

Monitoring der Bodenfeuchte mit Georadar und FDR

I. Löhken, R. Bergers, B. Tezkan

(Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln)

Zusammenfassung

In der Nähe von Köln wurden in Zusammenarbeit mit dem Geographischen Institut Untersuchungen zur Bodenfeuchte durchgeführt. Dabei wurde die Bodenfeuchte sowohl mit Georadar als auch mit in verschiedenen Tiefen vergrabenen FDR-Sonden und einer beweglichen FDR-Sonde an der Oberfläche gemessen. Außerdem wurden Bodenproben entnommen und ausgewertet und anschließend mit den FDR- und Georadardaten verglichen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung von den Ergebnissen der Bodenproben und den im Feld durchgeführten FDR-Messungen. Die Georadardaten erreichen die größte Übereinstimmung mit den Daten der in 10 cm Tiefe vergrabenen FDR-Sonden.

Einleitung

In Zusammenarbeit mit dem Geographischen Institut der Universität zu Köln wurden in der Nähe von Köln Untersuchungen zur Bodenfeuchte durchgeführt. Die Geographen interessieren sich dabei für die Fliessbewegung des Wassers im Untergrund zur Überprüfung eines hydrologischen Modells. Die Bodenfeuchte wurde über einen Zeitraum von ungefähr sechs Monaten sowohl mit Georadar als auch mit Frequency-Domain-Reflectometry (FDR) gemessen. Die Georadarmessungen fanden einmal wöchentlich statt, zusätzlich wurde die Bodenfeuchte mit einer beweglichen FDR-Sonde an der Oberfläche gemessen. Die Geographen führten an den gleichen Stationen kontinuierlich FDR-Messungen mit in drei verschiedenen Tiefen vergrabenen Sonden sowie kontinuierliche Niederschlagsmessungen durch.

Bestimmung der Bodenfeuchte

Bei der Bestimmung der Bodenfeuchte mit elektromagnetischen Verfahren macht man sich zu Nutze, dass die relative Dielektrizitätszahl ϵ_r des Bodens hauptsächlich vom Wassergehalt abhängt (für Wasser ist $\epsilon_r = 80$, für trockene Böden liegt ϵ_r zwischen 1 und 4). Das bedeutet, dass durch Messung von ϵ_r der Feuchtegehalt von Böden gut bestimmt werden kann. Zur Umrechnung der ϵ_r -Werte in Feuchtwerte gibt es empirische Formeln, wie z.B. die Formel von Topp (1980):

$$\Theta_v = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_r - 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_r^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon_r^3$$

Georadar

Bei den Georadar-Messungen wird ϵ_r aus der Geschwindigkeit der Bodenwelle bestimmt. Die Bodenwelle hat hierbei gegenüber den anderen beim Georadar auftretenden Wellen den Vorteil, dass ihr Laufweg durch den Sender-Empfänger-Abstand einfach abgeschätzt werden kann. Da die beim Georadar verwendeten Frequenzen (10 MHz bis 1 GHz) relativ hoch sind und die Leitfähigkeit der meisten Böden eher niedrig, kann der Dämpfungsterm der Telegraphengleichung vernachlässigt werden. Berücksichtigt man außerdem, dass für die meisten geologischen Materialien $\mu_r = 1$ gilt, so erhält man für die Wellengeschwindigkeit im Medium:

$$\nabla^2 \vec{F} - \underbrace{\mu\sigma \frac{\partial \vec{F}}{\partial t}}_{\text{Dämpfung}} - \underbrace{\mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{F}}{\partial t^2}}_{\text{Ausbreitung}} = 0 \quad v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

FDR (Frequency-Domain-Reflectometry)

Die Bestimmung des volumetrischen Feuchtegehaltes erfolgt bei den FDR-Sonden über eine Messung der Impedanz.

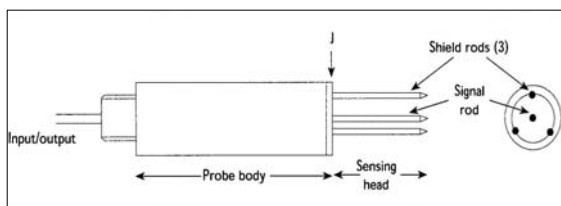


Abb. 1: Schematische Darstellung der FDR-Sonde

Die Spieße der Sonde verhalten sich dabei wie ein Koaxialkabel (siehe Abbildung 1). Werden die Spieße in den Boden gesteckt, verhält sich dieser wie ein Dielektrikum. Die von der Sonde gemessene Impedanz hängt dann von der Dielektrizitätszahl des Bodens zwischen den Spießern ab. Das Gerät rechnet die ϵ_r -Werte für mineralische Böden über folgende Formel in Feuchtewerte um (Gaskin und Miller, 1996):

$$\Theta_v = \frac{(\sqrt{\epsilon_r} - 1,6)}{8,4}$$

Das Messgebiet

Die Messungen fanden auf einer Weidefläche in Hausdorp, ca. 30 km südwestlich von Köln, statt. An drei Stationen, die sich an Oberhang (Station I), Mittelhang (Station II) und Unterhang (Station III) befinden, wurden von den Geographen FDR-Sonden in 10 cm, 30 cm und 90 cm Tiefe vergraben sowie Regensensoren zur kontinuierlichen Aufzeichnung aufgestellt. Eine Karte des Messgebietes zeigt Abbildung 2. Die Georadar-Messungen verliefen an jeder Station über ein Profil von 20 m Länge. Dabei wurde versucht, das Profil genau über die mitteltiefe Sonde (in 30 cm Tiefe) zu legen, da zuerst von einer Erkundungstiefe von ca. 30 cm ausgegangen wurde. Da die Profile in 3 m bis 10 m Entfernung von einem Stacheldrahtzaun lagen, wurde bei den Messungen ein Georadar-Gerät mit abgeschirmten Antennen verwendet.



Abb. 2: Das Messgebiet in Hasdorp

Erste Messungen

Die Georadar-Messungen wurden mit einer SIR 10 und zwei 400 MHz-Antennen der Firma GSSI durchgeführt. Gemessen wurde mit einem festen Antennenabstand von 80 cm. Der Messpunktabstand betrug 20 cm. Außerdem wurden auf jedem Profil noch zwei Messungen in der WARR-Anordnung von jeweils 5 m Länge durchgeführt, die zur eindeutigen Identifikation der Bodenwelle dienen sollen. Abbildung 3 zeigt ein Radargramm einer Profilmessung.

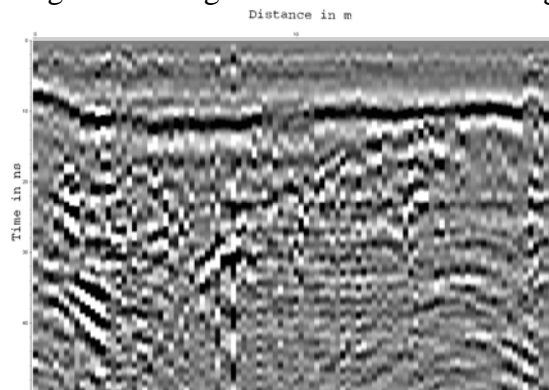


Abb. 3: Radargramm einer Profilmessung vom 21.06.2005

Man erkennt, dass die Laufzeit der Bodenwelle (um 10 ns) auf den ersten Metern kürzer ist als auf dem nachfolgenden Teil. Auf der Abbildung 4 sind die aus dem Radargramm in Abbildung 3 errechneten Feuchtewerte zu sehen. Auch hier erkennt man, analog zur höheren Bodenwellengeschwindigkeit im Radargramm, die niedrigeren Werte der Bodenfeuchte auf den ersten Profilm Metern.

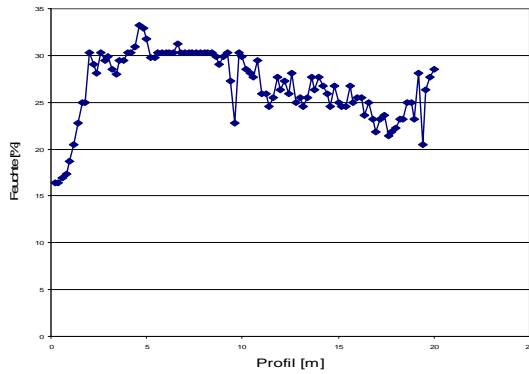


Abb. 4: Aus dem Radargramm errechnete Bodenfeuchte

Den Vergleich von Georadar- und FDR-Daten für das Profil III zeigt die Abbildung 5.

Um die Daten der FDR-Sonden und die Georadardaten besser vergleichen zu können, werden vorerst nur die ϵ_r -Werte verglichen. Die Übereinstimmung der Werte ist sehr gut. An jedem FDR-Messpunkt wurden vier bis fünf Einzelmessungen gemacht, da die Werte zum Teil sehr stark schwanken. Daher kommen auch die relativ großen Fehlerbalken.

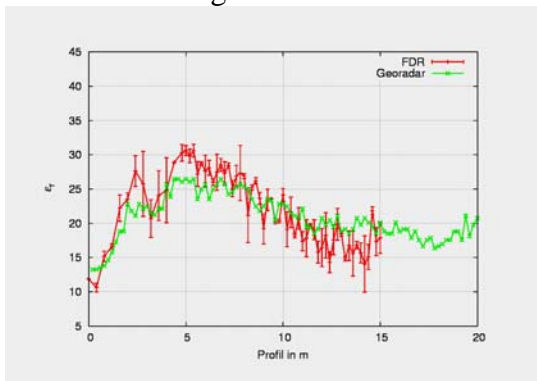


Abb. 5: Vergleich von Georadar- und FDR-Daten für ein Profil vom 21.06.2005

Abbildung 6 zeigt die Aufzeichnungen der Bodenfeuchte und der Niederschlagsmengen der Geographen. Man erkennt, dass die FDR-Sonde in 10 cm Tiefe die größten Variationen aufweist und am schnellsten auf Niederschlag bzw. Abtrocknen reagiert. Die 90 cm tiefe Sonde zeigt dagegen erwartungsgemäß die geringsten Variationen.

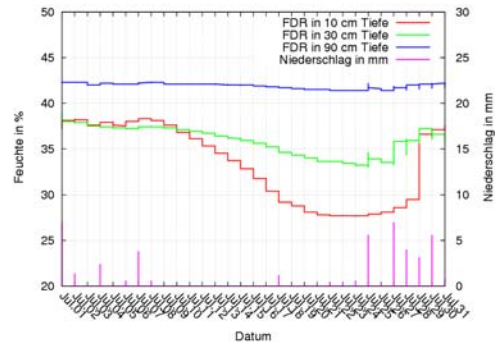


Abb. 6: FDR- und Niederschlagsdaten der fest installierten Sensoren für Juli

Den Vergleich der FDR- und Georadardaten für die drei Stationen zeigt Abbildung 7. Es ist wiederum zu erkennen, dass die Kurven der FDR-Daten umso glatter werden, je tiefer man misst. Der Verlauf der Radardaten stimmt an allen drei Stationen am besten mit dem Verlauf der FDR-Sonde in 10 cm Tiefe überein. Daher kann man beim Georadar auf eine Erkundungstiefe von ungefähr 10 cm schließen. Auch die Absolutwerte der Georadardaten und der Daten der 10 cm tiefen Sonde stimmen an den Stationen I und II gut überein. An der dritten Station werden mit den Radarmessungen relativ hohe ϵ_r -Werte erreicht. Das liegt daran, dass die Radardaten einen integrierten Wert widerspiegeln, der sich aus den enorm hohen Werten an der Oberfläche und den relativ niedrigen Werten in 10 cm Tiefe ergibt.

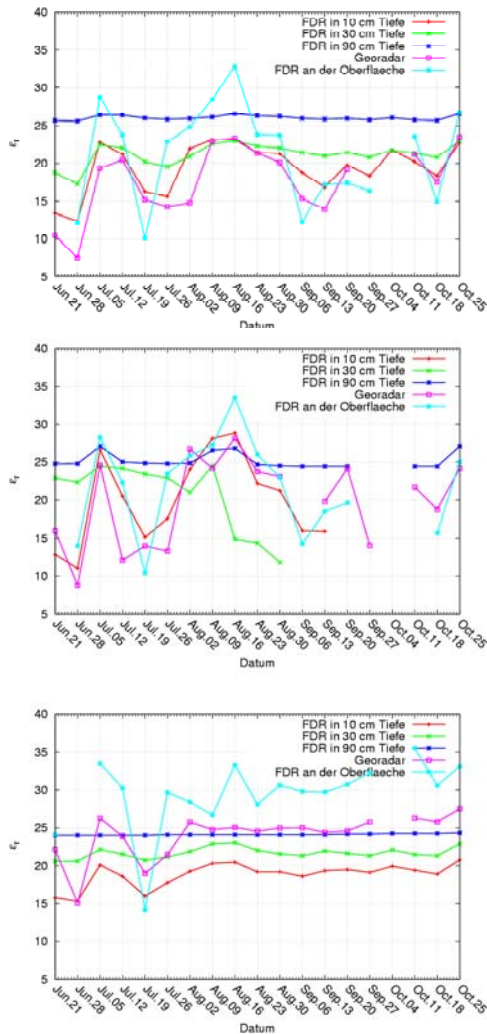


Abb. 7: Vergleich der FDR- und Georadardaten für die Stationen I bis III für einen Zeitraum von 5 Monaten

Auswertung von Bodenproben

Um die FDR-Sonde für die im Feld vorliegende Bodenart zu kalibrieren, wurden an zwei Messtagen jeweils acht Bodenproben entnommen. Durch Trocknen und Wiegen wurde der gravimetrische Feuchtegehalt bestimmt, der dann in den volumetrischen Feuchtegehalt umgerechnet wurde und mit den Ergebnissen der FDR-Sonde verglichen wurde.

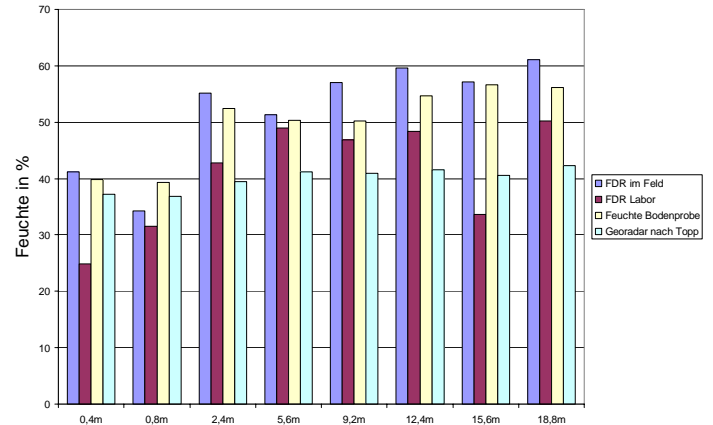


Abb. 8: Vergleich der aus den Bodenproben gravimetrisch bestimmten Feuchte und der FDR- und Georadaregebnisse

Wie man in der Abbildung 8 erkennt, stimmen die aus den Bodenproben errechneten Feuchtwerte gut mit den im Feld gemessenen FDR-Werten überein. Es fällt auf, dass die im Labor gemessenen FDR-Werte relativ stark abweichen, was eventuell daran liegen könnte, dass der Probenbehälter, beziehungsweise das geringe Messvolumen, die Messung beeinflusst. Auch die aus den Radardaten errechnete Feuchte zeigt immer niedrigere Werte, was aber wieder daran liegt, dass das Georadar einen integrierten Wert misst und die Bodenproben nur an der Oberfläche entnommen wurden.

Aus der Kalibrierung der FDR-Sonde ergibt sich für die vorliegende Bodenart eine große Übereinstimmung mit der Formel von Topp und der Formel, die das FDR-Gerät zur Umrechnung benutzt.

Diskussion

Die FDR-Sonden liefern nur punktuelle Feuchtedaten und zeigen zum Teil sehr große Schwankungen bei Wiederholungsmessungen, so dass der Einsatz für größere Gebiete sehr zeitaufwendig ist. Das Georadar hat ein größeres Messvolumen, welches sich aus dem Antennenabstand, der Antennenbreite und der Erkundungstiefe ergibt. Außerdem können die Messungen relativ schnell durchgeführt werden und sind daher für Anwendungen auf größeren Flächen geeignet. Der zeitliche und der

laterale Verlauf der FDR- und Georadardaten stimmen gut überein. Bei den Absolutwerten erreichen Georadar und die FDR-Sonde in 10 cm Tiefe die größte Übereinstimmung, was auf eine Erkundungstiefe der Bodenwelle des Georadars von ungefähr 10 cm schließen lässt. Der Vergleich mit den Bodenproben zeigt, dass die Formel, die das FDR-Gerät zur Umrechnung in Feuchtwerte benutzt, für die vorliegende Bodenart benutzt werden kann.

Literaturangaben

- Gaskin, G. J. und Miller, J. D., 1996, Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique: *Journal of agricultural engineering research*, **68**, 153-160.
- Topp, G. C., 1980, Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines: *Water Resources Research*, **16**, 574-582.