.7.5 2. Feldbeispiel

Auf einem anderen Versuchsfeld (in Grasleben, bei Helmstedt) erfolgte eine flächenhafte γ-Messung in einem quadratischem Netz von 10 x 10 m. Auf dieser Fläche fand weiterhin eine EM-Kartierung mit einem EM38 statt. Abb. 14 zeigt eine gute Übereinstimmung der Maxima und Minima (jeweils rot, bzw. weiß). In Bereichen mit geringen Gradienten ist eine Abweichung zu beobachten, was durch Interpolationseffekte aufgrund unterschiedlicher Messnetze zu erklären ist. Bodenkundlich wurden die Ergebnisse bestätigt: Eine Feinsandzone zieht sich kontrastreich bei Profilmeter 150 und 200 quer durch das Feld, mitteltoniger Lehm und mitteltoniger Schluff begrenzen sie.

3.7.6 Entwicklungsstand / Praxisreife / flächenhafte Exploration

Bei den Gamma-Spektrenmessungen handelt es sich um eine Anwendung, die der Bodenkartierung neue Perspektiven eröffnet. Die bisherigen Untersuchungen wurden mit einer relativ kleinen Apparatur durchgeführt und waren daher sehr aufwändig. Es ist aber möglich, mit einem größeren Gerät das Messverfahren deutlich zu beschleunigen und dieses eventuell mit der Leitfähigkeitsmessung zu kombinieren. Dadurch ist zu erwarten, dass auch diese Methode zu akzeptablen Preisen angeboten werden kann.

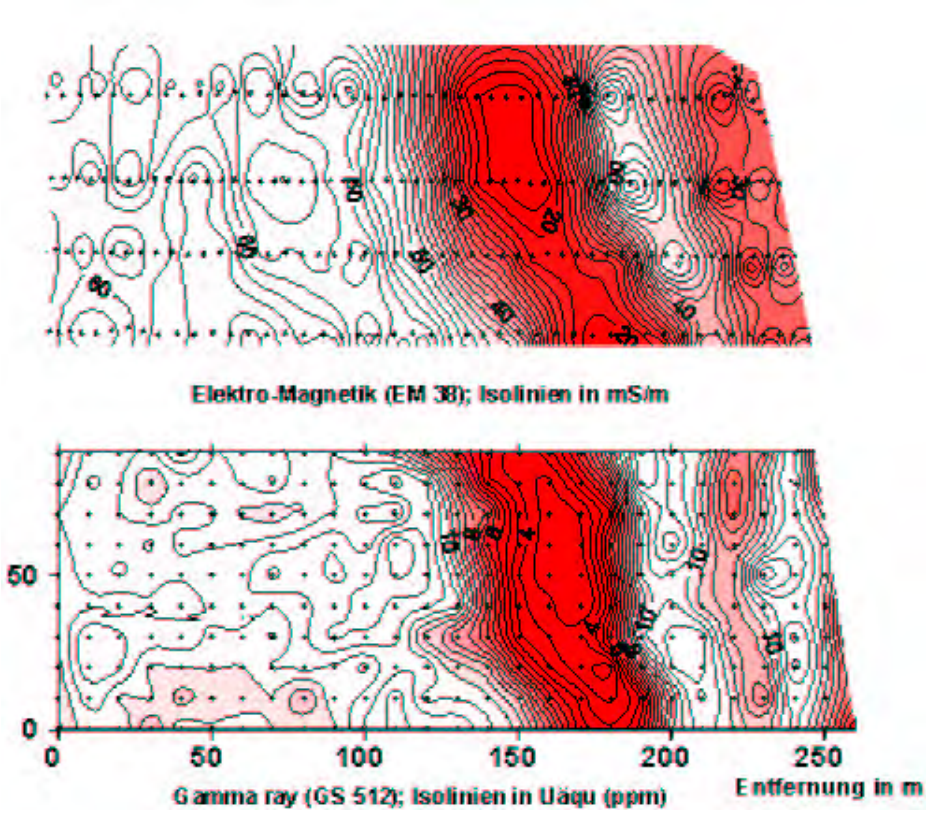


Abbildung 14: Gegenüberstellung von γ- und Leitfähigkeitsmessungen auf Feld 58 (Grasleben/Helmstedt) (aus SAUER 2002).

3.7.7 Entwicklungsperspektiven für das Verfahren

Die Messgeschwindigkeit könnte ohne nennenswerte Auflösungsverluste durch Einsatz anderer Detektoren mit NaJ-Kristallen mit mehreren Liter Volumen deutlich erhöht werden. Es sind dann auch kontinuierliche Messungen möglich. Eine Befliegung mit einem im Messhubschrauber der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) installierten Detektor bestätigte dies. Bei dieser Befliegung konnten die durch Handmessung gewonnenen Ergebnisse im Wesentlichen reproduziert werden. Effektivere Kristalle ermöglichen auch eine Erhöhung der Aussagekraft der spektralen Analyse. Die Frage der Tonmineralisation und der Korngrößenbestimmung könnten, wie aus der Bohrlochmessung bekannt, untersucht werden. Die geringe Tiefenaussage dieses Verfahrens ist einerseits ein beschränkender Faktor, andererseits ist die sich abzeichnende Möglichkeit der Bodenartenbestimmung von großer Bedeutung, da für zahlreiche bodenkundliche Auswertungsverfahren der Tongehalt im Oberboden ein wichtiger Parameter ist (vgl. MÜLLER 1997, SOMMER & VOSSHENRICH 2002).

3.7.8 Kosten

Für die Durchführung der Messung am Boden wird nur eine Person benötigt, der Zeitaufwand beträgt bei einem 10 x 10 m Messraster (11x11=121 Messpunkte) ca. 2 h pro Hektar. Befliegungen sind natürlich deutlich produktiver, lohnen sich aber erst ab größeren Flächen.

3.7.9 Bemerkungen

Für dieses Kapitel bedanken wir uns bei Herrn Joachim Sauer (Hannover, ehem. GGA-Institut), der wesentliche Teile dieses Kapitels zur Verfügung gestellt hat.

3.8 Induzierte Polarisation (IP/SIP)

Die spektrale induzierte Polarisation (SIP) erfasst die Frequenzabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes, um daraus strukturelle und stoffliche Eigenschaften des Bodens abzuleiten (SCHÖN 1996).

3.8.1 Beschreibung des Verfahrens

Das SIP-Verfahren ähnelt der Gleichstromgeoelektrik, d.h. die Messkonfiguration besteht aus einer herkömmlichen Vierpunktanordnung (s. Abb. 5). Der Unterschied zur Gleichstromgeoelektrik besteht darin, dass die Messungen nicht nur bei einer festen (niedrigen) Frequenz stattfinden (Gleichstromfall), sondern die Messungen über einen Frequenzbereich von 1 Hz bis 12 kHz durchgeführt werden. Bei SIP-Messungen wird ein frequenzabhängiges, komplexes (Real- und Imaginärteil oder Amplitude und Phase), Messsignal registriert. Neben dem elektrischen Widerstand wird noch die Phasenverschiebung zwischen eingespeistem Strom und gemessener Spannung registriert.

Polarisationseffekte im Boden (IP-Effekte) werden u.a. durch die Geometrie und Struktur des Porenraumes beeinflusst. Dabei deuten betragsmäßig hohe Phasenwerte auf eine eingeschränkte Beweglichkeit der freien Ionen im Porenfluid hin, d.h. die Elektrolytleitfähigkeit ist eingeschränkt. Ursache ist die Bildung einer elektrischen Doppelschicht auf der Grenzfläche zwischen den Körnern und dem Porenfluid: An der negativ geladenen Matrixoberfläche der Körner lagern sich positiv geladene Teilchen fest an. Danach folgt eine weitere positiv geladene Schicht, wobei die Konzentration der frei beweglichen Kationen nach außen exponentiell abnimmt (KNÖDEL ET AL. 1997). Im Bereich der Doppelschicht ist die Elektrolytleitfähigkeit eingeschränkt, was bei großen Poren nicht ins Gewicht fällt. Kleine Porenradien (Engstellen, Porenhälse), verhindern einen ungehinderten Ladungstransport, was sich in einer Frequenzabhängigkeit von elektrischem Widerstand und Phase niederschlägt. Durch die Stärke des IP-Effektes kann also von Porenradien auf Korngrößenverteilungen geschlossen werden. Somit ist es u.a. möglich, die hydraulische Leitfähigkeit abzuleiten (KLITZSCH 2004).

SIP-Messungen werden entweder an der Oberfläche oder mittels einer Rammsonde durchgeführt. An der Oberfläche erfolgen die Messungen üblicherweise mittels einer Schlumberger-Anordnung, bei der der Abstand der äußeren Stromelektroden um einen Mittelpunkt schrittweise bis zu einer Gesamtauslage von ca. 10 bis 100 Meter vergrößert wirde (s.a. Abb. 5). Das Ergebnis der Schlumberger–Sondierung ist dann eine vertikale (eindimensionale) Widerstands- und Phasenverteilung. Mit der Rammsonde werden die ringförmigen Elektroden, die sich auf dem Sondenkopf befinden, über ein Gestänge in den Boden gerammt. Widerstands- und Phasenverlauf werden direkt in der jeweiligen Tiefe des Bodens bestimmt. Mit dieser Methode wird der unmittelbare Bereich um den Sondenkopf erfasst. Diese Vorgehensweise ist invasiv, besitzt aber den Vorteil, dass die Messungen direkt am Ort der Sonde stattfinden und auch als Kalibrationsmessungen für DC-Geoelektrik oder EM 38 genutzt werden können.

Ergänzend sei erwähnt, das der IP-Effekt auch im Zeitbereich gemessen werden kann. Bei der Zeitbereichs-IP wird die Aufladbarkeit (engl. chargeability) erfasst, d.h. es wird nach dem Abschalten des Einspeisestroms das Abklingen der Spannung aufgezeichnet. Eine Umrechnung zwischen Frequenz- und Zeitbereichs-IP ist möglich (TELFORD ET AL. 1990).

3.8.2 Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft/Bodenkunde

Zunächst einmal können mit IP/SIP Aussagen über die gleichen Parameter gemacht werden wie bei der Elektromagnetik und Geoelektrik, da der elektrische Widerstand auch immer mitgemessen wird. Die Parameter, über die zusätzlich mit IP/SIP Aussagen gemacht werden können, sind:

- Bodenart
- Wasserspeichervermögen, pf-Beziehung/Wasserrückhaltevermögen
- hydraulische Leitfähigkeit

3.8.3 Aussagekraft der Ergebnisse

Die Interpretation von IP-Daten im Hinblick auf den Tongehalt sind vielversprechend, bezogen auf Porenraumstruktur sind noch weitergehende grundlegende Untersuchungen nötig. Vor allem die Kombination mit NMR zeigt hierbei hohes Potenzial (s.a. MÜLLER UND YARAMANCI 2004).

3.8.4 Feldbeispiel

Aus der Fläche in Lüttewitz wurden insgesamt vier SIP-Schlumberger-Sondierungen und drei SIP-Rammsondierungen durchgeführt. Die Auswertung der Schlumberger-Daten erfolgte so, dass aus den Widerstands- und Phasenwerten die Chargeability berechnet wurde. Für die Umrechnung wurden Werte bei 1 Hz und 100 Hz verwendet. Anschließend erfolgte eine Joint-Inversion, bei der neben der Chargeability noch die Widerstände bei 100 Hz verwendet wurden. Die Joint-Inversion wurde mit

einem Vierschichtmodell als Startmodell gestartet. Abb. 15 zeigt die Daten und Inversionsergebnisse exemplarisch für eine Sondierung.

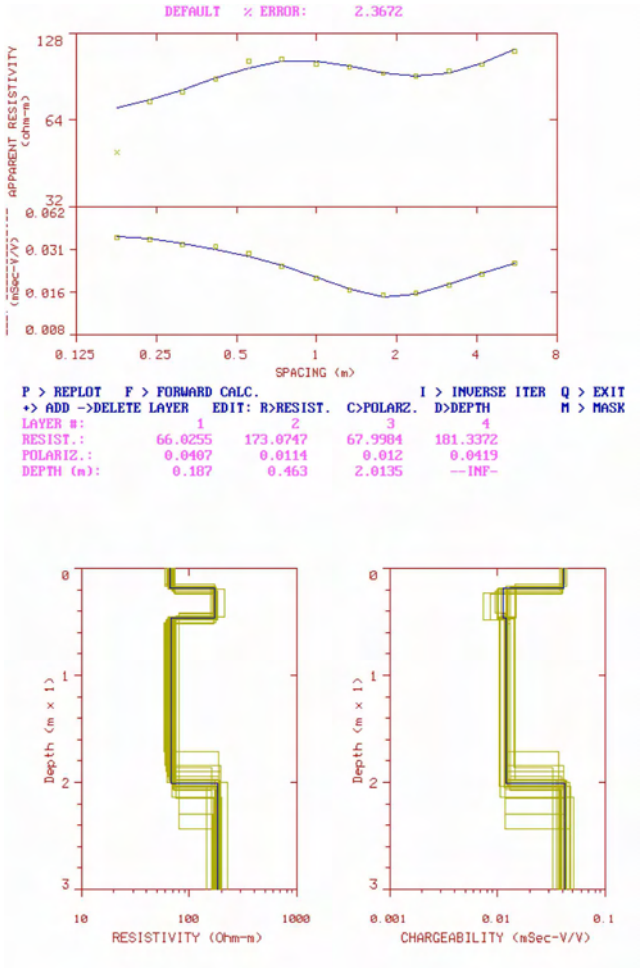


Abbildung 15: Ergebnisse einer Schlumberger-SIP-Messung in Lüttewitz. Oben: Messwerte für Widerstand (oben) und Aufladbarkeit (unten), unten: Inversionsergebnisse des Widerstandes (links) und der Ausladbarkeit (rechts). Die grünen Kurven zeigen Äquivalenzmodelle.

Neben dem Inversionsergebnis (untere Abbildung, blaue Linie) wurden zusätzlich die dazugehörigen Äquivalenzmodelle (grün) berücksichtigt. Im oberen Teil der Abb. 15 sind die Messwerte grün und die Daten der Anpassung blau. Die Anpassung des Modells ist gut, der RMS liegt bei 2,4 %. Diese hohe Qualität der Anpassung rechtfertigt die Annahme eines Vierschichtfalles. Auffällig ist insbesondere eine oberflächennahe Schicht mit einem spez. Widerstand von ca. 70 Ωm, der sich eine resistivere Schicht von 105 Ωm anschließt.

3.8.5 Entwicklungsstand / Praxisreife / flächenhafte Exploration

Die derzeit existierenden Apparaturen sind im wesentlichen für einen stationären Einsatz konzipiert. An der Universität Potsdam wird an der Adaption einer SIP–Apparatur für den mobilen Einsatz gerade für die Anwendung in der Landwirtschaft gearbeitet (HAHA 71, siehe Kap. 3.4.6).

3.8.6 Entwicklungsperspektiven für das Verfahren

Analog zu Geoelektrik, allerdings mit der Einschränkung der geringeren Geschwindigkeit wegen des höheren Messzeitaufwandes (s.u.).

3.8.7 Kosten

Der Zeitaufwand für Sektionsmessungen liegt in etwa 30 bis 50 % höher als bei äquivalenten Geoelektrikmessungen, dementsprechend erhöht sich der finanzielle Bedarf.

3.9 Seismik

Das Messverfahren der (aktiven) Seismik eignet sich besonders für die geologische Strukturerkundung (z.B. bei der Erdöl- und Erdgasprospektion). In der oberflächennahen Erkundung (Umwelt-/Ingenieurseismik) wird das Verfahren vor allem zur Lokalisierung von Strukturen und Objekten hinsichtlich Tiefenlage und Ausdehnung genutzt. Bei der Seismik werden im wesentlichen die elastischen Eigenschaften des Untergrundes bestimmt.

3.9.1 Beschreibung des Verfahrens

Über eine an den Boden angekoppelte Quelle (Hammer, Lautsprecher, Sprengkapsel) wird ein akustischer Impuls in den Boden abgestrahlt. Die dadurch erzeugten akustischen Wellen werden dann mit Bewegungssensoren (Geophone) aufgenommen. Die Wellenenergie kann auf verschiedenen Wegen die Geophone erreichen: direkt durch die Luft (direkte Luftwelle), direkt durch den Boden (direkte Bodenwelle) oder nach Reflexion der Welle an Schichtgrenzen im Boden.

Die Eigenschaften des Bodens, die die Ausbreitungsgeschwindigkeit der akustischen Wellen beeinflusst, sind die elastischen Parameter (Kompressions-, Scher- und Elastizitätsmodule). In Lockerse-

dimenten beinflusst im wesentlichen der Kornkontakt, die Porosität und der Wassergehalt (indirekt, über den Kornkontakt) die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle (s.a. KNÖDEL ET AL. 2005).

3.9.2 Anwendungsmöglichkeiten in Landwirtschaft/Bodenkunde

Die Parameter, über die mit seismischen Wellen Aussagen gemacht werden können, sind:

- Bodenstruktur/Schichtabfolgen
- Verdichtung, Änderung der Lagerungsdichte
- Detektion von Findlingen
- Erkundung von Störungen

3.9.3 Aussagekraft der Ergebnisse

Besondere Schwierigkeiten bei der Anwendung der Seismik in der Landwirtschaft bestehen in den geringen Tiefen, über die Aussagen gemacht werden müssen. Für die Erkundung der obersten Meter wird eine hochfrequente akustische Schallquelle benötigt, z.B. ein Hammer oder ein Lautsprecher, die gut an den Boden angekoppelt werden kann.

Eine wichtige Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit der Seismik ist, daß es sich bei landwirtschaftlich genutzten Flächen um hinreichend flächige Bereiche und nicht nur um punktuelle Parameteränderungen handelt, also mehrere Geophone sich über dem zu untersuchenden Bereich befinden (s.a. PETERSEN ET AL. 2005).

3.9.4 Feldbeispiel

Die Daten einer Anwendung von Geophysik zur Bestimmung der Bodenverdichtung von PETERSEN ET AL. (2005) zeigen für die Seismik die folgenden Ergebnisse:

Aus den ermittelten Geschwindigkeitsvariationen der seismischen Wellen konnten Dichtevariationen im Untergrund gefunden werden. Pflugsohlenverdichtungen ließen sich mit der benutzten Technik nicht detektieren, da die Auflösung des Verfahrens nicht ausreichte. Trotzdem zeigen die Ergebnisse, dass sich substratbedingte Dichteunterschiede im Unterboden durch die Analyse der Kompressionswellen finden lassen. Die Autoren verweisen dazu auf eine noch zu optimierende Messtechnik.

3.9.5 Entwicklungsstand / Praxisreife / flächenhafte Exploration

Die derzeit existierenden Apparaturen sind im wesentlichen für einen stationären Einsatz konzipiert, mobile bzw. automatisierte Systeme sind in der Seismik derzeit nicht bekannt.

3.9.6 Entwicklungsperspektiven für das Verfahren

Eine Automatisierung ist durchaus denkbar, z.B. durch mobile Systeme mit automatischer Geophonausbringung, allein der Entwicklungszeitraum bis zu einem Prototypen muss aber auf einige Jahre angesetzt werden.

3.9.7 Kosten

Da sich die Methode für die landwirtschaftliche Anwendung noch im Erprobungsstadium befindet, ist es nicht sinnvoll, hierzu Angaben zu machen. Derzeit werden zwei bis drei Personen für die Durchführung der Messungen im Gelände benötigt.

3.10 Kombination von geophysikalischen Verfahren zur Verbesserung der Aussagekraft

Wie zu Beginn des Handbuches bereits erläutert, bildet ein einzelnes geophysikalisches Verfahren meistens nur einen einzelnen physikalischen Parameter ab. Die Herausforderung besteht nun darin, einen Zusammenhang zwischen dem gemessenen physikalischen Parameter bezüglich eines bodenkundlich/landwirtschaftlich relevanten Parameters herzustellen, da unterschiedliche Bodeneigenschaften die gleichen physikalischen Eigenschaften besitzen können. So führt z.B. sowohl eine Erhöhung des Tongehaltes als auch eine Erhöhung des Wassergehaltes zu einem geringeren elektrischen Widerstand: Der physikalische Parameter Widerstand ist also in diesem Sinne nicht eindeutig.

Um diese Mehrdeutigkeiten in der Aussage zu reduzieren und die Aussagekraft der Daten in ihrer Qualität und Quantität zu optimieren, ist die Kombination von zwei oder mehreren Verfahren sinnvoll und z.T. notwendig. Das Ganze kann auch sowohl als mehrstufiger Prozess (seriell) oder als gleichzeitige Berücksichtigung der Information erfolgen (sogenannte Joint Inversion oder Interpretation). Wenn der Prozess automatisiert (rechnergestützt) erfolgt, heißt er im allgemeinen Inversion, wenn er per Hand erfolgt ist es eher Interpretation.

3.10.1 GPR + TDR

Bei dieser Kombination werden zwei verschiedene Verfahren genutzt, die den gleichen physikalischen Parameter (Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Boden) und den gleichen bodenkundlich nutzbaren Parameter abbilden (die Bodenfeuchte): Das Beispiel 3.2.4 in Abb. 3 (S. 17) zeigt den Wassergehalt aus GPR und den TDR-Wassergehalt. Die TDR-Feuchte am Anfang des Profiles wurde dabei zur Kalibration der GPR-Feuchte benutzt. Man kann gut erkennen, wie beide Verfahren unterschiedliche Integrationsvolumina und -tiefen berücksichtigen und erhält daraus ein Maß für die Heterogenität der Bodenfeuchte in Abhängigkeit von der Messskala.

3.10.2 DC + EM

Auch bei dieser Kombination werden zwei verschiedene Verfahren genutzt, die den gleichen physikalischen Parameter (elektrischer Widerstand) abbilden. Der Unterschied der beiden Verfahren besteht darin, dass die Elektromagnetik, z.B. EM38, berührungsfrei (induktive Ankopplung) arbeitet, die Gleichstromgeoelektrik dagegen mit Spießen oder Rädern an den Boden angekoppelt werden muss, damit ein Strom fliesst. Hauptvorteil des EM38 liegt in der höheren Messgeschwindigkeit, Hauptvorteil der Geoelektrik in der größeren örtlichen Präzision (Tiefenauflösung) und den quantitativ besseren Daten.

Eine gemeinsame Anwendung ist vorteilhaft, z.B. durch Kalibration von flächenhaften EM–Messungen mit Geoelektrikmessungen. Dadurch erhält man einen hohen Messfortschritt (EM), verbunden mit quantitativ präziseren Daten (DC).

3.10.3 GPR + DC

Bei dieser Kombination werden zwei verschiedene Verfahren genutzt, die unterschiedliche physikalische Parameter (GPR: Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen; DC: elektrischer Widerstand), aber z.T. den gleichen bodenkundlich nutzbaren Parameter abbilden können (die Bodenfeuchte). Die Geoelektrik ist aber nicht nur empfindlich gegenüber dem Wassergehalt, sondern z.B. auch gegenüber dem Tongehalt.

Wenn man nun z.B. den Ton-/Sandgehalt des Bodens aus DC-Widerstandswerten ableiten möchte, ist es notwendig, Informationen über die Bodenfeuchte einfliessen zu lassen. Dies wird z.B. erreicht, indem die Bodenfeuchte aus den GPR–Messungen bei der Auswertung der DC–Messungen berücksichtigt wird. Damit kann dann die intrinsische Mehrdeutigkeit der Geoelektrik auf eine Aussage über den Tongehalt reduziert werden: Die vorher gemischte Auswertung Feuchte/Ton wird auf den Ton-/Sandgehalt reduziert.

3.10.4 NMR + SIP

In Böden mit kleinskaligen Variationen des Gehaltes an Sand, Ton oder organischer Substanz (Humus) können die klassischen Modelle wie Archie (ARCHIE, 1942) oder Topp (TOPP ET AL., 1980) keine befriedigende Interpretation der geophysikalischen Messungen liefern. Ein Lösungsweg ist die Anwendung der Spektralen Induzierten Polarisation (SIP). Die wesentliche Eigenschaft der SIP-Messungen ist, dass die Frequenzabhängigkeit der Phase Zusatzaussagen über Poreneigenschaften ermöglicht. Eine weitere Methode, die Aussagen über den Wassergehalt und Poreneigenschaften liefert, ist die NMR.

Um eine Korrelation zwischen an der Oberfläche gemessenen Resistivitäten und den tatsächlichen

im Boden vorhandenen Resistivitäten und Strukturparametern - wie z.B. der Bodenfeuchte bzw. dem Wassergehalt oder der inneren Oberfläche - zu ermöglichen bzw. eine Kalibration der Oberflächenmessungen durchzuführen, wurde eine ursprünglich für DC Geoelektrik konzipierte Rammsonde (direct push) für SIP-Messungen umgerüstet. Darüber hinaus kann mit dem Einsatz dieses Systems eine (punktuell) höhere parametrische und vertikale Auflösung erreicht werden als es durch konventionelle Messungen von der Oberfläche aus möglich ist. Getestet wurde die Methode an Standorten in Berlin-Buch, Berlin-Tiergarten und in Lüttewitz.

Die Korrelation des elektischen Widerstandes und des volumetrischen Wassergehaltes ist zufriedenstellend für die Proben aus Berlin-Buch. Für die Proben aus Lüttewitz ist dieser Zusammenhang allerdings fast nicht zu erkennen. Auf der anderen Seite gibt es eine gute bis sehr gute Korrelation von SIP-Phase und NMR-Abklingzeit T für alle drei Datensätze. Dies liegt sicherlich daran, dass sowohl Phase als auch T vor allem durch die spezifische Innere Oberfläche beeinflusst werden, wogegen der spezifische Widerstand vor allem von der Sättigung abhängt. Diese Vermutung wird dadurch bestätigt, dass alle Abklingzeiten proportional zum Wassergehalt sind. Da Wasser aufgrund der Kapillarkräfte zunächst in die kleinsten Poren eindringt, können große Abklingzeiten oberhalb eines gewissen Sättigungsschwellenwertes auftreten, ab dem die großen Poren gefüllt sind. Die humosen Proben aus Buch sind offenbar gequollen, so dass auch bei geringer Sättigung Wasser in großen Poren vorhanden ist.

Sowohl große Phasenamplituden als auch geringe Abklingzeiten korrelieren mit kleinen Poren oder tonigem Material. Geringe Phasenamplituden und lange Abklingzeiten korrelieren auf der anderen Seite mit großen Poren und mobilem Porenfluid. Die Phasen und Abklingzeiten korrelieren gut, sogar unabhängig vom Wassergehalt.

Humus- oder tonhaltige Böden (große KAK, hohe Phasenamplituden) zeichnen sich durch Abklingzeiten von unter 20 ms (Tiergarten) bzw. unter 10 ms (Buch) aus. Schichten, die reinen Sand enthalten (kleine KAK, geringe Phasenwerte) haben durchweg Abklingzeiten von über 10 ms (20 ms in Buch). Die cutoff-Zeit, die sich daraus ableiten lässt, entspricht in etwa der cutoff-Zeit von 33 ms, die bei der Erdölexploration zur Unterscheidung von mobilem/immobilem Öl/Wasser genutzt wird. Offensichtlich kann eine solche cutoff-Zeit z.B. zur sicheren Unterscheidung von humosen und sandigen Bereichen in Böden genutzt werden.

4 Schlußfolgerungen

4.1 Vor- und Nachteile der Verfahren

In diesem Kapitel werden die Vor– und Nachteile der unterschiedlichen geophysikalischen Methoden bei ihrer Anwendung in der Landwirtschaft verglichen. Grundlagen der Bewertung sind die in Kap. 3 gezeigten Beispiele und die im Anhang genannte Literatur.

Aus den vorgestellten Arbeiten lassen sich die folgenden Empfehlungen für die zukünftige Anwendung geophysikalischer Messungen im Rahmen von landwirtschaftlichen Anwendungen ableiten:

1. Die Parameter, über die mit **GPR** Aussagen gemacht werden können, sind die Bodenstruktur/Schichtabfolgen, Bodenart/Tiefgründigkeit/Horizontierung, Wassergehalt/Bodenfeuchte, der Grundwasserflurabstand und der Übergang von ungesättigter zu gesättigter Zone. Die derzeit erhältlichen Apparaturen sind technisch ausgereift und auch zur flächenhaften Erkundung einsetzbar. Speziell in Kombination mit Differenziellem GPS (DGPS) ist eine präzise örtliche Zuordnung der Messergebnisse leicht möglich. Bei Nutzung spezieller, auf die Nutzung in der Landwirtschaft optimierter Geräte (Fahrzeugmontage), könnten bis zu einigen zehn Hektar am Tag abgedeckt werden. Georadar kann ggf. als Ergänzung zu DC benutzt werden, i.W. ist der Einsatz auf Böden mit tonarmer Deckschicht sinnvoll.

2. **TDR** kann im wesentlichen zur Ableitung der Bodenfeuchte genutzt werden, ist aber invasiv und nicht für die großräumige Erkundung geeignet. Der Hauptnutzen liegt auf der Kalibration der Bodenfeuchte.

3. Die Parameter, über die mit **DC-Geoelektrik** Aussagen gemacht werden können sind sehr vielfältig: Bodenstruktur/Schichtabfolgen/Lithologie, Bodenart/Tiefgründigkeit/Horizontierung, Auffüllungen/verfüllte Gräben, Wassergehalt/Bodenfeuchte, Grundwasserflurabstand, Übergang von ungesättigter zu gesättigter Zone, Porenvolumen und hydraulische Leitfähigkeit. Die derzeit erhältlichen Apparaturen für den stationären Einsatz sind technisch ausgereift und auch zur flächenhaften Erkundung einsetzbar. Insbesondere die Multielektroden/Multikanalapparaturen ermöglichen einen hohen Messfortschritt und damit geringen Zeitaufwand/Kosten bei gleichzeitig hoher räumlicher Auflösung. Mittlerweile gibt es aber auch einige Systeme für den mobilen Einsatz.

4. Wie bei der Geoelektrik wird bei der **Elektromagnetik** die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit im Boden bestimmt, daher sind auch die Parameter, über die mit Elektromagnetik Aussagen gemacht werden können, nahezu die gleichen. Für die flächenhafte Erkundung sind elektromagnetische Verfahren von ihrer Funktionsweise her optimal geeignet, um aber eine quantitav hochwertigere Auswertung zu ermöglichen, müssen die Hersteller versuchen, die Drift der Geräte in den Griff zu bekommen.

5. Alle Parameter, über die mit **SNMR** Aussagen gemacht werden können sind wasserbezogen: Bodenstruktur/Schichtabfolgen, Übergang gesättigte/ungesättigte Zone, Wassergehalt und Wasserbindung. Aufgrund der derzeitigen Messgeschwindigkeit kann das Verfahren aber nur punktweise/exemplarisch eingesetzt werden.

6. **Gamma-Spektrometrie** kann neben gut abzugrenzenden Strukturen auch Hinweise auf die zu erwartende Bodenart liefern und Kartierarbeiten unterstützen. Die Messgeschwindigkeit ist derzeit für einen Standardeinsatz noch zu gering, könnte aber ohne nennenswerte Auflösungsverluste durch Einsatz anderer Detektoren mit NaJ-Kristallen mit mehreren Liter Volumen deutlich erhöht werden. Es sind dann auch kontinuierliche Messungen möglich.

7. Mit **IP/SIP** können Aussagen über die gleichen Parameter wie bei der Elektromagnetik und Geoelektrik gemacht werden, da der elektrische Widerstand mitgemessen wird. Die Parameter, über die zusätzlich mit IP/SIP Aussagen gemacht werden können, sind Bodenart, Wasserspeichervermögen, pf-Beziehung/Wasserrückhaltevermögen und hydraulische Leitfähigkeit. Ein Zusatznutzen durch IP ist nicht immer erhältlich, wegen Schwierigkeiten bei der Ankopplung. Die Zeitersparnis von Geoelektrik-Messungen ohne IP beträgt 30 – 50 %. Lohnenswert ist die Anwendung des IP-Verfahrens also nur bei notwendiger Ton/Humus-Differenzierung.

8. Die Parameter, über die mit **seismischen Wellen** Aussagen gemacht werden können, sind die Bodenstruktur/Schichtabfolgen, Verdichtung, Änderung der Lagerungsdichte, Detektion von Findlingen und die Erkundung von Störungen. Die derzeit existierenden Apparaturen sind im wesentlichen für einen stationären Einsatz konzipiert, mobile, bzw. automatisierte Systeme sind in der Seismik derzeit nicht bekannt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der o.g. Schlussfolgerungen: Vor- und Nachteile bei der Anwendung unterschiedlicher geophysikalischer Techniken in der Landwirtschaft bezogen auf interessierende Parameter: ++: sehr gut, +: gut, o: durchschnittlich, -: schlecht oder gar nicht. Die Bewertung in Klammern bezieht sich auf das Potenzial der Methoden bei technischer Weiterentwicklung für die flächenhafte Anwendung.

Methode / Parameter	GPR	TDR	DC	EM	SNMR	γ	IP	Seismik
Bodenart	o	o	+	+	(+)	++	(+)	(+)
Horizontierung	+	–	++	o	(+)	–	(+)	(+)
Feuchte	++	++	+	+	++	–	(+)	o
Wasserspeichervermögen	(+)	(+)	+	+	(++)	+	(++)	o
Org. Bodensubstanz	–	–	+	+	(+)	++	(++)	o
Grundwasser	o	–	++	+	(++)	–	(+)	o
Verdichtung	+	–	o	o	(+)	o	(+)	++

4.2 Perspektiven für den Einsatz der Geophysik in Landwirtschaft und Bodenkunde

Um geophysikalische Verfahren in der Bodenkunde oder Landwirtschaft erfolgreich zu etablieren, muß es möglich sein, aus den gemessenen (geo)physikalischen Parametern die gewünschten bodenkundlichen Parameter, bei hoher Flächenleistung und hoher Präzision, ableiten zu können. Bis vor kurzem wurden dazu im wesentlichen Elektromagnetik, in den letzten Jahren aber auch Geoelektrik und Georadar eingesetzt (s.a. ALLRED ET AL. 2008).

Das Georadar hat leider wesentliche Nachteile in Bezug auf die Eindringtiefe, besonders auf elektrisch leitfähigen Böden (siehe auch Kap. 4.1). Auf der anderen Seite ist der Zusammenhang von elektrischer Leitfähigkeit und Wassergehalt nicht eindeutig und deshalb fehlerbehaftet. Insbesondere in Böden mit kleinskaligen Variationen des Gehaltes an Sand, Ton oder organischer Substanz (Humus) können die klassischen Modelle wie Archie (ARCHIE, 1942) oder Topp (TOPP ET AL., 1980) keine befriedigende Interpretation von EM oder Geoelektrik liefern.

Leider sind derzeit die Verfahren, die einen besonderen Beitrag liefern könnten, nicht flächenhaft einsetzbar (SNMR, Seismik, IP). Ideal wäre deshalb eine Kombination von modernen Verfahren wie IP und (S)NMR mit den bewährten klassischen wie EM, DC oder GPR. So könnte bereits beim derzeitigen Stand der Technik der Vorteil des hohen Messfortschrittes mit dem Vorteil präziserer bodenkundlicher Aussagen verbunden werden.

Von den drei Methoden SNMR, Seismik und IP haben derzeit am ehesten IP und Seismik eine Aussicht auf eine flächenhafte Anwendung. Die IP-Methode, da sie ähnlich wie die Geoelektrik funktioniert und die Umrüstung existierender Geoelektrik-Sensorik auf IP prinzipiell möglich ist. Eine Entwicklung in diese Richtung läuft z.B. an der Universität Potsdam (Frau Dr. Erika Lück, Institut für Geowissenschaften). Die Seismik, da es in der Vergangenheit bereits einmal Versuche zur Nutzung hochfrequenter Luftschallseismik in automatischen Systemen gab (Institut für Geophysik, Universität Münster). Bei SNMR ist der flächenhafte Einsatz sicherlich am schwierigsten zu realisieren, allerdings gab es in den 1980er-Jahren in den USA einen Versuch NMR (mit mobilem Magneten) zur Feuchtebestimmung im landwirtschaftlichen Einsatz zu automatisieren (TOLLNER UND ROLLWITZ, 1987). Die Technik wurde aber nicht weiterentwickelt.

Erst mit der Verfügbarkeit solcher automatischen Systeme, bzw. von Apparaturen, die für den flächenhaften Einsatz geeignet sind, werden die Kosten der Verfahren für den Standardeinsatz tragbar sein. Eine weitere Möglichkeit den Messfortschritt zu erhöhen (und die Kosten der Erkundung pro Fläche), besteht in der Nutzung von Aerogeophysik (z.B. Hubschrauber) oder Fernerkundung (Satelliten). So könnte man z.B. Hubschraubermessungen mit Bodenmessungen kalibrieren und damit effizient und präzise flächenhaft zur Verwendung in der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung kartieren.

Die bereits flächenhaft einsetzbaren und weitgehend praxisreifen geophysikalischen Verfahren (Kap. 4.1) sind in der Lage, wesentliche bewirtschaftungsrelevante Bodenparameter zu liefern. Der derzeit in der Praxis verbreitete Einsatz der EM38-Kartierung hat den Nachteil, dass neben der relativ unspezifischen Aussage der Messergebnisse eine vertikale Integration der Messergebnisse zu Unschärfen bei der Bewertung der Ergebnisse führt. Die in diesem Handbuch geschilderten geophysikalischen Verfahren und deren kombinierte Anwendung bieten die Möglichkeit horizont- oder tiefenbezogene Aussagen zu treffen und so die EM38-Messungen zu ergänzen. An erster Stelle steht hierbei der Parameter Wassergehalt, der nach geeigneter Kalibrierung Rückschlüsse auf Bodenart und Ton- bzw. Sandgehalt sowie deren vertikale Ausprägung (Grundwasserflurabstand, Übergang zur gesättigten Zone, Tiefgründigkeit) zulässt. Messungen bei Wassersättigung ergeben Informationen zum Wasserspeichervermögen. Darüber hinaus erscheinen Aussagen zum Vorhandensein von Stauhorizonten und Strukturschäden (Pflugsohlenverdichtungen) möglich.

Diese Parameter bilden bei geeigneter Interpretation die Grundlage für viele landwirtschaftliche Entscheidungen (Bodenbearbeitungstiefe, Lockerungsbedürftigkeit, Aussaatstärke, Ertragserwartung, Düngeregime etc.). Aber auch für Fragen des Landschaftswasserhaushaltes und dessen kleinräumige Prognose bieten die Parameter bei flächenhafter Erfassung eine Datengrundlage, die die derzeit aus Kartenmaterial zu generierenden Informationen in ihrer Güte weit übersteigt.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass bereits jetzt viele Messverfahren verfügbar sind, die insbesondere bei kombinierter Anwendung zu guten flächenhaften Aussagen über zentrale Bodenparameter führen und das etablierte EM38-Verfahren sinnvoll ergänzen können. Gleichzeitig wird aber auch das Entwicklungspotenzial der geophysikalischen Verfahren deutlich, besonders im Hinblick auf die Überführung bislang nur für den stationären Einsatz geeigneter Verfahren in Richtung mobiler, automatisierter Systeme.

4.3 Hinweise zur Ausschreibung und Beauftragung geophysikalischer Leistungen

Aus den vorgestellten Arbeiten lassen sich die folgenden Empfehlungen für die zukünftige Anwendung, Ausschreibung und Beauftragung geophysikalischer Messungen im Rahmen von landwirtschaftlichen Anwendungen ableiten (Qualitätsmanagement):

1. Da es keine DIN für geophysikalische Messungen gibt, ist es wichtig, in den Ausschreibungen bzw. im Auftrag die geforderten Kriterien genau zu spezifizieren. Die Auslagenart, Anzahl der Level oder gar die Auswahl der Methoden sollten nicht den Auftragnehmern überlassen werden. Dazu gehört im allgemeinen aber ein vertieftes Verständnis der Geophysik.

2. Falls hausintern keine derartige Expertise vorhanden ist, sollte bei Bedarf eng mit unabhängigen Beratern (Geologische Landesämter, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe oder Hochschulen) zusammengearbeitet werden.

3. Die Ergebnisse der Messungen sollten in Teilen durch unabhängige Gutachter bewertet werden, dazu muss dann z.B. auch die Art der benutzten Inversion bei der Geoelektrik mit angegeben werden.

Danksagung: Wir danken insbesondere Herrn Dr. Gerhard Kurz, dem Bearbeiter des Projektes „Ermittlung des Wasserretentionsvermögens von Ackerflächen mit Hilfe der Kombination geophysikalischer Methoden“aus dem der überwiegende Teil der gezeigten Daten stammt und den im Projekt beteiligten studentischen Hilfskräften: Gunther Baumann, Xiaoming Chen, Veit Gebhardt, Andrea Herzog, Thomas Hiller, Bernd Kröger, Jürgen Lehmann-Horn, Christoph Müller, Katja Prokoph, Anja Scholz, Sebastian Siebrands, Stephan Strehl und Thomas Voß.

Abkürzungsverzeichnis

BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BÜK	Bodenübersichtskarte
DC-Geoelektrik	Gleichstromgeoelektrik
(D)GPS	(Differentielles) Geographisches Positionierungs System
DK	Dielektrizitätskoeffizient
EM	Elektromagnetik
EMR	Elektromagnetisches Reflexionsverfahren (=GPR)
GPR	Georadar (ground penetrating radar)
i.d.R.	in der Regel
IP	induzierte Polarisation
KA5	bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage
KAK	Kationenaustauschkapazität
LfL	Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
pF-Funktion	Wassergehalts-Saugspannungs-Funktion
s.a.	siehe auch
s.g.	so genannt
s.o.	siehe oben
SIP	Spektral induzierte Polarisation
(S)NMR	(Oberflächen) Kernspinresonanz = (surface) nuclear magnetic resonance)
TDR	Time Domain Reflektometrie
TUB	Technische Universität Berlin
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil
z.Zt.	zur Zeit

Literaturverzeichnis

AG BODEN (2005): Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Hannover

ABRAGAM, A. (1983): Principles of Nuclear Magnetism, Oxford University Press, Oxford, GB

ALLRED, B.J., DANIELS, J.J. AND EHSANI, M.R. (2008): Handbook of Agricultural Geophysics, CRC, Oxford, GB

ARCHIE, G.E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Transactions of the The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Vol. 146, 54–62

BLOCH, F., HANSEN, W.W. AND PACKARD M.E. (1946): The nuclear induction experiment. Physical Review 70, 474-485

BOESS, J., BENNE, I., DOMSCH, H., LÖSEL, G., RÖTTGER, B., SAUER, J., SCHURICHT, R., ZIEKUR, R. (2002): Beitrag geophysikalischer Methoden zur Erstellung hochauflösender Bodenkarten für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung, Die Hofbodenkartierung des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung; ein Erfahrungsbericht. Arbeitshefte Boden, Hannover

DURLESSER, H.P. (1999): TUM-Weihenstephan Erfassung bodenphysikalischer Parameter in Raum und Zeit mit elektro-magnetischen Induktionsverfahren, Shaker Verlag, Aachen (Reihe Geowissenschaft), ISBN: 3-8265-6180-5

GREAVES, R.J., LESMES, D.P., LEE, J.M. AND TOKSOZ, M.N. (1996): Velocity variations and water content estimated from multi-offset, ground penetrating radar. Geophysics 61, 683-695

HARTGE, K.H., HORN, R. (1989): Die physikalische Untersuchung von Böden. 2. Auflage, Enke-Verlag, Stuttgart

HERTRICH, M., BRAUN, M., YARAMANCI, U. (2005): Magnetic Resonance soundings with separated transmitter and receiver loops Near Surface Geophysics, 3(3), 141-154

IMKO (2005): Trime-FM Handbuch, Ettlingen

KA 5 (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage, Ad hoc AG Boden, Hannover

KENYON, W.E. (1992): Nuclear Magnetic Resonance as a petrophysical measurement tool, Nuclear Geophysics, Vol. 6, No. 2, 153–171

KENYON, W.E. (1997): Petrophysical principles of applications of NMR logging, The Log Analyst, Vol. 38, No. 2, 21–43

KLITZSCH, N. (2004): Ableitung von Gesteinseigenschaften aus Messungen der spektral induzierten Polarisation (SIP) an Sedimentgesteinen, Dissertation, Universität Leipzig, Leipzig

KNÖDEL,K., KRUMMEL,H., LANGE, G. (2005): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Teil 3, Springer Verlag, New York, Berlin, Heidelberg

KURZ, G., MÜLLER, M., YARAMANCI, U. (2004): Assessment of Water Retention of Agricultural Soils - Flood Prevention with Geophysics, paper P050, *in* Proceedings of Near Surface Geophysics, European Association of Geoscientists and Engineers, Amsterdam

LEGCHENKO, A.V., SHUSHAKOV O.A. (1998): Inversion of surface NMR data, Geophysics 63, 75-84

LEGCHENKO, A.V., BEAUCE, A. (1998): A new integrated geophysical approach for the rational management and exploration of groundwater resource, 2nd Annual Report, European Commission of Communites, European Project INKO-DC-No.CT960122

LEGCHENKO, A.V., BALTASSAT, J.M., BEAUCE, A., BERNARD, J. (2002): Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists, Journal of Applied Geophysics, Vol. 50, No. 1–2, 21–46

LEGCHENKO A., VALLA P.A. (2002): Review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements, No. 17, 3-19

LOKE, M.H., BARKER, R.D. (1996): Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method, Geophysical Prospecting, 44, 131-152

LOREN, J.D. (1972): Permeability estimates from NML measurements. Journal of Petroleum Technology 25, 923-928

LÜCK, E., EISENREICH, M., DOMSCH, H. (2002): Innovative Kartiermethoden für die teilflächenspezifische Landwirtschaft, Selbstverlag der Arbeitsgruppe Stoffdynamik in Geosystemen, Hrsgb. O. Blumenstein, H. Schachtzabel, Band 7, Potsdam

MUNZERT, M., FRAHM, J. (2006): Die Landwirtschaft - Pflanzliche Erzeugung. 12. Auflage, BLV-Verlag, München

MÜLLER, M., KRÜGER, U., YARAMANCI, U. (2002): Nuclear magnetic resonance (NMR) properties of unconsolidated rocks and synthetic samples, *in* Proceedings of the 8th Meeting of Environmental and Engineering Geophysics: Environmental and Engineering Geophysics – European Section, 339–343, Amsterdam

MÜLLER, M., MOHNKE, O., SCHMALHOLZ, J., YARAMANCI, U. (2003): Moisture assessment with small-scale geophysics - The Interurban Project: Near Surface Geophysics, Vol. 1, No. 4, 173–182

MÜLLER, M., YARAMANCI, U. (2004): Interpretation Enhancement by Combining SIP and NMR, EAGE Near Surface 2004, Utrecht

MÜLLER, M., KOOMAN, S., YARAMANCI, U. (2005): Nuclear Magnetic Resonance (NMR) properties of unconsolidated sediments in field and laboratory, Near Surface Geophysics, Vol. 3, No. 4, 275–286

MÜLLER, M., YARAMANCI, U. (2005): Surface nuclear magnetic resonance - applications in hydrogeophysics and future developments, Magnetic Resonance Imaging, 23, No. 2, 417

MC NEILL, J.D. (1980): Electrical conductivity of Soils and Rocks, Geonics, Ontario,

NOBORIO, K. (2001): Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 31, 213-237

PETERSEN, H., FLEIGE, H., RABBEL, W., HORN, R. (2005): Anwendbarkeit geophysikalischer Prospektionsmethoden zur Bestimmung von Bodenverdichtungen und Substratheterogenitäten landwirtschaftlich genutzter Flächen, Journal of Plant Nutrition and Soil Science, Vol. 168, No. 1, 68-79

PURCELL, E.M., TORREY, H.C., POUND, R.V. (1946): Resonance absorption by nuclear magnetic moment in a solid, Physical Review 69, 37-38

ROBINSON D.A., JONES, S.B., WRAITH, J.M., OR, D., FRIEDMAN, S.P. (2003): A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurements in soils using time domain reflectometry, Vadose Zone Journal, 2, 444-475

ROWELL, D.L. (1997): Bodenkunde: Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin

SAUER, J. (2002): Gammaspektrometrische Messungen an der Erdoberfläche - ein Beitrag zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung, Zeitschrift f. Angewandte Geologie, 5, 16-19

SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde, 13. Auflage, Enke-Verlag, Stuttgart

SCHMALHOLZ, J., STOFFREGEN, H., KEMNA, A., YARAMANCI, U. (2004): Imaging of water content distribution inside a lysimimeter using GPR tomography, Vadose Zone Journal, 3, 1106-1115

SEEVERS, D.O. (1966): A nuclear magnetic method for determining the permeability of sandstones, Transactions SPWLA, Paper L, Houston

SCHÖN, H. (1996): Physical Properties of Rocks, Pergamon, Amsterdam

SHIROV, M., LEGCHENKO, A., CREER, G. (1991): A new direct non-invasive groundwater detection technology for Australia: Exploration Geophysics, Vol. 22, 333–338

SOMMER, C., VOSSHENRICH, H. (2002): Bodenbearbeitung. Werner, A., Jarfe, A. [Hrsg.]: Precision Agriculture. Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. KTBL-Sonderveröffentlichung 038. Darmstadt. 237-250. http://www.preagro.de

STACHEDER, M. (1996): Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik. Messung von Wassergehalt, elektrischer Leitfähigkeit und Stofftransport, Schriftenreihe angewandte Geologie, 40, Karlsruhe

TELFORD W.M., GELDART L.P., SHERIFF R.E. (1990): Applied Geophysics, 2. Auflage, Cambridge University Press, GB

TIMUR, A. (1968): An investigation of permeability, porosity and residual water saturation relationships, Transactions SPWLA, Paper K

TIMUR, A. (1969): Pulsed magnetic resonance studies of porosity, movable fluid and permeability of sandstones, Journal of Petroleum Technology, 21, 775-786

TOLLNER, E.W., ROLLWITZ, W.L. (1987): Nuclear magnetic resonance for moisture analysis., ASAE Technical Paper No. 87-1008; American Society of Agricultural Engineers; St. Joseph MI; 24 pages

TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. (1980): Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines, Water Resouces Research, Vol. 16, No. 3, 574–582

WHALLEY W.R. (1993): Considerations on the use of time domain reflectometry (TDR) for measuring soil water, Journal of Soil Science, 44, 1-9

WILSON, L.G., EVERETT, G.L., CULLEN, S.J. (1996): Vadose zone Characterisation and Monitoring, Lewis Publishers, London

YARAMANCI, U., LANGE, G., KNÖDEL, K. (1999): Surface NMR within a geophysical study of an aquifer at Haldensleben (Germany), Geophysical Prospecting, Vol. 47, 923–943

YARAMANCI, U., LANGE, G., HERTRICH, M. (2002): Aquifer characterisation using Surface NMR jointly with other geophysical techniques at the Nauen/Berlin test site, Journal of Applied Geophysics, Special Issue on „Surface-NMR”, 50, 47-65

Impressum

Herausgeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Internet: http://www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren: Technische Universität Berlin
Institut für angewandte Geowissenschaften
Dr. Martin Müller, Prof. Dr. Ugur Yaramanci
Ernst-Reuter-Platz 1
10587 Berlin
Telefon: 030/314-72527
Telefax: 030/314-72627
E-Mail: mamue@geophysik.tu-berlin.de

Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und landwirtschaft
Geschäftsbereich Labore Landwirtschaft
Dr. Olaf Nitzsche
Gustav-Kühn-Str. 8
04159 Leipzig
Telefon: 0341/9174 200
Telefax: 0341/9174 211
E-Mail: olaf.nitzsche@smul.sachsen.de

Redaktion: siehe Autoren
Endredaktion: Öffentlichkeitsarbeit
Präsidialabteilung

ISSN: 1867-2868
Redaktionsschluss: September 2008

Für alle angegebenen E-Mail-Adressen gilt:
Kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische Dokumente

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.