

Der Boden als Wasserspeicher

Nuklear Magnetische Resonanz zur Bodenfeuchtebestimmung

Aktuell ausgelöst durch die ausgedehnten Trockenphasen der vergangenen Jahre gewinnen die in Böden gespeicherten Wasservorräte und deren Verfügbarkeit im Jahresverlauf erhöhte Aufmerksamkeit.

Wissenschaftler vom Institut für Geologie, vom Institut für Bodenkunde, dem Leibniz Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) sowie von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) forschen mittels innovativer Feldmethoden aus dem Bereich störungsfrei arbeitender geophysikalischer Messverfahren an der Bodenfeuchtebestimmung.



Böden bilden den verwitterten oberflächennahen Bestandteil der Lithosphäre und erfüllen vielfältige Funktionen und Leistungen. So sind sie Orte der Nahrungsmittelproduktion, fungieren als Kohlenstoffsenke, zeichnen sich durch höchste Biodiversität aus, dienen als Verkehrs- und Gebäudeflächen, sind Lagerstätten für Rohstoffe und bieten ein wichtiges Archiv für die Natur- und Kulturgeschichte. Insbesondere können sie als

ein zentrales Speicher- und Transferelement im Wasserkreislauf betrachtet werden. In feucht-gemäßigten Klimaten wie in Mitteleuropa wird zum Beispiel im Durchschnitt $2/3$ des Jahresniederschlags in Böden gespeichert und bildet somit den Wasservorrat für Pflanzen, etwa $1/3$ des Jahresniederschlags trägt zur Ergänzung des Grundwasservorrates bei. Üblicherweise erfolgen Schätzungen zum Wasserspeichervermögen von Böden

hauptsächlich aus Ansprüchen der Partikelgrößen (Bodenart) sowie aus Tiefenangaben zur Durchwurzelbarkeit der Böden. Der Boden wird dabei als ein Kontinuum betrachtet und es wird eine gleichmäßige Verteilung des Bodenwassers unterstellt. Messungen zum Bodenfeuchtezustand werden üblicherweise mittels Tensiometer und Feuchtesensoren (sog. TDR oder Time Domain Reflectometry Sonden) durchgeführt,

die allerdings nur punktweise die heterogene kleine Bodenvolumina erfassen und beim Einbau den natürlichen Bodenaufbau verändern können.

Zunehmend wird die Sorge geäußert, dass systematische Veränderungen im Witterungsverlauf wie ausgeprägte frühsummerliche Trockenphasen zu signifikanten Ertragseinbußen in Land- und Forstwirtschaft führen kön-

Nadelstreu fördern. Kenntnisse über die heterogene Feuchteverteilung im Jahresverlauf sind für die Modellbildung bodenhydraulischer Simulationsmodelle wichtig. Nach jetzigem Stand sind die notwendigen Feuchtedaten aber nur sehr unvollständig mittels fest installierter Feuchtesensoren zu erfassen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit für die Entwicklung und den Einsatz innovativer Feldmetho-

bis zur Erstellung von Bildern des menschlichen Körpers in der Magnetresonanztomographie (MRT) eingesetzt. NMR nutzt die magnetischen Eigenschaften der Kerne von Wasserstoffatomen.

In der Geophysik wird NMR im Bereich der Laboranalytik zur Untersuchung von Gesteins- und Bodenproben genutzt und Messungen in Bohrlöchern durchgeführt. Aber

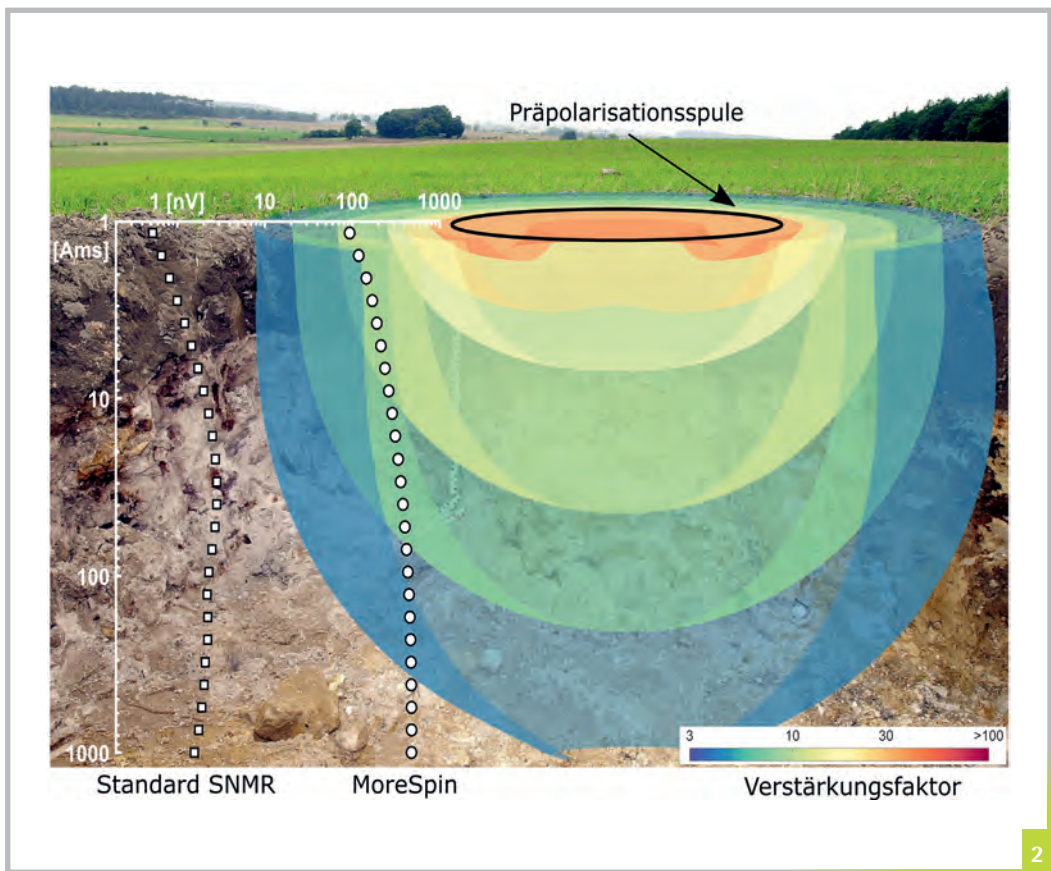


Abbildung 1
Feuchtemuster nach einem Beregnungsversuch mit einem Farbstoff (Lebensmittelfarbstoff "Brilliant Blue") in einem 100-jährigen Buchenbestand (Grinderwald bei Linsburg). Beregnungsrate 22 mm/h, Beregnungsmenge 200 mm. Deutlich ist nach Aufgrabung die ungleichmäßige Verteilung der Feuchtemuster anhand der heterogenen Blaufärbung als Folge ungleichmäßiger Infiltration in den Boden erkennbar. Die Bildung entsprechender präferenzierter Fließwege fördert den schnellen Wassertransport in das Grundwasser und reduziert damit den gespeicherten Wasservorrat.
Foto: Jörg Bachmann

Abbildung 2
Tiefenabhängige Signalverstärkung durch erhöhte Magnetisierung und resultierendes Gesamtsignal im Vergleich zur konventionellen NMR ohne Präpolarisation.
Quelle: eigene Darstellung

nen. Dies gilt insbesondere für Waldstandorte, wo die Bodenfeuchte oft ein räumlich und zeitlich sehr heterogenes Muster aufweist, was die Schätzung der tatsächlich gespeicherten Wassermengen erschwert (Abb. 1). So gibt es Hinweise, dass bestimmte Baumarten (insbesondere Nadelbäume) die Tendenz zu heterogener Feuchteverteilung durch Produktion wasserabweisender organischer Substanz wie zum Beispiel

den aus dem Bereich zerstörungsfrei arbeitender geophysikalischer Messverfahren. Eine aktuelle technische Entwicklung auf diesem Gebiet wird im Folgenden vorgestellt.

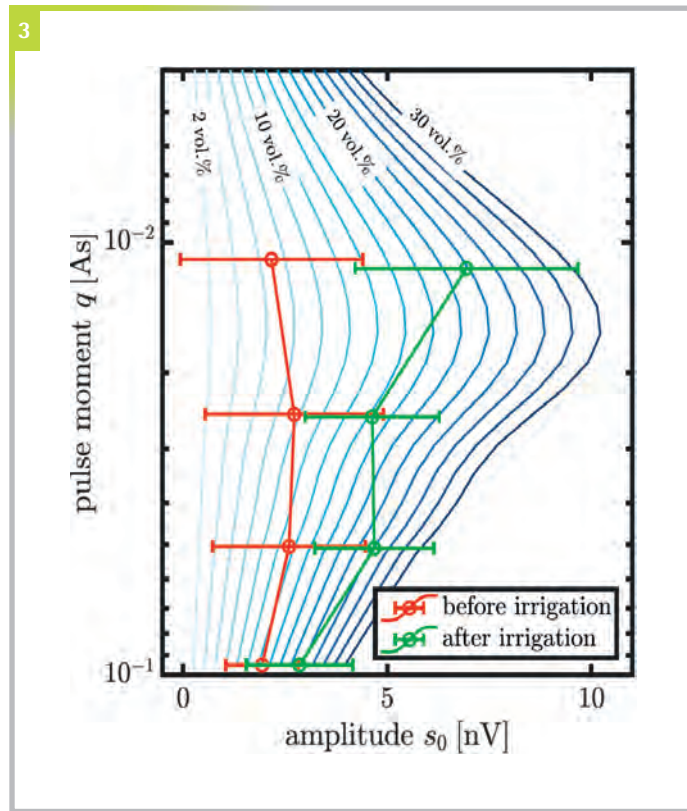
Nuklear Magnetische Resonanz

Die Nuklear Magnetische Resonanz (NMR) oder auch Kernspinresonanz wird von der Bestimmung der Strukturen organischer Verbindungen

auch von der Bodenoberfläche aus wird NMR eingesetzt, um im Gelände störungsfrei unterirdische Wasservorkommen aufzuspüren. Bei der NMR-Methode von der Oberfläche werden große Kabelschleifen auf der Bodenoberfläche verlegt, welche als Spulen agieren; ein elektrischer Strompuls erzeugt dann ein externes Magnetfeld. Dieses Magnetfeld bewirkt, dass die Protonenspins der Wasserstoffkerne im Grundwasser

Abbildung 3
 MoreSpin Daten vor (trocken – rote Kurve) und nach (feucht – grüne Kurve) einem Feldberegnungsversuch. Zum Vergleich sind theoretische Messkurven für homogene Bodenfeuchteverteilungen dargestellt. Die auf der Y-Achse aufgetragenen Pulsmomente repräsentieren die ungefähren Tiefenreichweiten der Methode. Kleine Pulsmomente (0.01 As) sind besonders sensitiv in geringen Tiefen (Tiefe der TDR Sonden, bis ca. 20 cm), wohingegen zunehmende Pulsmomente größere Tiefen (hier bis ca. 50 cm) erreichen. Auf Basis erhöhter Messpunktdichte können zukünftig detaillierte tiefen aufgelöste Feuchteverteilungen berechnet werden.

Quelle: Hiller et al. 2021



„angeregt“ werden, wenn sie sich an dem Feld ausrichten. Nach Abschalten des Feldes relaxieren die Wasserstoffkerne, sie kehren in ihren Gleichgewichtszustand zurück, wobei sie sich in Richtung des schwachen Magnetfeldes der Erde ausrichten. Während dieser Relaxation erzeugen die Wasserstoffkerne ihrerseits elektromagnetische Felder, die von der NMR-Apparatur registriert werden. Die Intensität dieser Felder und damit die Signalstärke korreliert li-

near mit der Anzahl der Wasserstoffkerne im angeregten Untergrundvolumen, so dass sich mit dieser Technik die Wassermenge im Gestein oder Boden und weitere Informationen über den Porenraum abschätzen lassen und dreidimensionale Modelle der Wasserverteilung im Untergrund erstellt werden können.

Ein bisher signifikantes Problem der NMR-Messungen ist jedoch das Vorhandensein von elektromagnetischem „Rau-

schen“, das die Signale überlagert. Dieses Rauschen ist am stärksten, wenn NMR-Messungen beispielsweise in der Nähe von Stromleitungen oder Windturbinen durchgeführt werden. Insbesondere bei der Anwendung der NMR zur Analyse der Bodenfeuchtigkeit müssen kleine Spulen verwendet werden, um auch räumlich eine gute Abbildung der Wassergehaltsverteilung zu ermöglichen. Da mit kleinen Spulen auch das angeregte Volumen klein wird, ist insbesondere hier die Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses für Bodenfeuchtemessungen essenziell.

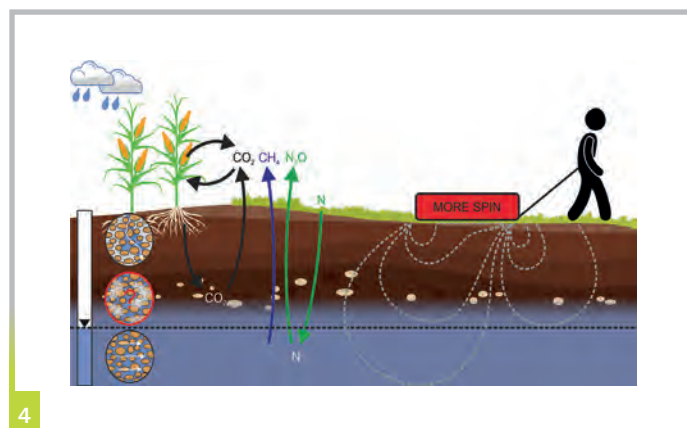
Präpolarisation zur Signalverstärkung – Das Projekt MoreSpin

Das DFG-geförderte Verbundprojekt „MoreSpin“ widmet sich der Entwicklung eines mobilen NMR-Sensors, um die Erhebung von Bodenfeuchtedaten störungsfrei bis in zwei Meter Tiefe zu ermöglichen. Der Projektverbund besteht aus dem Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), dem Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V. (Leibniz-IPHT) und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Die Lösung zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses wird dabei über den Ansatz einer Präpolarisation erreicht (de Pasquale & Mohnke, 2014). Diese erhöhte Magnetisierung führt zu stärkeren NMR-Signalen, die leichter von Rauschen unterschieden werden können (Abb. 2). Die Präpolarisationspulse werden durch kurze Gleichstrompulse durch eine zusätzliche Spule erzeugt.

Für die Auswertung wird eine eigens entwickelte Software genutzt, welche unter anderem die komplexen Prozesse der NMR Spin-Dynamik simuliert. Um diese Simulation

Abbildung 4
 Der mobile NMR Sensors MoreSpin zur zerstörungsfreien und räumlich hochaufgelösten Bestimmung von Bodenfeuchtedaten wird im Rahmen eines DFG-geförderten Verbundprojektes zwischen dem Leibniz Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), dem Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V. (Leibniz-IPHT) und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) entwickelt.

Quelle: eigene Darstellung



zu evaluieren, wurden in der ersten Phase des MoreSpin-Projektes Testmessungen an einem künstlichen und damit bekannten Wasserreservoir durchgeführt und die gewonnenen Daten mit den Simulationen verglichen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung von Messung und Simulation sowie eine signifikante Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses.

Erste Messungen der Bodenfeuchte

Nach erfolgreichen Testmessungen wurden erste Bodenfeuchtemessungen auf dem Testfeld des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik in der Nähe von Schillerslage realisiert und im Rahmen eines Beregnungsversuches durchgeführt, bei dem Messungen vor und nach einer Beregnung stattfanden (Hiller et al. 2021). Die Wassergehalte natürlicher Böden liegen zwischen wenigen bis etwa 45 Prozent. Daten aus den NMR-Messungen wurden mit Bodenfeuchtedaten durch TDR-Messungen ergänzt, um für den Tiefenbereich bis 20 Zentimeter Vergleichsdaten zu generieren. Die TDR-Daten zeigten vor der Beregnung eine durchschnittliche Bodenfeuchte von 2 bis 6 Prozent und nach der Beregnung von 16 bis 26 Prozent. Die Bandbreite repräsentiert dabei die erwartete Heterogenität der Wasserverteilung im Boden. Die NMR-Daten spiegeln die Zustände trocken bis feucht für entsprechende Tiefenbereiche grundsätzlich wider (Abb. 3), was aufgrund der geringen Signalstärke als Erfolg des Projektes zu werten ist. Trotz dieser Unsicherheiten erlauben die NMR-Messungen also bereits Aussagen über Tiefenbereiche unterhalb der TDR Referenzsonden. Es zeigt sich beispielsweise, dass die Beregnung nur geringe Änderungen der Bodenfeuchte in größeren Tiefen zur Folge hatte.



Prof. Dr. Mike Müller-Petke
Jahrgang 1979, ist seit 2018 Professor für Geoelektrik und Elektromagnetik am Institut für Geologie in gemeinsamer Berufung mit dem Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der Entwicklung von Methoden zur geophysikalischen Erkundung und Charakterisierung von Grundwassersystemen und Böden. Kontakt: mike.mueller-petke@leibniz-liag.de

Ausblick

Aufgabe für die nahe Zukunft ist eine weitere Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses und die Anwendbarkeit des neuen Sensors für flächenhafte Kartierungen (Abb. 4). Um diese Ziele zu erreichen, wurde einerseits die Fortsetzung des Projektes durch die DFG bewilligt, andererseits ist das FZ:GEO aktiv an der Ausarbeitung von Projekten zum Einsatz des Sensors in der Bodenforschung, aber auch in der Permafrostforschung beteiligt.

Literatur

- de Pasquale, G. & Mohnke, O. 2014. Numerical study of prepolarized surface nuclear magnetic resonance in the vadose zone. *Vadose Zone J.* 13(11), 1–9.
- Hiller, T., Costabel, S., Radić, T., Dlugosch, R., & Müller-Petke, M. 2021. Feasibility study on prepolarized surface nuclear magnetic resonance for soil moisture measurements. *Vadose Zone J.* 20(5), e20138.



Prof. Dr. (apl.) Jörg Bachmann
Jahrgang 1956, ist seit 2002 außerplanmäßiger Professor am Institut für Bodenkunde der LUH und leitet seit 2005 die Arbeitsgruppe Bodenphysik am Institut. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der Beschreibung physikalischer Transportprozesse in Böden und deren Beeinflussung durch Grenzflächeneffekte der organischen Bodensubstanz. Kontakt: bachmann@ifbk.uni-hannover.de

Dr. Stephan Costabel

Jahrgang 1977, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Geophysikalische Erkundung und Technische Mineralogie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Schwerpunkt seiner Arbeit ist die Weiterentwicklung geophysikalischer Messtechnik sowie der Transfer von Grundlagenwissen in die geowissenschaftliche Praxis. Kontakt: stephan.costabel@bgr.de

Dr. Thomas Hiller

Jahrgang 1980, ist seit 2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Aufbaustab zur Einrichtung des Forschungs- und Entwicklungszentrums Bergbaufolgen (FEZB) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Sein Arbeitsschwerpunkt ist hier das Umweltmonitoring mittels geophysikalischer Verfahren und deren methodische Weiterentwicklung. Kontakt: thomas.hiller@bgr.de



Prof. Dr. Georg Guggenberger
Jahrgang 1963, ist Geoökologe und seit 2008 Leiter der Arbeitsgruppe Bodenchemie am Institut für Bodenkunde der LUH. Seine Arbeitsschwerpunkte sind Stabilisierungsprozesse organischer Substanz, Permafrostböden sowie Pflanze-Mikroorganismen-Boden-Interaktionen. Kontakt: guggenberger@ifbk.uni-hannover.de



Dr. Marc-Oliver Göbel

Jahrgang 1972, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bodenkunde. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Grenzflächeneigenschaften von Bodenpartikeln und deren Bedeutung für die Wasserbewegung und -verteilung im Boden. Kontakt: goebel@ifbk.uni-hannover.de