

Kontinuierliche Messung des Bodenwassergehaltes im Feld mittels der Zeitbereichsreflektometrie, (TDR)

- Untersuchung der räumliche Variabilität des Wassergehaltes eines humusreichen Oberbodens im „Jagen63“ -

Gabriele Gärtner¹; Rudolf Plagge¹; Frank Meißner¹

¹ Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik

Kurzfassung

Am Standort „Jagen 63“ in Berlin-Grünwald wurde die räumliche Variabilität des Wassergehaltes im Oberboden untersucht. Die heterogene Jungkiefernfläche ist charakterisiert durch unterschiedliche Bestandesdichten mit Einfluss auf Bestandesniederschläge und Wurzelverteilung mit einem Makrorelief von sich abwechselnden Gräben und Dämmen. Zur Untersuchung der räumlichen Abhängigkeit des Bodenwassergehaltes sind drei parallele Transekte angelegt worden. Die Wassergehalte wurden in hoher Messdichte mit einer Einstichsonde gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass mit der TDR-Methode in Verbindung mit der zweidimensionalen Semivariogramm-Analyse, ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Bodenwassergehalt und räumlicher Distanz besteht.

Abstract

The spatial variability of soil water content in the top soil was determined at the area "Jagen 63", located in Berlin-Grünwald. This heterogeneous area, growing young pines, is characterized by periodic furrows (pattern of peaks and troughs) containing different stand densities, which again influence the amount of precipitation and the arrangement of roads. For verification of spatial dependencies of soil water content, three transections were arranged. The soil moisture content was measured with a penetration probe and a high spacious coverage. The results of the TDR-Method, together with a two dimensional Semivariogramm-Analyse, show a functional coherence between the soil water content and spatial distance.

Stichworte: TDR, räumliche Variabilität, Semivarianz-Analyse

1. Einleitung

Der Wassergehalt des Bodens stellt eine zentrale Größe für die Land- und Forstwirtschaft dar. Im Standort-Komplex Boden/Pflanze bestimmt der Wassergehalt die Versorgung der Pflanze mit Sauerstoff und Nährstoffen. Er steuert das Wachstum und nimmt Einfluss auf die biologische Produktivität. Da die Scherfestigkeit des Bodens vom Wassergehalt abhängt, werden Durchwurzelbarkeit und Befahrbarkeit des Bodens ebenfalls kontrolliert.

Praktisch sind Wassergehaltsmessungen unverzichtbar zur Bemessung der Wasserkapazität und des Transportes von Nähr- und Schadstoffen. Das erfordert eine kontinuierliche Überwachung des volumetrischen Wassergehaltes im Feld- und mittels Laborexperimenten. Dabei sollten die Methoden der Wassergehaltsbestimmung möglichst genau und schnell sein, sowie wiederholbare Messungen eines definierten

Volumens am gleichen Ort ermöglichen. Dafür wurde eine Methode der TDR-Messung mittels Nadelimpuls entwickelt, mit verschiedenen Sonden getestet und der Zusammenhang zwischen Signallaufzeit und Materialfeuchte untersucht.

2. TDR- Messung

Das Messsystem besteht allgemein aus einem TDR-Messgerät (Time Domain Reflectometer), einer koaxialen Zuführungsleitung und einer Sonde, dem so genannten Wellenleiter. Zur Messung wird ein elektromagnetischer Puls durch das Kabel-Sensorsystem gesendet. Überall dort, wo Störungen oder Sollbruchstellen eine Unstetigkeit im Wellenwiderstand hervorrufen, wird auf der Basis des Brechungsgesetzes ein Teil seiner Energie reflektiert, der verbleibende Teil wird transmittiert. Die Reflektionen werden abgetastet und als Funktion der Zeit dargestellt. Sind Sensoreingang und Sensor-Ende im Reflektionsbild bekannt, so kann aus der Verweilzeit des Pulses entlang des Wellenleiters seine Geschwindigkeit und damit die augenscheinliche Dielektrizitätskonstante (ϵ) berechnet werden.

Die Interpretierbarkeit des Reflektionsbildes hängt dabei von der Größenordnung und Form der reflektierten Signale ab und wird durch Geometrieparameter der Sonde vorgegeben. Es gibt unterschiedliche Sondentypen, wie koaxiale Wellenleiter (Yanuka et al. 1988, Topp et al. 1980) und Mehrstab-Antennen mit 2 bis 7 Stäben (Campbell 1990, Dasberg & Hopmans 1992, Davis & Chudobiak 1975, Malicki & Skierucha 1989, Plagge 1991, Roth et al. 1992, Roth et al. 1990, Topp et al. 1984). Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Messgeometrie, dem elektrischen Widerstand, sowie Abstand, Durchmesser und Länge des Wellenleiters. So besitzen koaxiale Sonden, bzw. Mehrstabsonden ein besser definiertes Messvolumen, als Zweistabsonden. Auch ist ein Widerstandstransformer, wie bei Zweistabsonden, nicht unbedingt erforderlich. Nachteilig sind jedoch die Störungen beim ungestörten Einbau, die bei gleichem Messvolumen mit zunehmender Anzahl der Stäbe ansteigen. Um den Einfluss der Stabdicke auf die Verdichtung des Messvolumens zu verringern, sind die Antennestäbe optimiert. Wenn Messungen in hoher räumlicher Auflösung erforderlich sind, lassen sich Mehrstabsonden, insbesondere in Laborfließsäulen ungünstig einsetzen. Koaxiale Sonden sind nur zur Messung künstlich gepackter Böden verwendbar.

Bei der Wanderung des Pulses entlang des Wellenleiters treten Energieverluste auf, die um so größer sind, je höher Wassergehalt, Ionenkonzentration und Sondenlänge sind. Lange Sonden liefern zwar einen räumlich integrierten Wert, jedoch können die dielektrischen Verluste so groß sein, dass in Böden mit hohen Salzkonzentrationen keine auswertbaren Reflektionen mehr messbar sind. Ein ungestörter Einbau im Feld mit groß dimensionierten Sonden ist nur bedingt möglich. Am individuellsten einsetzbar ist dabei die balancierte Zweistab-Sonden. Es zeigt sich aber, dass jeder Sondentyp sein Vorteile aufweist.

Zur Messung werden meist kommerzielle elektrische Kabelmessgeräte eingesetzt, die mit stufenförmigen Pulsen bei einer Anstiegszeit von 45 bzw. 250ps arbeiten. Die Verwendung von Stufenpulsen bei einer Messung hat den Vorteil, dass im Prinzip jede Änderung im Wellenwiderstand entlang der Wellenleiter im Reflektionsbild geortet werden kann. Das bedeutet, dass bei Übergängen entlang der Metallantenne Reflektionen auftreten z.B. von trockenem zum feuchten Boden, oder bei größeren Lufteinschlüssen, Rissen, Wurzeln, sowie einbaubedingten Störungen. Da die Pulse

mit ≈ 6 bis 225 mV Spannungsamplitude (je nach Hersteller) relativ schwach sind, wird die Reflektion am Ende der Sonde zunehmend schlechter detektierbar und die Wassergehaltsbestimmung damit unsicherer. Höhere Salzkonzentrationen führen zu einem Anstieg des dielektrischen Verlustes, sodass die Spannungsamplitude im Reflexionsbild zudem noch abgeschwächt wird. Sollen solche Reflexionsbilder von einem Computer ausgewertet werden, so wird eine diskrete Interpretation des gesamten Bildes erforderlich. In wieweit es möglich ist, mit Hilfe von mathematischen Algorithmen die auftretenden Reflexionen beim Eintritt des Pulses in die Sonde und am Ende der Sonde zu orten, thematisiert eine weitere Problematik (Topp & Davis 1985, Malicki & Skierucha 1989, Dasberg & Hopmans 1992 und Yanuka et al. 1988). Um Fehlinterpretationen speziell in heterogenen Böden zu verhindern, raten Dasberg & Hopmans (1992) sogar davon ab die Auswertung einem Computeralgorithmus zu überlassen. Jedes einzelne Reflektionsbild sollte manuell interpretiert werden. Somit wäre praktisch eine automatische Messung mit TDR nicht möglich.

Das hier eingesetzte Messsystem bestehend aus, Pulsgenerator, Abtastkopf mit Spannungsrekorder und den zugehörigen analogen Baugruppen, sowie eine digitale Steuereinheit (CPU), arbeitet im Gegensatz zu anderen Messgeräten mit Nadelpulsen bei einer Anstiegszeit von 200ps. Bei diesem Messsystem kann, im Gegensatz zur Messung mittels Stufenimpuls, nicht jede Änderung im Wellenwiderstand entlang der Wellenleiter im Reflektionsbild geortet werden, dafür können sie aber hinsichtlich der Interpretation der Reflektionsbilder eindeutiger ausgewertet werden, als die üblichen Stufenpulsmeßgeräte, und unterstützen damit eine automatisierte Auswertung des Reflektionsbildes.

3 Kalibrierfunktion

Zur Ermittlung des Wassergehaltes ist es erforderlich, die Beziehung zwischen der augenscheinlichen Dielektrizitätskonstanten und dem Bodenwassergehalt zu kennen. In vielen Untersuchungen wird die Eichfunktion von Top et al. (1980) angewendet. Diese Funktion liefert für mineralische Böden Trockenraumdichten zwischen 1.3 und 1.5 g/cm³, sowie geringen Gehalten an organischen Substanzen und Ton, hinreichend genaue Ergebnisse. Unter anderen Bedingungen treten jedoch mehr oder minder große Fehler auf, sodass eine Korrektur der Messung oder die individuelle Eichung des Bodens notwendig wird.

Zum einen besteht die Möglichkeit einer **individuellen Kalibrierung** des zu untersuchenden Bodens, was mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden ist. Ist ein homogener Bodenhorizont oder ein –profil Gegenstand der Betrachtung, so ermöglichen individuelle Eichungen eine relativ genaue Wassergehaltsbestimmung mit der TDR-Methode. In heterogenen Böden, z.B. in gärtnerischen Erden, oder bei der Untersuchung großer Flächen, sind individuelle Eichungen aufgrund des imensen Aufwandes nicht zu realisieren.

Andererseits besteht die Möglichkeit der Verwendung von **physikalische Modellen** (z.B. gemischt dielektrische 3- und 4- Phasenmodelle) zur Ableitung des Wassergehaltes aus der Dielektrizitätskonstanten und anderen, einfach im Labor zu bestimmenden Kenngrößen (z.B. Porosität, Dielektrikum der Festsubstanz, etc.). Da bei heterogenen Flächen die individuellen Kennwerte jeder Messstelle zuordenbar sein müssen, sind zahlreiche Messungen erforderlich, wodurch der Aufwand beachtlich zunehmen kann.

Eine dritte Möglichkeit besteht in der **Verwendung von Standard Eichfunktionen** und anschließender Korrektur des Messergebnisses auf der Basis der Pedo-Übertragungsfunktion. Bei der Verwendung von Polynomen als Standard Eichfunktion treten Umrechnungsfehler auf, dass die Umkehrfunktion $\varepsilon = f(\theta)$ nicht eindeutig ist, und zu einer anderen als der gemessenen Dielektrizitätskonstanten führen kann. Daher werden in der vorliegenden Arbeit lineare Eichgeraden als Standard Eichfunktion verwendet, die ein eindeutiges Ableiten der Dielektrizitätskonstanten aus dem angezeigten Wassergehaltswert ermöglichen. Die Ergebnisse der Kalibrierung für die hier vorgestellte Untersuchungsreihe sind in nachfolgender Grafik dargestellt:

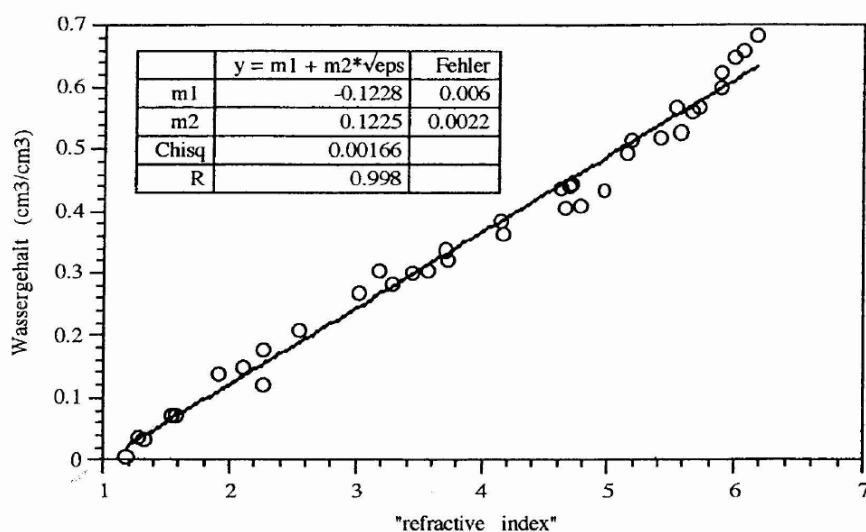


Bild 1: Kalibrierfunktion: Volumetrischer Wassergehalt als Funktion des "refractive index" für die organischen Auflagen und den Aeh-Horizont einer Rostbraunerde des Standortes Jagen 63 im Grunewald, Berlin.

Die funktionale Beschreibung erfolgt mittels linearer Anpassung nach der Maximum Likelihood Methode. Der refractive Index ist klassisch als $\sqrt{\varepsilon}$ definiert. Er drückt das Verhältnis des Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle im freien Raum zur Geschwindigkeit der Welle in einem Medium aus.

Voraussetzung für die Anwendung von TDR-Messungen in dem heterogenen Boden ist die Kenntnis der Beziehung zwischen der Dielektrizitätskonstante und dem volumetrischen Wassergehalt der einzelnen Horizonte.

Es zeigt sich, dass die organischen Auflagen Oi, Of (Fermentation) und Oh (Humus als Abbauprodukt) und der Aeh-Horizont (schwach eluvierter Oberboden mit Humusverlagerung) durch eine individuelle Kalibrierfunktion beschrieben werden können. Eine unterschiedliche Durchmischung von Auflage und Aeh-Horizont muss daher nicht gesondert berücksichtigt werden.

4 Transektenuntersuchung

Die Untersuchungsfläche „Jagen 63“ im Berliner Grunewald ist ein 40 Jahre alter Jungkiefernbestand. Wie durch die Messergebnisse bekannt wurde, wurde die Fläche bei Bestandesbegründung gepflügt und weist ein Mikrorelief von sich abwechselnden Gräben und Dämmen auf. Das Pflügen hatte zur Folge, dass der Oberboden (0-20 cm)

sehr heterogen ist und praktisch überall Störungen aufweist. Das bedeutet, in den Gäben sind gekappte Ah-Horizonte und auf den Dämmen verschüttete Oh-Horizonte anzutreffen. Mittlerweile hat sich in den Gräben eine Bodenbildung eingestellt, so dass sich dort ein 15 cm mächtiger humoser Oberboden (Ol, Oh, Ah) gebildet hat. Zur Untersuchung der räumlichen Variabilität der Wassergehalte im Oberboden wurden TDR-Messungen durchgeführt. Geprüft werden sollte die Hypothese, dass das Mikrorelief Einfluß auf den Bodenwassergehalt hat.

Auf der Versuchsfläche wurde ein Transekt von 30 m Länge angelegt. Gemessen wurde in 50 cm Abständen, sodass sich insgesamt 60 Messpunkte ergeben. Parallel zu dieser ersten Messreihe wurden jeweils 25 cm versetzt zwei weitere Messtransekte mit jeweils 60 Messpunkten angelegt. Das Messraster der Untersuchungen kann Bild 2 entnommen werden.

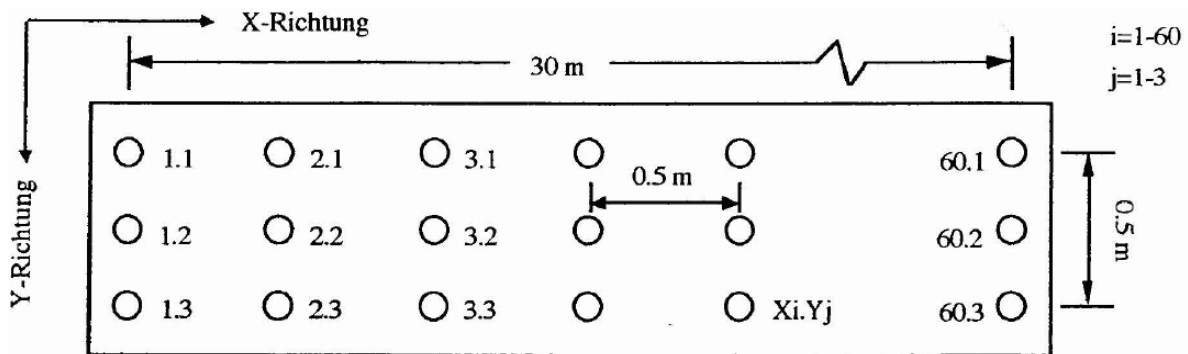


Bild 2: Messraster der Transektuntersuchungen mit einer Einstichsonde. Die Messpunkte sind zweidimensional in X-Richtung mit der i-ten Position und in Y-Richtung mit der j-ten Position angelegt.

Die Wassergehaltsmessungen erfolgten dabei mit einem TDR-Feldmessgerät, wobei eine Einstichsonde zum Einsatz kam. Die Stabsonde wurde senkrecht von oben in die Messposition eingestochen, sodass der Oberboden von 0 bis 10 cm bei einer Messung erfasst wurde. Da die Messwertaufnahme auf der gesamten Fläche ca. 60 Minuten in Anspruch nahm, kann davon ausgegangen werden, dass zeitlich unabhängige Wassergehalte vorliegen. Die Messungen wurden einen Tag nach einem Niederschlagsereignis durchgeführt.

Die Bilder 3 und 4 stellen die räumliche Variabilität der volumetrischen Wassergehalte, sowie ihre Häufigkeitsverteilung dar. Dabei zeigt sich, dass die Wassergehalte stark variieren. So beträgt die Spannweite der vorkommenden Wassergehalte entlang des Transektes $0.27 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ und zwischen den Messreihen im Winkel von 90° quer zum Transekt $0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Zur Charakterisierung der Variabilität der Messwerte sind in Tabelle 1 einige deskriptive statistische Kenngrößen aufgelistet.

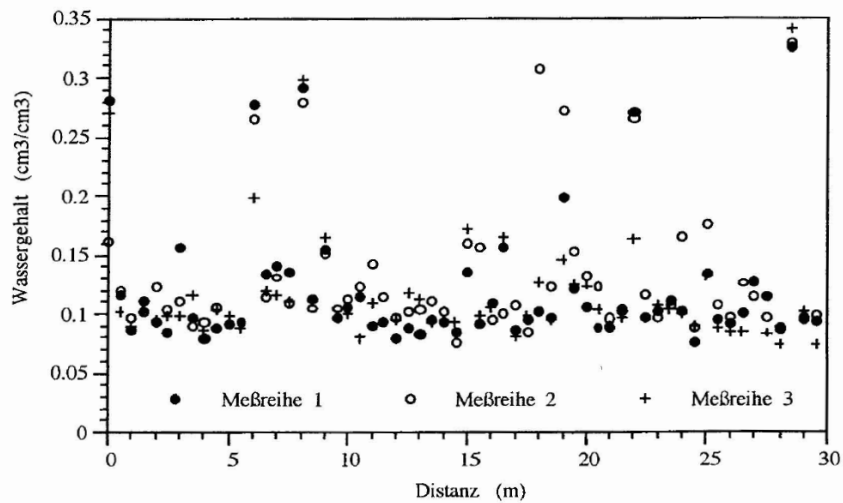


Bild 3: Räumliche Variabilität des Bodenwassergehaltes in 0 bis 10 cm Tiefe entlang des angelegten Transektes bei der Rostbraunerde des Standortes Jagen 63 im Grunewald Berlin.

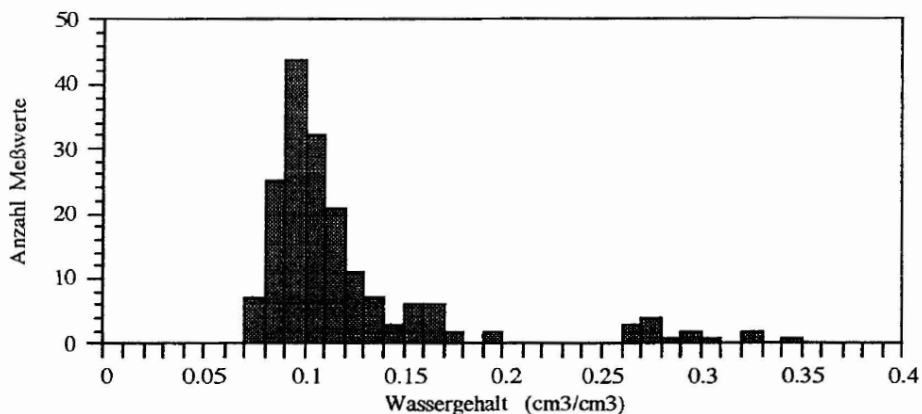


Bild 4: Häufigkeitsverteilung des gemessenen Wassergehaltes in 0 bis 10 cm Tiefe bei der Rostbraunerde des Standortes Jagen 63 im Grunewald, Berlin.

Tabelle 1: Deskriptive statistische Kenngrößen zur Charakterisierung der vorliegenden Wassergehaltsdaten aus den Transektuntersuchungen

	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3
Minimum	0.075	0.076	0.073
Maximum	0.326	0.328	0.341
Mittelwert	0.121	0.130	0.117
Median	0.009	0.109	0.101
Variationskoeffizient	46.74	43.94	42.79
Standartabweichung	0.0564	0.0572	0.0500
Schiefe	2.35	2.14	2.88
Kurtosis	4.64	3.66	8.63

Aus den Tabellenwerten kann abgeleitet werden, dass das arithmetische Mittel und das Dichtemittel nicht identisch sind. Schiefe und Kurtosis weisen auf einen rechtsschiefen

und nicht normalverteilten Wassergehalt hin, der anschaulich aus Bild 4 entnommen werden kann. Um die räumliche Abhängigkeit der gemessenen Wassergehalte zu untersuchen, wird jedoch eine Normalverteilung vorausgesetzt. Die log-Normalverteilung weist aufgrund der wenigen extremen Wassergehaltswerte zwischen 0.26 und $0.34 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ keine Normalverteilung auf. Daher wurde dieser Wassergehaltsbereich von den anderen Daten getrennt und isoliert betrachtet.

4.1. Semivariogramm-Analyse

Zur Untersuchung der räumlichen Struktur der Wassergehalte wurden Semivarianz-Analysen vorgenommen. Die Semivarianz wurde für alle Punktepaare berechnet, die sich in einer bestimmten Distanz um jeden Messpunkt befinden. Die Distanz ist eine vektorielle Größe und daher richtungsorientiert. Als Ergebnis der Analyse erhält man ein so genanntes Semivariogramm, in dem die Semivarianz gegen die gerichtete Entfernung aufgetragen ist. Zur geostatistischen Analyse wurde das Programm GEO-EAS von Englund & Sparks (1988) verwendet, um ein- und zwei-dimensionale Variogramm-Analysen der log-transformierten Wassergehalte im Bereich von $0 - 25 \text{ Vol}\%$, als auch von $25 - 35 \text{ Vol}\%$ vorzunehmen. Zur Analyse der Daten wurden unterschiedlichen Richtungsvektoren geprüft, zum einen in Transektrichtung (X-Richtung) und zum Anderen in lotrechter Orientierung zum Transekt (Y-Richtung) (siehe Bild 2). Da im letzten Fall lediglich 3 Beprobungen in 90° Richtung zum Transekt zur Verfügung stünden, könnte die Analyse lediglich für 2 Schrittweiten erstellt werden. Daher wurde eine Richtungstoleranz von 90° zugelassen, sodass sämtliche Beobachtungspaare zwischen 0° und 180° Orientierung berücksichtigt wurden. Es konnten lediglich räumliche Abhängigkeiten erfasst werden, die sich in dem gewählten Skalenbereich bewegen.

4.2. Wassergehaltes entlang des Transektes

Zur Betrachtung unterschiedlicher Skalen liegen die Semivariogramm-Analysen mit verschiedenen Schrittweiten vor. Heterogene Bestandesniederschläge und die Verteilung der Wurzel können aufgrund unterschiedlicher Besatzdichten im Baumbestand Einfluss auf die gemessenen Wassergehalte nehmen. Entlang des Transektes befinden sich daher Bereiche, die sehr nahe an Baumgruppen sind, sowie Bereiche die nahezu baumfrei sind. Um diesen Einfluss auf die räumliche Struktur zu untersuchen, wurde in der ersten Analyse eine minimale Schrittweite von 1 m und eine maximale Schrittweite von 14 m festgelegt. Geprüft wurde die räumliche Abhängigkeit in X-Richtung. Im Mittel liegen 670 Beobachtungspaare für die unterschiedlichen Distanzen vor.

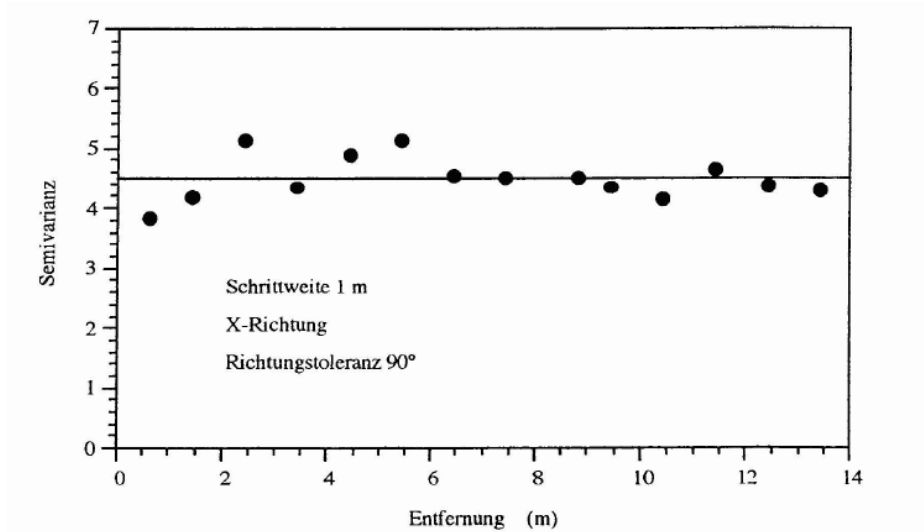


Bild 5: Semivariogramm des Bodenwassergehaltes in 0 bis 10 cm Tiefe entlang des angelegten Transektes bei der Rostbraunerde des Standortes Jagen 63 im Grunewald, Berlin. Schrittweite 1 m X-Richtung

Aus dem Semivariogramm in Bild 5 kann abgeleitet werden, dass eine räumliche Abhängigkeit der Wassergehaltspaare bei einer minimalen Schrittweite von 1 m nicht besteht. Das Variogramm zeigt einen reinen Nugget-Effekt, da auf einer Distanz von 1 m schon die Gesamtvarianz erreicht ist. Die Wassergehaltswerte sind über die beobachtete Entfernung von 1 bis 14 m unabhängig. Der Einfluss unterschiedlicher Bestandesniederschläge oder Durchwurzelung auf den Wassergehalt kann bei den vorliegenden Untersuchungen nicht gefunden werden. Messungen in diesem Distanzbereich können als Messwiederholungen verstanden werden.

4.3 Wassergehalt in Abhängigkeit des Mikroreliefs

In der zweiten Analyse sollte untersucht werden, ob eine räumliche Abhängigkeit des Wassergehaltes vom Mikrorelief besteht. Bei einem Abstand zwischen zwei Gräben, bzw. Dämmen von 1.20 m (Marschner 1990) sind Damm und Graben ca. 0.60 m voneinander entfernt. Zur Erfassung der kleinräumlichen Variabilität wird eine minimale Schrittweite von 0.25 m und eine maximale Schrittweite von 2.5 m festgelegt. Geprüft wurde die räumliche Abhängigkeit in Y-Richtung bei 90°iger Richtungstoleranz. Im Mittel werden 270 Beobachtungspaare für die unterschiedlichen Distanzpunkte gefunden.

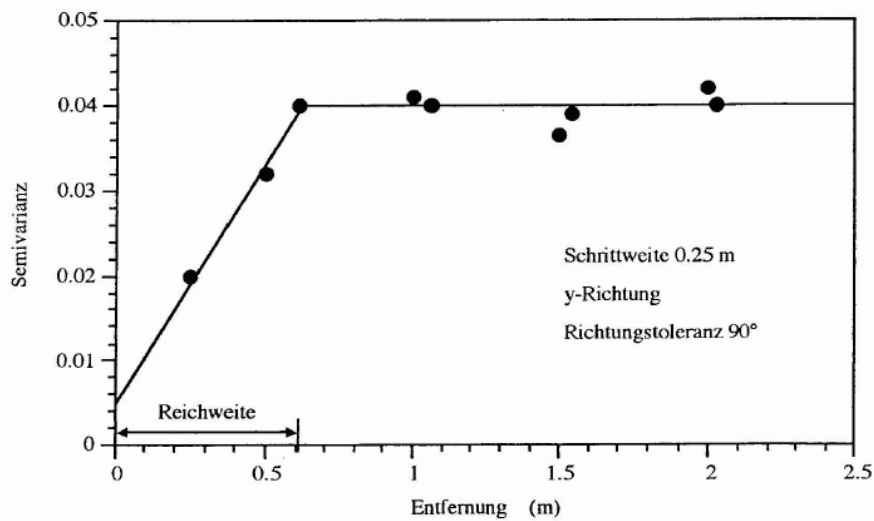


Bild 6: Semivariogramm des Bodenwassergehaltes in 0 bis 10 cm Tiefe entlang des angelegten Transektes bei der Rostbraunerde des Standortes Jagen 63 im Grunewald, Berlin.

Aus dem Semivariogramm in Bild 6 kann abgeleitet werden, dass bei Verwendung einer minimalen Schrittweite von 0.25 m eine räumliche Abhängigkeit der Wassergehaltspaare gefunden werden kann. Die Reichweite der räumlichen Abhängigkeit beträgt 0.61 m. Damit kann die Hypothese bestätigt werden, dass das Mikorelief mit seinen Dämmen und Gräben die räumliche Struktur der Wassergehalte im Oberboden maßgeblich beeinflusst. Sollen Wasserhaushaltsuntersuchungen auf dem Standort durchgeführt werden bedeutet dies, dass Dämme und Gräben getrennt untersucht werden müssen.

5. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die entwickelten Nadelpuls TDR-Meßgeräte in Verbindung mit den vorliegenden TDR-Sonden eine routinemäßige Bestimmung von Wassergehalten in ungestörten Böden in höher räumlicher und zeitlicher Auflösung ermöglichen. Aufgrund ihres nicht destruktiven Charakters ist die Time Domain Reflectometry (TDR) besonders zur kontinuierlichen Messung des volumetrischen Bodenwassergehaltes im Labor und Feld geeignet.

Die vorliegenden Untersuchungen machen deutlich, dass die Genauigkeit einer absoluten Wassergehaltbestimmung maßgeblich von der verwendeten Eichbeziehung zwischen der Dielektrizitätskonstanten des Bodens und seinem Wassergehalt abhängt. Aus den vorliegenden Untersuchungen geht hervor, dass die TDR-Methode geeignet ist, die räumliche Variabilität von Wassergehalten eines Standortes widerzuspiegeln. In Verbindung mit der Semivariogramm-Analyse ist es möglich, einen funktionalen Zusammenhang zwischen Bodenwassergehalt und räumlicher Distanz zu untersuchen. Für den Standort Jagen 63 im Berliner Grunewald konnte der Einfluss des Mikoreliefs auf den Wassergehalt des Oberbodens gefunden werden. Die vorliegenden Ergebnisse geben darüber hinaus Aufschluss über die maximal zulässige Entfernung von Messpunkten für die Interpolation von hydraulischen Bodeneigenschaften, da eine

Schätzung aus Nachbarmesspunkten nur sinnvoll ist, wenn diese dem Schätzpunkt ähnlicher sind, als die anderen Punkte benachbarter Gebiete.

Literatur:

- DAVIS, J.J. & W.J. CHUDOBIAK (1975) *In situ meter for measuring relative permittivity of soils*. Geol. Surv. Can., Paper 75-1 (Part A) 75-79
- ENGLUND, E. & A. SPARKS (1988) *Geostatistical environmental assessment software, GEO-EAS*. Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of research and development, U.S. Environmental Protection Agency
- MALICKI, M.A. & W.M. SKIERUCHA (1989) *A manually controlled TDR-soil moisture meter operating with 300ps rise-time needle pulses*. Irrigation Sci., 10, 103-109
- MARSCHNER, B. (1990) *Elementumsätze in einem Kiefernökosystem auf Rostbraunerde unter dem Einfluss einer Kalkung/Düngung*. Diss. Technische Universität Berlin, FB 14, Institut für Ökologie, Fachgebiet Regionale Bodenkunde
- PLAGGE R. (1991) *Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit im Boden*. Diss. Technische Universität Berlin, Bodenökologie und Bodengenese, heft 3
- PLAGGE, R., ROTH C., RENGER, M., (1994) *Kontinuierliche Messung des Bodenwassergehaltes im Feld und Labor mittels der Time Domain Reflectometry (TDR)*. Abschlussbericht des DFG-Forschungsvorhabens, Kennziffer: Re 422/14-1
- ROTH, C.H. MALICKI & R. PLAGGE (1992) *Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant-water content as the basis for calibration of soil moisture measurements by TDR*. Journal of Soil Science, Band 43, S 1-13
- TOPP, G.C., J.J. DAVIS & A.P. ANNAN (1980) *Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines*. Water Resour. Res., 16 579-582
- TOPP, G.C., J.J. DAVIS, W.G. BAILEY & W.D. ZEBCHUK (1984) *The measurement of soil water content using a portable TDR hand probe*. Can. J. Soil Sci., 64, 313-321
- TOPP, G.C., J.J. DAVIS (1985) *Measurement of soil water content using a portable Time Domain Reflectometry (TDR) a field evaluation*. Soil Sci. Am.J, 49, 19-24
- YANUKA, M., G.C. TOPP, S. ZEGELIN & W.D. ZEBCHUK (1988) *Multiple reflection and attenuation of Time Domain Reflectometry pulses: Theoretical consideration for applications to soil and water*. Water Resour. Res., 24, 939-444