

Experimentelle Bestimmung präferenzierter Fließpfade infiltrierten Niederschlags am Beispiel einer Schwarzerde und einer Pararendzina der Querfurter Platte

Lydia KRAUSS, Gerd SCHMIDT, Michael ZIERDT & Manfred FRÜHAUF

11 Abbildungen und 2 Tabellen

Abstract

KRAUSS, L., SCHMIDT, G., ZIERDT, M., FRÜHAUF, M.: Experimental determination of preferential flow paths used by infiltrated precipitation in a Haplic Chernozem and a Calcaric Cambisol from the Querfurter Platte. - *Hercynia N.F.* 46 (2013): 21 – 40.

To discuss the flow patterns of infiltrated precipitation the dye tracer Brilliant Blue FCF and the FDR-Method were used. Main questions included the water movement in the soil types and if there are differences between the two. Furthermore, the two used methods were compared with each other. The experiment took place in four monoliths of a Haplic Chernozem and in four monoliths of a Calcaric Cambisol from the Querfurter Platte. Two monoliths each were located in small greenhouses and got irrigated from mid-July till mid-September 2011. The other monoliths were located in an outside area without experiencing any irrigation during that time period. The results showed that the infiltration of water in the Haplic Chernozem occurred as matrix and preferential flow without one dominating. In the Calcaric Cambisol the preferential flow dominated permanently. The method analyses indicate that the quantitative data of the FDR-Method cannot be transformed into qualitative data. The trial to quantify the qualitative data from the dye tracer experiment resulted in semi-quantitative data only. Furthermore, the results indicate that Brilliant Blue FCF is not suitable for visualising the water movement in a Haplic Chernozem.

Key words: preferential flow, matrix flow, Haplic Chernozem, Calcaric Cambisol, Brilliant Blue FCF, FDR-Method

1 Einleitung

Böden als Ergebnis von Wechselwirkungen zwischen Ausgangsgestein, Klima und Vegetation spielen eine bedeutende Rolle im globalen und lokalen Wasserkreislauf für die Speicherung, den Transport und die Verteilung von Wasser sowie der im Wasser gelösten Stoffe. Gleichzeitig beeinflusst Wasser alle im Boden ablaufenden physikalischen, biologischen und chemischen Prozesse (vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2010). Deshalb ist die räumliche und zeitliche Verteilung von Wasser im Boden wichtiger Bestandteil in der Erforschung pedologischer, geologischer und hydrologischer Prozesse. Weil die Observierung unterirdischer Systeme schwierig ist, werden hierbei oft Markierungsmittel (Tracer) eingesetzt, welche die Bewegung infiltrierten Wassers imitieren sollen. Oft sind hydrologische Systeme so vielschichtig, dass diese Tracer helfen visuelle Daten über das tatsächliche, oft auch unerwartete Fließverhalten zu liefern. Nicht zuletzt dienen sie damit dem Verständnis und der Quantifizierung der Transportprozesse von Wasser und der in ihm gelösten Stoffe. Neben diesen Methoden finden darüber hinaus volumetrische Messmethoden zur Quantifizierung der Bodenfeuchte in der Forschung Verwendung. Durch diese Verfahren ist eine Erfassung der Verteilungsdynamik von Wasser im Boden möglich (vgl. CHIFFLARD et al. 2003, KÄSS 2004).

Die Fließbewegungen von Wasser in der ungesättigten Bodenzone können allgemein in Matrix- und präferentiellen Fluss unterschieden werden. Bei einem Matrixfluss verdrängt das in den Boden eindringende Niederschlagswasser das in der Matrix vorhandene Bodenwasser, wenn ein wassergesättigter Zustand vorherrscht. Die Fließgeschwindigkeit variiert dabei durch die unterschiedlichen Porengrößen in der Bo-

denmatrix. Böden mit präferentiellen Fließbahnen zeigen ein abweichendes Verhalten. Der in den Bodenkörper infiltrierende Niederschlag kann diesen bereits nach kurzer Zeit wieder verlassen, ohne das in der Matrix vorhandene Wasser verdrängt zu haben. Somit beschreibt der präferentielle Fluss das Umfließen der Bodenmatrix entlang bevorzugter Fließbahnen (Abb. 1). Dabei ist der präferentielle Fluss hauptsächlich an Makroporen gebunden. Diese können in Form von Wurm- und Wurzelgängen durch biologische Aktivität und/oder infolge einer Austrocknung in Form von Schrumpfungsrissen entstehen. Weiterhin kann ein präferentieller Fluss durch Textur- und Gefügeunterschiede verursacht werden. Diese spalten eine fortschreitende Durchfeuchtungsfront in räumlich begrenzte Teilvolumenflüsse auf, sogenannte Bodenfinger (KRAUSS 2012).

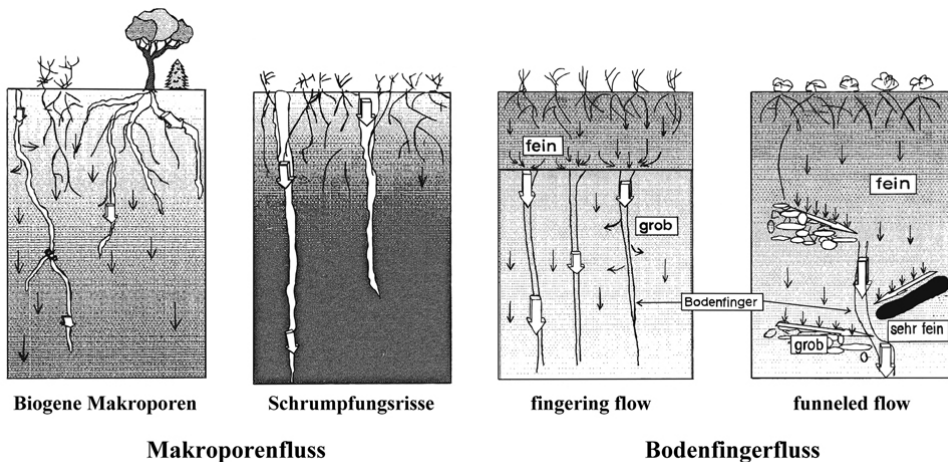


Abb. 1 Arten des präferentiellen Flusses (nach KNOBLAUCH 1996, verändert).

Fig. 1 Preferential flow types (following KNOBLAUCH 1996, optimised).

Ziel der im Rahmen einer Diplomarbeit in diesem Kontext durchgeführten Untersuchung war es, eine Darstellung der Fließbewegungen infiltrierten Niederschlags im Boden in räumlicher und zeitlicher Dimension zu analysieren und zu bewerten. Als Versuchsböden dienten hierfür Bodenmonolithen einer Schwarzerde und einer Pararendzina der Querfurter Platte. Es galt herauszufinden, wie sich das Wasser in diesen Böden bewegt, ob präferentielle Fließpfade genutzt werden oder ob ein Matrixfluss vorliegt und ob sich das Fließverhalten in den Böden voneinander unterscheidet.

Quantitative Daten wurden durch eine volumetrische Wassergehaltbestimmung mittels FDR-Methode (Frequenz Domain Reflectometry) gewonnen. Dabei stellte sich die Frage, ob qualitative Aussagen mithilfe dieser Methode ebenfalls möglich sind.

Die qualitative Visualisierung der Fließbewegungen des infiltrierten Niederschlags fand durch ein Farbtracerexperiment mit dem Farbstoff Brilliant Blue FCF statt. Damit sollte festgestellt werden, ob eine Quantifizierung des qualitativen Datenmaterials möglich ist. Brilliant Blue FCF ist zur Zeit der am häufigsten verwendete Farbtracer zu Visualisierung von Fließpfaden in der ungesättigten Bodenzone. Er bildet als Lebensmittelfarbstoff den besten Kompromiss zwischen denen von FLURY & FLÜHLER (1994) definierten Ansprüchen an einen Farbtracer an gute Sichtbarkeit, geringe Retardation und geringe Toxizität.

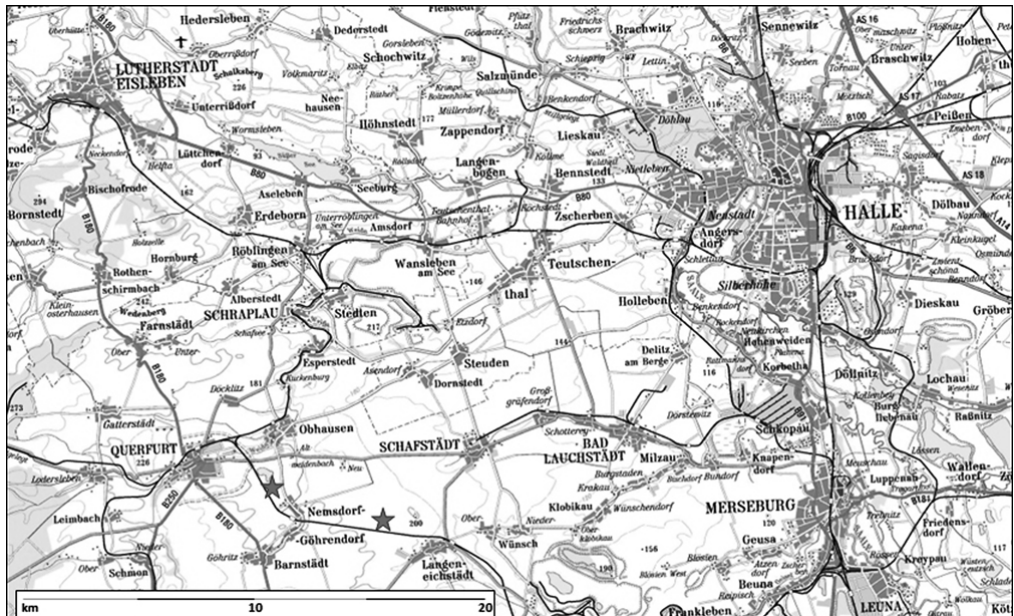


Abb. 2 Topographische Karte Raum Halle & Umgebung. Bodenstandorte mit Stern gekennzeichnet (LVERMGEO 2003).

Fig. 2 Topographic map of Halle and surrounding areas. Soil locations marked with asterisk (LVERMGEO 2003).

2 Herkunftsstandort der Böden

Beide Böden sind Ackerstandorte, die durch das Agrarunternehmen Barnstedt e.G. auf der Querfurter Platte genutzt werden (Abb. 2). Die allgemeinen Bodenparameter sind Tab. 1 und Tab. 2 zu entnehmen. Beide Bodenstandorte befinden sich im Mitteldeutschen Trockengebiet. Hier werden durch die Lee-Wirkung des Harzes die Niederschläge so reduziert, dass dem Gebiet durchschnittlich nur unter 500 mm Niederschlag jährlich zugeführt werden. Daneben herrschen milde Temperaturverhältnisse vor, mit einer durchschnittlichen Jahresmitteltemperatur von 9 °C. Diese klimatischen Bedingungen verursachen im Mitteldeutschen Trockengebiet ein hydrologisches Defizit. Die Verdunstung übersteigt somit die dem Gebiet zugeführte Niederschlagsmenge. Daraus resultierend ist das Gebiet äußerst abfluss schwach. In sehr trockenen Jahren kann die Grundwasserneubildung ausbleiben (KRAUSS 2012).

3 Methodik

Im Jahr 2008 wurden auf der Querfurter Platte jeweils 4 Monolithen der Schwarzerde und der Pararendzina entnommen (Abb. 3). Die Monolithen besaßen eine Mächtigkeit von durchschnittlich 60 cm und einen Durchmesser von etwa 40 cm. Während des Experimentes von April bis September 2011 befanden sich die Monolithen Schwarzerde 1 und Schwarzerde 2 sowie Pararendzina 1 und Pararendzina 2 im Außenbereich (Abb. 4a) des Geländes der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg am Von-Seckendorff-Platz 1 in Halle (Saale). Sie waren somit den natürlichen Witterungs- bzw. Wetterbedingungen ausgesetzt. Demgegenüber waren die Schwarzerde 3 und die Schwarzerde 4 sowie die Pararendzina 3 und die Pararendzina 4 auf zwei geökologische Messkabinen verteilt (Abb. 4b, c). Schwarzerde 3 und Pararendzina 3 befanden sich in Kabine 3 und Schwarzerde 4 und Pararendzina 4 in Kabine 4.

Tab. 1 Schwarzerde auf Löss: allgemeine Bodenparameter (THIENELT 2008).

Tab. 1 Haplic Chernozem on loess: general soil properties (THIENELT 2008).

Parameter	Ap	Axh	C	Tiefe [cm]	Korngrößenanteile [Masse-%]				organische Substanz [Masse-%]	CaCO ₃ [Masse-%]	C/N-Verhältnis	pH-Wert
					Skelett	Anteile am Feinboden						
					Ton	Schluff	Sand					
Unterbodengrenze	38cm	85cm	ab 85cm	2	0.64	6.03	60.70	33.26	4.65	0.18	12.1	6.5
				10	0.93	6.20	60.88	32.92	4.58	0.22	14.0	6.7
Form/Schärfe/Lage	eben/scharf/horizontal		eben/diffus/horizontal	30	0.76	6.94	60.64	32.42	4.17	0.22	13.7	6.8
Gefügeform	Krümel	Krümel	Subpolyeder	40	0.00	6.62	62.62	30.76	5.07	0.19	18.1	6.9
Lagerungsart	geschlossen	geschlossen	geschlossen	50	0.00	6.35	62.34	31.31	5.38	0.16	17.5	6.9
Bodenart	sandig-lehmiger Schluff	sandig-lehmiger Schluff	sandiger Schluff	70	0.01	7.29	61.12	31.59	4.09	0.22	33.5	7.0
				90	0.01	5.04	44.86	50.10	2.80	0.38	24.5	7.1

Tab. 2 Pararendzina auf Löss: allgemeine Bodenparameter (THIENELT 2008).

Tab. 2 Calcaric Cambisol on loess: general soil properties (THIENELT 2008).

Parameter	Ap	eC	Tiefe [cm]	Korngrößenanteile [Masse-%]				organische Substanz [Masse-%]	CaCO ₃ [Masse-%]	C/N-Verhältnis	pH-Wert
				Skelett	Anteile am Feinboden						
				Ton	Schluff	Sand					
Unterbodengrenze	32cm	ab 32cm	10	3.17	5.44	42.98	51.58	3.53	5.68	2.7	7.3
Form/Schärfe/Lage	wellig/scharf/horizontal		20	4.38	6.14	43.40	50.46	3.04	6.16	32.5	7.6
Gefügeform	Krümel	Subpolyeder	30	3.07	6.05	43.23	50.72	2.50	9.30	42.0	7.7
Lagerungsart	geschlossen	geschlossen	40	0.41	3.81	31.98	64.20	2.18	6.45	28.7	7.8
Sonstige Merkmale	Krotowinen in eC, Lösskindel, Schotterlinsen		50	0.32	5.01	41.45	53.54	1.97	7.60	62.0	7.9



Pararendzina



Schwarzerde

Abb. 3 Bodenprofile von Schwarzerde und Pararendzina der Querfurter Platte (THIENELT 2008).

Fig. 3 Soil profiles of Haplic Chernozem and and Calcaric Cambisol from the Querfurter Platte (THIENELT 2008).

3.1 Bodenfeuchtedynamik

Während unter Freiluftverhältnissen aus Sicherheitsgründen auf die Verwendung von FDR-Sonden verzichtet wurde, sind sie in die Monolithen der Messkabinen in 10 und 40 cm Tiefe eingebaut worden (Abb. 4b). Der Anschluss der Sonden an Datenlogger erfolgte im nächsten Schritt oder die Sonden waren bereits in die Technik der Messkabinen integriert. Die an die Logger angeschlossenen Sonden wandelten die Daten bereits in Vol.% Wassergehalt um. Zur Umrechnung der Daten der integrierten Sonde (Pararendzina 3 in 40 cm Tiefe) von mV in Vol.% wurde das vom Hersteller angegebene Polynom genutzt (ECOTECH 1999):

$$\text{Vol. \%} = \frac{(1,07 + 6,4V - 6,4V^2 + 4,7V^3) - a_0}{a_1}$$

Hierbei sind für die Koeffizienten a_0 und a_1 mineralische Substrate mit einem Gehalt an organischem Kohlenstoff (C_{org}) von ca. 3% definiert. Die Datenaufzeichnung fand vom 17.7.2011 bis zum 21.9.2011 statt. Innerhalb des Zeitraums wurde durch die Datenlogger alle fünf bzw. drei Minuten ein Mittelwert gebildet und gespeichert.



Abb. 4 Monolithen (a) im Außenbereich und (b) in einer Messkabine; (c) eine Messkabine.

Fig. 4 Monoliths (a) in the outside area and (b) in a greenhouse; (c) a greenhouse.

3.2 Beregnung

Alle Monolithen wurden von Mitte April bis Mitte Juli zur Vorsättigung bzw. Revitalisierung beregnet. Alle drei Tage wurde den Böden ca. vier Liter Wasser zugeführt. Dabei war es vor allem wichtig, die Böden in den Messkabinen zu durchfeuchten, da sie im Vergleich zu den im Außenbereich stehenden Böden keinen natürlichen Witterungs- bzw. Wetterbedingungen ausgesetzt waren und dadurch mehrere Monate keine Wasserzufuhr erhielten. Die Beregnung in den Messkabinen fand zwischen dem 18.7.2011 und dem 19.9.2011 statt. Die Beregnungsmenge basierte auf den mittleren Niederschlagssummen der Monate Juli (48 mm) und August (50 mm) im Raum Halle des Zeitraums 1961 – 1990 (Wetterstation Halle-Kröllwitz). Da Halle ebenfalls im Mitteldeutschen Trockengebiet liegt, sind die Daten der Wetterstation Halle-Kröllwitz vergleichbar mit den Klimadaten der Region Querfurter Platte. Es fand eine Verdoppelung der herangezogenen Niederschlagswerte statt, um ein Extremereignis zu simulieren. Doppelte Jahresniederschlagswerte wurden bereits in der Region Querfurter Platte von der fachbereichseigenen Wetterstation gemessen und stellen somit ein sehr wahrscheinliches Szenario dar. So ergab sich eine Niederschlagsmenge von 196 mm = 196 l/m². Dieser Wert wurde zur Fläche der einzelnen Monolithen (0,125 m²) ins Verhältnis gesetzt, woraus sich eine Gesamtberegnungsmenge von 24,5 l je Monolith für

den Berechnungszeitraum ergab. Da aufgrund des kontinentalen Einflusses ein Niederschlagsmaximum in den Sommermonaten erreicht wird, kann man davon ausgehen, dass es 8 – 10 Zyklonendurchzüge in den Monaten Juli und August gibt, wodurch 16 bis 20 Regenereignisse sehr wahrscheinlich sind. Aus diesem Grund wurden die Böden in den Messkabinen innerhalb des Zeitraums alle vier Tage mit jeweils 1,5 l (15mal) und das letzte Mal mit 0,5 l beregnet.

Eine der bereits vor der Durchführung des Experimentes erwarteten Fehlerquellen bildete der Randflusseffekt entlang der Monolithbewandung (FANK 2009). Zur Minimierung des Randflusseffektes wurde innerhalb eines Kreissegmentes mit einem Durchmesser von 28 cm, welches einen Abstand zur Monolithbewandung garantierte, beregnet. Des Weiteren wurde für die Beregnung eine manuell gefertigte Apparatur (mittlere Sickerrate 4,5 ml/s) verwendet, um einen Wasserstau an der Bodenoberfläche zu verhindern. Nach der allgemeinen Vorsättigung erfuhren die Monolithen unter Freiluftverhältnissen keine künstliche Wasserzufuhr, da die natürlichen Witterungsbedingungen im Untersuchungszeitraum als Vergleichsgröße genutzt werden sollten.

3.3 Tracer

Die Konzentration von Brilliant Blue FCF betrug 0,2 g/l. Insgesamt wurden innerhalb von zwei Monaten 4,9 g Brilliant Blue FCF auf jeden Monolithen aufgebracht. Neben der Simulation doppelter Niederschlagssummen für die Monate Juli und August hatte die mehrmalige Aufbringung des Tracers den Zweck, Einzelercheinungen in Bezug auf aktive Fließpfade zu relativieren. Da im Außenbereich keine künstliche Beregnung stattfand, wurden dort auf jeden Monolithen die 4,9 g Brilliant Blue FCF einmalig, unmittelbar nach einem Regenereignis am 13.7.2011 aufgebracht. Da es unter den natürlichen Witterungsbedingungen nicht möglich war, den Niederschlag durch ein im Durchmesser kleineres Kreissegment zu leiten, konnte man hier dem erwarteten Randflusseffekt entlang der Monolithbewandung nicht entgegenwirken. Auf die zusätzliche Verwendung eines konservativen Tracers wurde verzichtet, da die Hintergrundkonzentration eines solchen die Adsorption von Brilliant Blue FCF verstärken kann (GERMÁN-HEINS & FLURY 2000).

3.4 Abtragung

Im Anschluss an die Bewässerung fand im Zeitraum 4.10.2011 bis 5.12.2011 die schichtenweise Abtragung der acht Monolithen statt. Dies geschah in 3-cm-Schritten. Die Verwendung einer Wasserwaage gewährleistete die Horizontalität der Bodenoberfläche nach jedem Abtragungsschritt. Die Nachbearbeitung der jeweiligen Schicht erfolgte mit Hilfe eines Föhns und eines Pinsels, um die Bodenoberfläche ohne lose Rückstände fotografieren zu können. Die Aufnahme fand dann durch eine Nikon D70 und eine Canon PowerShot SX11S statt. Dazu wurde ein höhenverstellbares Stativ mit Lichtquelle verwendet, welches garantierte, dass sich während der Aufnahme weder der Aufnahmewinkel und der Lichteinfall noch der Abstand zur Bodenoberfläche änderte (Abb. 5a). Die Einstellung der Kameras erfolgte ebenfalls mit Hilfe einer Wasserwaage und zusätzlich durch ein Gitternetz mit 1 cm² Maschen (Abb. 5).

3.5 Bildanalyse

Im Anschluss an die Abtragung erfolgte die Bearbeitung der digitalen Bildaufnahmen am Computer mit Hilfe von Adobe PhotoShop CS5. Aufgrund der Nutzung des erwähnten Stativs waren nur geringe Korrekturen der Fotos in Bezug auf Aufnahmewinkel, Lichteinfall und Abstand zum Boden nötig.

Bei den Aufnahmen der Monolithen der Pararendzina wurde zunächst „Helligkeit und Kontrast“ zu jeweils 30 Prozent verstärkt und im Anschluss manuell „Tiefen und Lichten“ eliminiert. Die darauffolgende Konvertierung der Bilder in den HSV-Modus (Hue-Saturation-Value-Modus) fand statt, um die einge-

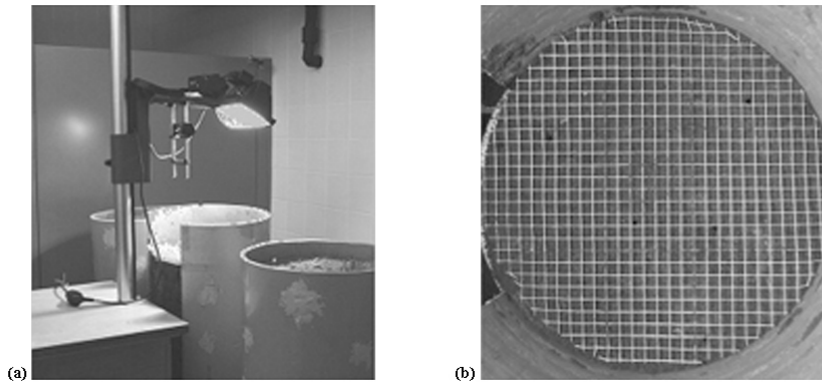


Abb. 5 Höhenverstellbares Stativ mit Lichtquelle (a) und Gitternetz mit 1 cm² Maschen (b).

Fig. 5 Tripod adjustable in height with a light source (a) and grid with 1 cm² meshes (b).

färbten Bereiche herauszufiltern. Hierbei fand die Bearbeitung der einzelnen Farbkanäle so statt, dass nur noch die eingefärbten Bereiche sichtbar waren. Im Anschluss wurden die Aufnahmen in „Graustufen“-Bilder umgewandelt und mit Hilfe der „Tontrennung“ auf zwei Farben reduziert. Die Verwendung des „Staub-und-Kratzer-Filters“ erfolgte zur Entfernung restlicher Störungen.

Bei der Schwarzerde hat sich das eingefärbte Material nicht so deutlich von der Umgebung abgesetzt, wodurch die Ergebnisse nach der oben beschriebenen Methode nicht realitätsnah waren. Somit war es nötig einen anderen Weg der Bearbeitung einzuschlagen. Als Erstes erfolgte die Entfernung der „Tiefen und Lichter“. Darauf wurden mit dem Auswahlwerkzeug „Farbbereich“ bei einer „Toleranz“ von 150 bis 100 die eingefärbten Bereiche ausgewählt, diese „getönt“ und die „Umgebung eliminiert“, um im Anschluss ebenfalls in „Graustufen“-Bilder umgewandelt und mit Hilfe der „Tontrennung“ auf zwei Farben reduziert zu werden. Auch hier erfolgte die Verwendung des „Staub-und-Kratzer-Filters“ zur Entfernung restlicher Störungen.

Da die Bilder selbst nur eine qualitative Aussage zulassen, wurde im Anschluss an die Bildbearbeitung mit Hilfe des Programms GSA Image Analyser die Verteilung der Farbwerte in Pixeln ermittelt. Die Einlesung und Auswertung der Daten fand dann in Excel 2010 statt, um eine Aussage über die quantitative Verteilung des Tracers in den Monolithen treffen zu können.

4 Ergebnisse

4.1 Bodenfeuchtedynamik – Tagesmittelwerte

In Abbildung 6a ist in Pararendzina 3 in 10 cm Tiefe eine perkolierende Zunahme der mittleren Bodenfeuchte innerhalb des Untersuchungszeitraumes von 38,6 Vol.% (17.7.) auf 40,7 Vol.% (21.9.), also um ca. 2 Vol.% zu erkennen. Die Tagesmittel schwanken entsprechend der Beregnungsrhythmik. An den Beregnungstagen findet so eine deutliche Zunahme der mittleren Bodenfeuchte statt. Während der darauffolgenden Tage nimmt der mittlere Wassergehalt wieder ab, bis er am nächsten Beregnungstag erneut ansteigt. Auch in 40 cm Tiefe erhöht sich die mittlere Bodenfeuchte an den Beregnungstagen deutlich, jedoch weist die Darstellung große Lücken auf, weil es aus technischen Gründen zu häufigen Ausfällen bei der Datenaufzeichnung kam.

In Abbildung 6b ist die mittlere Bodenfeuchte in Pararendzina 4 dargestellt. Hier ist nur eine sehr geringe Zunahme des Bodenwassergehaltes innerhalb des Untersuchungszeitraumes feststellbar. Verglichen mit

Pararendzina 3 ist die mittlere Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe deutlich geringer. Die Werte liegen hier zwischen 35,8 Vol.% (28.7.) und 37,70 Vol.% (16.9.) bei Pararendzina 4. Auch in 40 cm Tiefe liegen die Werte von Pararendzina 4 deutlich unter denen von Pararendzina 3. Bei Pararendzina 4 in 40 cm Tiefe schwanken die Tagesmittelwerte zwischen 30,6 Vol.% (23.7.) und 31,6 Vol.% (3.8.). Somit ist die Spannweite der mittleren Bodenfeuchte in 40 cm Tiefe mit ca. 1 Vol.% geringer als in 10 cm Tiefe mit rund 2 Vol.%. Auch in diesem Monolithen schwanken die Tagesmittelwerte entsprechend der Beregnungsrhythmik.

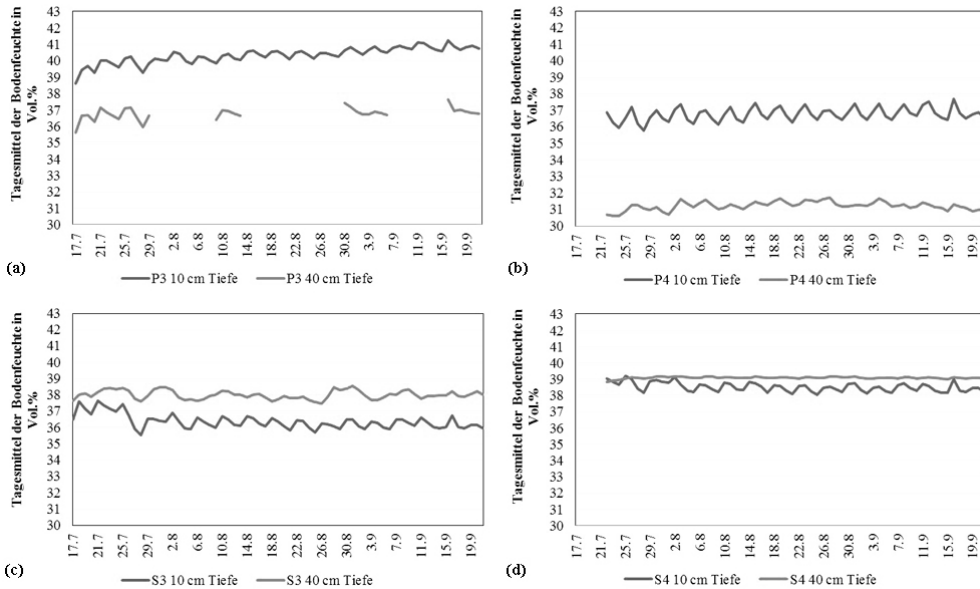


Abb. 6 Tagesmittel der Bodenfeuchte [Vol.%] vom 17.7.2011 bis 21.9.2011 in 10 cm (dunkelgrau) und 40 cm (hellgrau) Tiefe (a) Pararendzina 3, (b) Pararendzina 4, (c) Schwarzerde 3 und (d) Schwarzerde 4.

Fig. 6 Daily mean of soil moisture [Vol.%] from 17.7.2011 till 21.9.2011 in 10 cm (dark grey) and 40 cm (light grey) depth: Calcaric Cambisol (a) monolith 3 and (b) monolith 4; Haplic Chernozem (c) monolith 3 and (d) monolith 4.

Abbildung 6c zeigt die Dynamik der mittleren Bodenfeuchte in Schwarzerde 3. Hier fällt auf, dass im Gegensatz zu den Werten der Pararendzinen die Tagesmittel in 40 cm Tiefe höher sind als in 10 cm Tiefe. Dabei liegen die Werte in 40 cm Tiefe durchschnittlich 1,6 Vol.% über denen nahe der Bodenoberfläche. Die mittlere Bodenfeuchte in 40 cm Tiefe bewegt sich zwischen 37,5 Vol.% (26.8.) und 38,6 Vol.% (31.8.). Somit ist die Spannweite des mittleren Bodenwassergehaltes in 40 cm Tiefe mit 1 Vol.% nur halb so groß wie in 10 cm Tiefe. In Schwarzerde 3 in 10 cm Tiefe schwanken die Tagesmittel im Zeitraum 17.7. – 25.7. zwischen 36,5 Vol.% (17.7.) und 37,6 Vol.% (21.7.). Anschließend fällt die mittlere Bodenfeuchte bis zum 27.7. auf 35,9 Vol.% ab. Im verbleibenden Untersuchungszeitraum werden 37 Vol.% nicht mehr überschritten. Die Bodenfeuchtedynamik in 40 cm Tiefe weist keine Verluste dieser Art auf. Darüber hinaus entsprechen die Änderungen des mittleren Wassergehaltes in 40 cm Tiefe nicht der Beregnungsfrequenz. Im Vergleich zur Dynamik nahe der Bodenoberfläche sind die Änderungen des Wassergehaltes hier sehr träge und ungleichmäßig.

Abbildung 6d veranschaulicht die mittlere Bodenfeuchte von Schwarzerde 4. Auch hier sind die Tagesmittel in 40 cm Tiefe überwiegend höher als in 10 cm Tiefe. Nur am 22.7. (39,0 Vol.%) und am 25.7. (39,2 Vol.%) sind sie in 10 cm Tiefe geringfügig größer. Die Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe schwankt zwischen 38,0 Vol.%

(25.8.) und 39,2 Vol.% (25.7.). In 40 cm Tiefe bewegen sich die Werte zwischen 38,8 Vol.% (22.7.) und 39,2 Vol.% (30.7.). Mit Spannweiten von 1,2 Vol.% in 10 cm Tiefe und 0,4 Vol.% in 40 cm Tiefe perkolieren die Tagesmittel in Schwarzerde 4 im Vergleich zu den Werten der anderen Monolithen am geringsten.

Zusammenfassend zeigen die Tagesmittelwerte, dass in den Monolithen der Pararendzina in 10 cm Tiefe die Wassergehalte höher sind als in 40 cm Tiefe. In jenen der Schwarzerde sind die Bodenfeuchtwerte in 40 cm Tiefe hingegen vorwiegend höher als in 10 cm Tiefe. Außerdem sind die Werte in 40 cm Tiefe in den Monolithen der Schwarzerde höher als in denen der Pararendzina in 40 cm Tiefe. Weiterhin ist zu erkennen, dass beide Monolithen der Schwarzerde geringere Wassergehaltsunterschiede zwischen 10 cm Tiefe und 40 cm Tiefe aufweisen als die der Pararendzina. Darüber hinaus wird deutlich, dass in allen Monolithen in 10 cm Tiefe an den Beregnungstagen infolge der Wasserzufuhr ein deutlicher Anstieg der Bodenfeuchte stattfindet und innerhalb der anschließenden Tage der Wassergehalt wieder abnimmt. In 40 cm Tiefe sind die Anstiege infolge der Beregnung in allen Monolithen nicht so stark ausgeprägt wie in 10 cm Tiefe und zeigen ein eher unregelmäßigeres Dynamikmuster.

4.2 Bodenfeuchtedynamik – Beregnungsabschnitt 10.8.2011 – 14.8.2011

In Abbildung 7a ist die Bodenfeuchtedynamik von Pararendzina 3 dargestellt. In 10 cm Tiefe am 10.8. bleibt die Bodenfeuchte zunächst konstant bei 39,7 Vol.%. Zwischen 13:28 Uhr und 14:18 Uhr erhöht sich der Wassergehalt auf 41,6 Vol.%. In den folgenden 17 Stunden sinkt die Bodenfeuchte kontinuierlich auf 40,4 Vol.% ab. Die anschließenden drei Tage sind vor allem geprägt durch ein langsames und geringes Absinken des Wassergehaltes mit langen Phasen der Stagnation. Am 14.8. zwischen 14:28 Uhr und 14:43 Uhr erhöht sich die Bodenfeuchte im Zuge der nächsten Beregnung auf 41,7 Vol.%. Im weiteren Verlauf nimmt die Bodenfeuchte wieder kontinuierlich ab. In 40 cm Tiefe beträgt der Wassergehalt am 10.8. zunächst 36,2 Vol.%. Zwischen 13:42 Uhr und 14:51 Uhr steigt der Wert dann auf 39,7 Vol.% an. In den folgenden Tagen sinkt der Wert auf 36,3 Vol.% ab. Am 14.8. zwischen 14:48 Uhr und 15:45 Uhr erhöht sich der Wert dann erneut auf 39,0 Vol.%. Anschließend nimmt die Bodenfeuchte relativ kontinuierlich ab.

Abbildung 7b stellt die Bodenfeuchteentwicklung von Pararendzina 4 dar. Zu Beginn des 10.8. beträgt der Wassergehalt in 10 cm Tiefe 36,0 Vol.% und ändert sich bis 13:30 Uhr nicht. In den anschließenden 40 Minuten steigt er auf 38,3 Vol.% an. Im weiteren Verlauf nimmt die Bodenfeuchte langsam bis zum 14.8. ab. Zwischen 14:30 Uhr und 16:45 Uhr kommt es dann erneut zu einem stärkeren Anstieg des Wassergehaltes. Dabei erhöht sich der Wert auf 38,4 Vol.%. Im Anschluss sinkt die Bodenfeuchte wieder langsam ab. In 40 cm Tiefe beträgt der Wassergehalt am 10.8. zunächst 30,9 Vol.%. Zwischen 14:10 Uhr und 16:45 Uhr nimmt der Wassergehalt deutlich zu und erreicht sein Maximum von 31,8 Vol.%. Während der folgenden drei Tage nimmt die Bodenfeuchte langsam ab. Am 14.8. zwischen 14:55 Uhr und 17:30 Uhr nimmt der Wassergehalt durch die nächste Beregnung stärker zu. Das Maximum wird dann bei 32,0 Vol.% erreicht. Im Anschluss sinkt die Feuchte wieder langsam ab.

Abbildung 7c stellt die Bodenfeuchtedynamik von Schwarzerde 3 dar. Am 10.8. beträgt die Bodenfeuchte in 10 cm Tiefe zunächst 36,0 Vol.%. Der Wassergehalt steigt dann innerhalb von 10 Minuten zwischen 13:28 Uhr und 13:38 Uhr auf 41,9 Vol.% an. Im Anschluss nimmt die Bodenfeuchte wieder stark ab und sinkt auf 37,4 Vol.% innerhalb der nächsten 3,5 Stunden. In den darauffolgenden Tagen verringert sich der Wassergehalt langsamer. Am 14.8. zwischen 14:33 Uhr und 14:43 Uhr steigt er erneut auf 41,3 Vol.% an. In den folgenden drei Stunden sinkt die Feuchte rapide auf 37,4 Vol.% ab. Anschließend verringert sie sich langsamer. In 40 cm Tiefe liegt der Wassergehalt am 10.8. zunächst bei 38,0 Vol.%. Zwischen 13:43 Uhr und 14:13 Uhr kommt es zu einem stärkeren Anstieg der Bodenfeuchte um 0,7 Vol.%. Innerhalb der anschließenden 3 Tage nimmt der Wassergehalt langsam ab mit ausgedehnten Phasen der Stagnation. Am 14.8. zwischen 14:43 Uhr und 15:13 Uhr erhöht sich die Bodenfeuchte wieder um 0,5 Vol.% und verringert sich anschließend minimal.

Die Abbildung 7d zeigt die Bodenfeuchteentwicklung von Schwarzerde 4. Am 10.8. bleibt der Wassergehalt in 10 cm Tiefe zunächst konstant bei 38,2 Vol.%. Zwischen 13:35 Uhr und 13:45 Uhr nimmt die

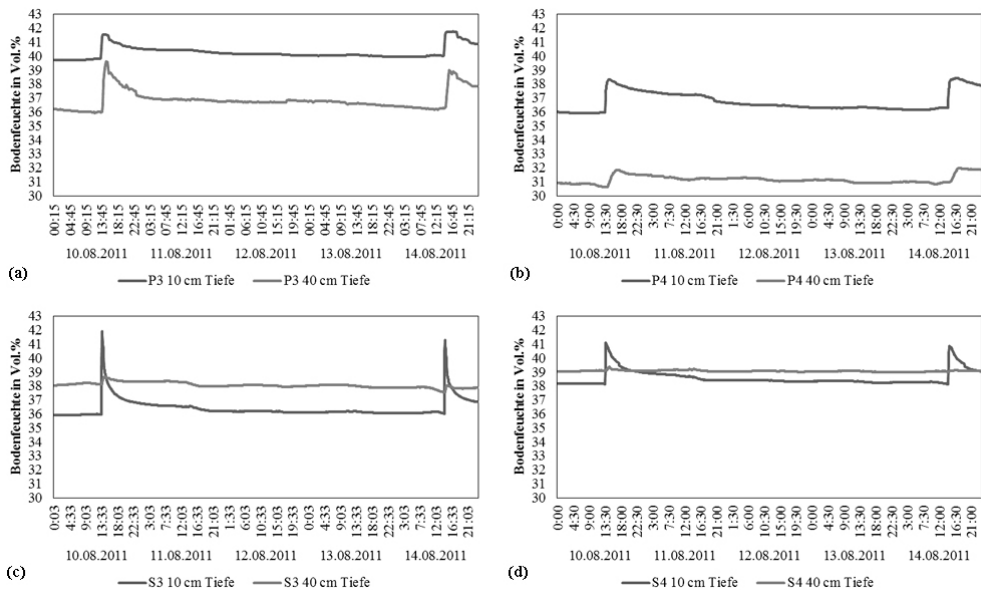


Abb. 7 Bodenfeuchte [Vol. %] vom 10.8.2011 bis 14.8.2011 in 10 cm (dunkelgrau) und 40 cm (hellgrau) Tiefe: (a) Pararendzina 3, (b) Pararendzina 4, (c) Schwarzerde 3 und (d) Schwarzerde 4.

Fig. 7 Soil moisture [Vol. %] from 10.8.2011 till 14.8.2011 in 10 cm (dark grey) and 40 cm (light grey) depth: Calcic Cambisol (a) monolith no. 3 and (b) monolith no. 4; Haplic Chernozem (c) monolith no. 3 and (d) monolith no. 4.

Bodenfeuchte deutlich zu, auf 41,1 Vol.%. In den anschließenden 3,5 Stunden sinkt der Wassergehalt relativ schnell wieder auf 39,5 Vol.% ab. Im weiteren Verlauf nimmt die Bodenfeuchte sehr langsam aber kontinuierlich ab und sinkt bis zum 14.8. auf 38,1 Vol.%. Zwischen 14:30 Uhr und 14:55 Uhr steigt sie dann erneut stärker an auf 40,9 Vol.% und nimmt dann in den nächsten zwei Stunden wieder auf 40,0 Vol.% ab. Im Anschluss reduziert sich der Wassergehalt langsamer. In 40 cm Tiefe liegt die Bodenfeuchte am 10.8. zunächst bei 39,0 Vol.%. Zwischen 14:10 Uhr und 14:45 Uhr steigt der Wassergehalt auf 39,4 Vol.% an. Innerhalb der nächsten drei Tage reduziert sich die Bodenfeuchte langsam auf 39,0 Vol.%. Die Abnahme wird dabei durch lange Phasen der Stagnation begleitet. Am 14.8. zwischen 14:50 Uhr und 16:45 Uhr kommt es zu einem geringen Anstieg um 0,2 Vol.%. Im Anschluss nimmt der Wassergehalt wieder langsam ab.

Zusammenfassend zeigen sich im Beregnungsabschnitt vom 10.8.2011 bis zum 14.8.2011 in den Monolithen der Schwarzerde in 10 cm Tiefe allgemein höhere und schnellere Anstiege der Bodenfeuchte als in denen der Pararendzina. Jedoch erfolgt die anschließende Abnahme in den Monolithen der Schwarzerde in 10 cm Tiefe ebenfalls rasanter als in denen der Pararendzina. In den Monolithen der Pararendzina in 10 cm Tiefe verläuft die Abnahme der Wassergehalte eher stockend. In 40 cm Tiefe ist zu erkennen, dass der Anstieg der Bodenfeuchte in den Monolithen der Pararendzina höher ist als in denen der Schwarzerde, hier sind in 40 cm Tiefe kaum Änderungen infolge der Beregnung festzustellen.

4.3 Farbtracerexperiment – Abtragung

Die Ergebnisse des Farbtracerexperimentes zeigen, dass Brilliant Blue FCF in den Monolithen der Pararendzina gut sichtbar ist. Hier gibt es keine Unterschiede in der Sichtbarkeit zwischen Außenbereich und

Messkabinen. In den Monolithen der Schwarzerde ist er in denen des Außenbereichs noch erkennbar. In denen der Messkabinen hebt er sich nicht mehr deutlich ab (Abb. 8).

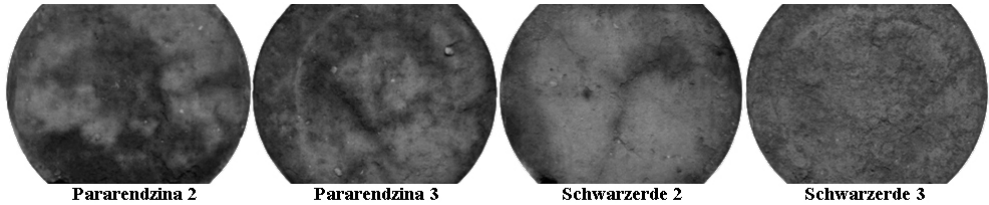


Abb. 8 Beispielbilder der Monolithen in 3 cm Tiefe (M 1:10).

Fig. 8 Examples of monoliths in 3 cm depth (scale 1:10).

Die an der Oberfläche aller Monolithen festgestellten Rissstrukturen sind größtenteils eingefärbt. Diese Rissstrukturen reichen bis in 6 cm Tiefe. In 9 cm Tiefe werden sie durch röhrenartige Makroporen biogenen Ursprungs abgelöst, welche nur noch vereinzelt Einfärbungen in den oberen Tiefen aufweisen (Abb. 9).

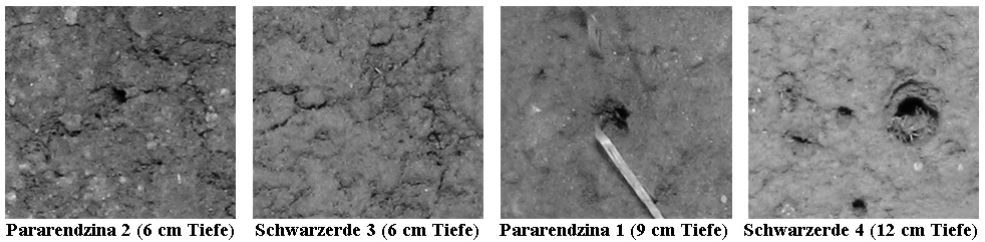


Abb. 9 Beispielausschnitte der Rissstrukturen und röhrenartiger Makroporen (M 1:0,8).

Fig. 9 Examples of crack structures and biogenic macro pores (scale 1:0,8).

4.4 Farbtracereperiment – Bildanalyse

Die Abbildungen 10a und 10e stellen die Ergebnisse der Bildanalyse von Pararendzina 1 dar. Die Oberfläche von Pararendzina 1 ist zu ca. 67 % eingefärbt. In 3 cm Tiefe steigt der Anteil an gefärbter Fläche auf rund 75 %, jedoch ist dieser auf die hohe Pixeldichte zurückzuführen, denn in der oberen Hälfte sind rechts und links Gebiete nicht eingefärbt. In 6 cm Tiefe nimmt der Flächenanteil nochmals um 0,5 % zu. In 9 cm Tiefe ist der Flächenanteil stark reduziert auf rund 16 %. Mit zunehmender Tiefe reduziert sich der gefärbte Flächenanteil weiter. In 24 cm Tiefe steigt dieser Anteil geringfügig an, von 1,3 % auf 1,5 %, und konzentriert sich vor allem auf einen kleinen Bereich in der oberen Hälfte. Dieser Bereich erweitert sich bis 30 cm Tiefe auf einen Flächenanteil von 1,8 %. In 33 cm Tiefe ist er nicht mehr vorhanden. In 51 cm Tiefe steigt der Flächenanteil gefärbter Areale wieder von 0,6 % auf 1,1 % und konzentriert sich jetzt vor allem auf die rechte untere Seite. Dieser Bereich dehnt sich entlang des rechten Randes weiter aus und hat in 57 cm Tiefe einen Flächenanteil von 5,6 %.

Die Ergebnisse der Bildanalyse für Pararendzina 2 sind in den Abbildungen 10b und 10f dargestellt. Bei Pararendzina 2 sind nur 24 % der Oberfläche gefärbt. In 3 cm Tiefe nimmt der Anteil dann rund 82 % der

Fläche ein. Allgemein herrscht eine hohe Pixeldichte vor. Jedoch gibt es zwischen Rand und Mitte auch eingefärbte Bereiche mit einer geringen Pixeldichte. In 6 cm Tiefe reduziert sich der Flächenanteil an gefärbten Arealen auf 68 %. Ihr Flächenanteil reduziert sich weiter mit zunehmender Tiefe. In 42 cm Tiefe sind nur noch 0,4 % der Fläche eingefärbt. In 45 cm Tiefe steigt der Flächenanteil wieder auf 0,9 %. Hier konzentriert sich der gefärbte Bereich am unteren rechten Rand. Dieser dehnt sich entlang des rechten Randes leicht aus mit zunehmender Tiefe.

Die Abbildungen 10c und 10g zeigen die Ergebnisse der Bildanalyse für Pararendzina 3. An der Oberfläche von Pararendzina 3 sind ca. 64 % des Arealen eingefärbt. In 3 cm Tiefe nimmt dieser Anteil auf knapp 72 % zu. Die flächendeckende Färbung des Bodens mit hoher Pixeldichte wird durch eine ungefärbte ringartige Struktur um den zentralen Bereich unterbrochen. In 6 cm Tiefe steigt der Anteil an gefärbter Fläche weiter auf 74 % an. In 9 cm Tiefe reduziert sich der Flächenanteil gefärbter Bereiche rapide auf 8 %. Mit zunehmender Tiefe verringert sich der Anteil an gefärbten Bereichen deutlich. In 24 cm Tiefe sind sie kaum noch auszumachen. In 30 cm Tiefe steigt ihr Flächenanteil leicht von 0,55 % auf 0,75 % an, wobei sich das eingefärbte Areal auf den oberen linken Randbereich beschränkt. In 33 cm Tiefe hat sich der Flächenanteil auf 2 % erhöht. Mit zunehmender Tiefe reduziert sich der Anteil an eingefärbten Bereichen wieder. In 48 cm Tiefe steigt der Flächenanteil abermals auf 2 % an. In 51 cm Tiefe ist der Flächenanteil weiter auf 2,3 % angestiegen und der Bereich hat sich entlang des linken Randes ausgedehnt.

In den Abbildungen 10d und 10h sind die Ergebnisse der Bildanalyse für Pararendzina 4 dargestellt. Bei Pararendzina 4 beträgt der Flächenanteil an gefärbtem Areal ca. 76 % an der Oberfläche. Dieser erhöht

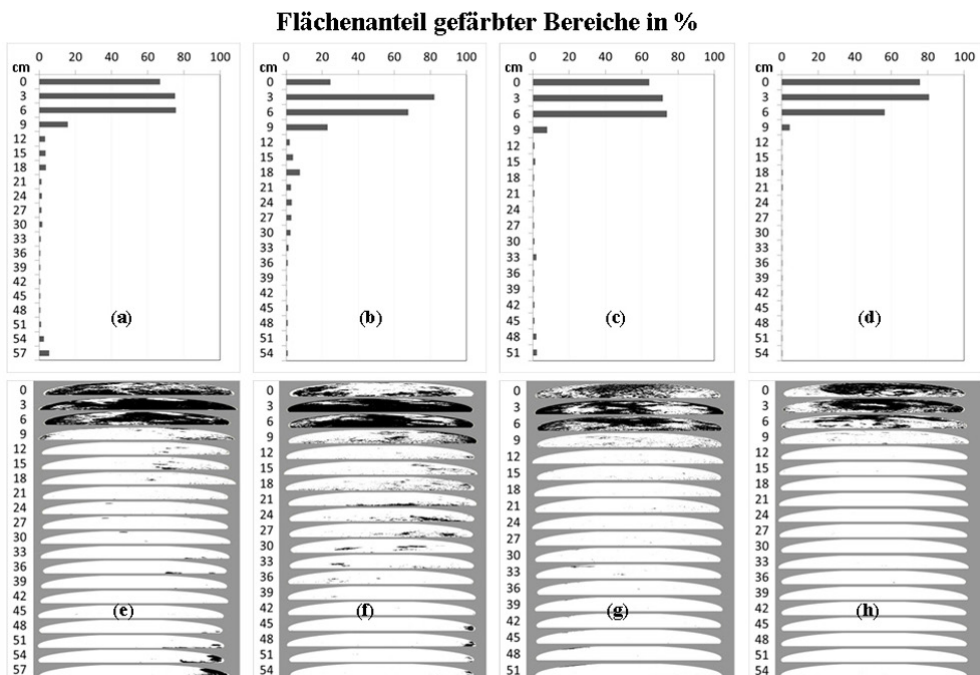


Abb. 10 Flächenanteil gefärbter Bereiche [%] (a) Pararendzina 1, (b) Pararendzina 2, (c) Pararendzina 3, (d) Pararendzina 4 und Ergebnisse der visuellen Bildanalyse (e) Pararendzina 1, (f) Pararendzina 2, (g) Pararendzina 3, (h) Pararendzina 4.

Fig. 10 Dyed areas [%] Calcaric Cambisol (a) monolith 1, (b) monolith 2, (c) monolith 3, (d) monolith 4; results of the visual picture analysis Calcaric Cambisol (e) monolith 1, (f) monolith 2, (g) monolith 3, (h) monolith 4.

sich in 3 cm Tiefe auf 81 %, wobei die Pixeldichte des eingefärbten Bereichs zunimmt. In 6 cm Tiefe sinkt der Flächenanteil auf 57 %. Dabei ist hauptsächlich die Pixeldichte geringer als in 3 cm Tiefe. Die gefärbten Bereiche sind somit gestreuter und kleiner. Nur im Bereich des Zentrums und in Richtung des oberen und des rechten Randes sind Verdichtungen zu sehen. In 9 cm Tiefe nimmt der Flächenanteil auf ca. 5 % ab. Es gibt nur noch kleine einzelne Verdichtungen und verstreute punktuelle Einfärbungen. Ab 12 cm Tiefe werden nur noch ca. 0,4 % der Fläche eingefärbt.

Die Ergebnisse der Bildanalyse von Schwarzerde 1 sind in den Abbildungen 11a und 11e dargestellt. Bei Schwarzerde 1 ist die Oberfläche zu 51 % gefärbt. In 3 cm Tiefe sinkt der Flächenanteil der Einfärbungen auf 34 %, wobei sich die eingefärbten Bereiche vor allem im Zentrum und am unteren rechten Rand verdichten. In 6 cm Tiefe nimmt der Anteil um 1 % zu. Die Einfärbungen im Zentrum sind kleiner, aber in den Randbereichen größer mit einer höheren Pixeldichte als in 3 cm Tiefe. In 9 cm steigt der Flächenanteil weiter auf 45 %. In 12 cm Tiefe reduziert sich der Flächenanteil auf 24 %. In 15 cm Tiefe steigt der Anteil gefärbter Bereiche auf 33 %, was insbesondere durch die Zunahme der Pixeldichte deutlich wird. Mit fortschreitender Tiefe verringert sich der Anteil an eingefärbten Bereichen. In 24 cm Tiefe betragen die Einfärbungen 3,31 %. Vor allem der obere und der gesamte rechte Randbereich sind mit einer relativ geringen Pixeldichte eingefärbt. Mit zunehmender Tiefe sinkt der Flächenanteil weiter. Ab 27 cm Tiefe sind nur noch vereinzelt Punkte zu sehen.

Die Abbildungen 11b und 11f zeigen die Ergebnisse der Bildanalyse von Schwarzerde 2. Die Oberfläche von Schwarzerde 2 ist zu ca. 88 % eingefärbt. In 3 cm Tiefe sind bei 61 % vor allem die Randbereiche und die Mitte gefärbt. Streifenförmig ziehen sich eingefärbte Bereiche vom Zentrum in Richtung des Randes durch ungefärbte Bereiche. In 6 cm Tiefe beschränken sich die eingefärbten Bereiche hauptsächlich auf die Ränder. Der Flächenanteil der eingefärbten Bereiche beträgt 41 %. In 9 cm Tiefe sinkt der Anteil auf 37 %. Die Bereiche verteilen sich halbmondartig entlang des Randes mit der höchsten Pixeldichte in der unteren Hälfte. Mit zunehmender Tiefe nimmt der Flächenanteil langsam ab. Ab 36 cm Tiefe sind dann keine Färbungen mehr auszumachen.

Die Ergebnisse der Bildanalyse von Schwarzerde 3 sind in den Abbildungen 11c und 11g dargestellt. An der Oberfläche von Schwarzerde 3 beträgt der Flächenanteil der Einfärbung ca. 36 %. In 3 cm Tiefe ist dieser bereits auf 83 % gestiegen. In 6 cm Tiefe nimmt die Pixeldichte weiter zu. Der Flächenanteil der Einfärbung nimmt einen Wert von 92 % an. In 9 cm Tiefe reduziert sich die Pixeldichte wieder bei einem Flächenanteil von 87 %. Mit zunehmender Tiefe nimmt der Flächenanteil langsam ab. In 18 cm Tiefe steigt er kurz von 14 % auf 17 % an. Mit der Tiefe sinkt der Flächenanteil an Einfärbungen wieder. Dieser beträgt in 36 cm Tiefe 0,6 % und nur noch ein kleiner Bereich nahe dem oberen Rand ist mit geringer Pixeldichte eingefärbt. Ab 42 cm Tiefe sind kaum bis keine Einfärbungen mehr zu erkennen.

In den Abbildungen 11d und 11h sind die Ergebnisse der Bildanalyse von Schwarzerde 4 dargestellt. Die Oberfläche von Schwarzerde 4 ist zu 54 % gefärbt. In 3 cm Tiefe nehmen die eingefärbten Bereiche nur noch einen Anteil von rund 36 % ein. In 6 cm Tiefe sinkt der Flächenanteil auf 8 %. In 9 cm Tiefe hat die Dichte weiter abgenommen und die Einfärbungen nehmen einen Flächenanteil von 5 % ein. In 12 cm Tiefe hat der Anteil wieder zugenommen und liegt bei rund 10 %. Bis 51 cm Tiefe nehmen Dichte und Flächenanteil kontinuierlich ab. In 54 cm Tiefe steigt der Flächenanteil wieder leicht von 0,4 % auf 0,5 % an. Am unteren rechten Rand ist eine leicht gestreute Einfärbung auszumachen. Diese bleibt bis in 60 cm Tiefe erhalten.

Die Bildanalyse zeigt, dass sich in den Monolithen der Pararendzina der größte Flächenanteil an gefärbten Bereichen in den oberen 9 cm befindet. Mit zunehmender Tiefe setzt eine rasante Flächenabnahme an gefärbten Bereichen ein. Bis auf in Pararendzina 4 findet in allen Monolithen der Pararendzina ein erneuter Anstieg des Flächenanteils an eingefärbten Bereichen in der Tiefe statt. Dabei beschränken sich die Einfärbungen auf die Randbereiche. In den Monolithen der Schwarzerde sind ebenfalls in den oberen 9 cm die größten Einfärbungen feststellbar. Jedoch erfolgt die Abnahme des Flächenanteils mit der Tiefe langsamer als in den Monolithen der Pararendzina. Nur in der Schwarzerde 4 ist ein erneuter Anstieg des Flächenanteils an eingefärbten Bereichen in der Tiefe zu erkennen. Wie in den Monolithen der Pararendzina beschränkt sich die Einfärbung auf einen kleinen Randbereich.

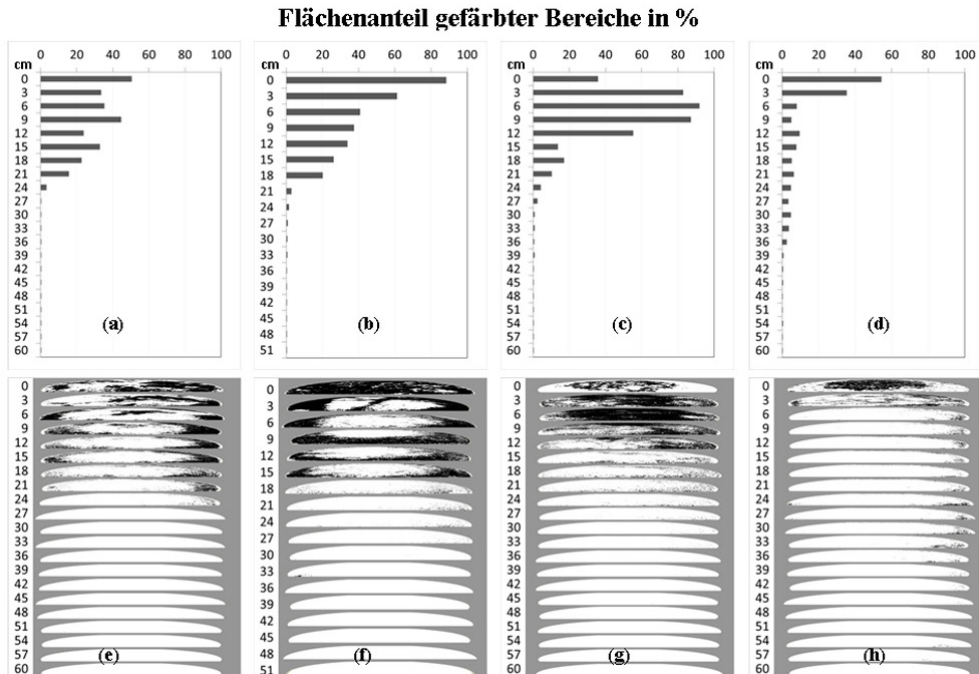


Abb. 11 Flächenanteil gefärbter Bereiche [%] (a) Schwarzerde 1, (b) Schwarzerde 2, (c) Schwarzerde 3, (d) Schwarzerde 4 und Ergebnisse der visuellen Bildanalyse (e) Schwarzerde 1, (f) Schwarzerde 2, (g) Schwarzerde 3, (h) Schwarzerde 4.

Fig. 11 Dyed areas [%] Haplic Chernozem (a) monolith 1, (b) monolith 2, (c) monolith 3, (d) monolith 4; results of the visual picture analysis Haplic Chernozem (e) monolith 1, (f) monolith 2, (g) monolith 3, (h) monolith 4.

5 Diskussion

5.1 Bodenfeuchtedynamik

Die volumetrische Wassergehaltsbestimmung durch FDR-Sonden zeigt, dass eine allgemein bessere Durchfeuchtung in den Monolithen der Schwarzerde stattgefunden hat. Ein Grund ist das vorherrschende Krümelgefüge, welches in der Schwarzerde bis zum unteren Abschluss der Monolithen reicht. In der Pararendzina wird dieses in 32 cm Tiefe von einem Subpolyedergefüge abgelöst. Bei diesem sind die Matrixzwischenräume weniger am Wassertransport beteiligt als in einem Krümelgefüge. Ferner spricht der höhere Anteil an organischer Substanz und Schluff in der Schwarzerde für eine bessere Aufnahmefähigkeit der Matrix. Folglich liegt in der Schwarzerde eher ein Matrixfluss vor als in der Pararendzina. Das würde wiederum erklären, warum die Schwankungen des Wassergehaltes in 40 cm Tiefe in der Schwarzerde so gering sind, denn ein Matrixfluss ist grundsätzlich langsamer als ein präferentieller Fluss. Betrachtet man jedoch die allgemeine Zeitspanne, in der das Wasser von 10 cm Tiefe in 40 cm Tiefe abgeführt wurde, so ist bei beiden Böden ein relativ schneller Transport des Wassers festzustellen. Dies lässt auf einen zumindest zeitweise vorhandenen präferentiellen Fluss in beiden Böden schließen.

Im Verlauf der Untersuchung zeigte sich ein allgemeiner Anstieg der Bodenfeuchte in den Monolithen der Pararendzina. In der Schwarzerde war dies nicht feststellbar. Der Grund hierfür war, dass die Pararendzina

vor dem Experimentbeginn stärker ausgetrocknet war als die Schwarzerde, weshalb die Vorsättigung der Monolithen der Pararendzina nicht ausreichte und die Bodenfeuchte erst im Laufe der Zeit anstieg.

Bei der Interpretation der Befunde ist zu berücksichtigen, dass die volumetrische Wassergehaltsbestimmung mit Hilfe der FDR-Sonde maßgeblich durch Lagerungsdichte, Tongehalt und organische Substanz beeinflusst wird. PLAGGE et al. (1994) fanden heraus, dass der Wassergehalt bei organischen Substraten so oft unterschätzt wird, wenn man die Sonden nach den Angaben für mineralische Böden eicht. Dies kann im vorliegenden Fall jedoch ausgeschlossen werden, da die Sonden zu Beginn der Aufzeichnung auf die vorhandenen Substrate geeicht wurden. Ferner kann es zu einer Unterschätzung der Bodenfeuchte durch mechanische Widerstände wie Steine und größere Wurzeln kommen. Die Signal- und Schild-Leiter der FDR-Sonden weichen den Widerständen aus, und es entstehen sogenannte Randspalten, die bereits bei wenigen Millimetern Durchmesser das Signal fast vollständig auslöschen können. Da es sich bei den untersuchten Böden um Ackerstandorte handelt, kann eine Verzerrung der Bodenfeuchtegehalte durch größere Wurzeln als Widerstand ausgeschlossen werden. In der Pararendzina ist eine Unterschätzung des Wassergehaltes denkbar, weil in den ersten 30 cm höhere Skelettgehalte ermittelt wurden und in allen Tiefen Steine mit Durchmessern über 6 cm vorhanden waren. Unabhängig von den genannten Faktoren findet durch den Einbau der Sonde jedoch immer eine gewisse Störung des Bodens statt. Nach BOHL (1996) wird als Folge dieser Störung das Porenwasser in unmittelbarer Umgebung der Leiter der FDR-Sonden verdrängt. Dies bezieht sich auf eine wandernde Bodenfeuchteermittlung. Da es sich in der Untersuchung um eine kontinuierliche Messung handelte, kann davon ausgegangen werden, dass sich der Einfluss der beschriebenen anfänglichen Störung im Verlauf der Untersuchung verringert hat. Schlussfolgernd können die in der Literatur beschriebenen Ursachen für Verzerrungen der Messwerte in dieser Untersuchung fast vollständig ausgeschlossen werden. Da bei der Werkskalibrierung der Messfehler von ± 5 Vol.% betragen kann und bei der Kalibrierung mit dem zu untersuchenden Substrat nur eine Messgenauigkeit von ± 2 Vol.% möglich ist, stellen die ermittelten Daten eine Annäherung an die reale Bodenfeuchtedynamik dar.

5.2 Farbtracerexperiment

Das Farbtracerexperiment zeigt, dass in der Schwarzerde Brilliant Blue FCF in den Messkabinen nicht deutlich hervortritt. Ursache für den geringen Kontrast ist die dunkle Eigenfarbe des Bodensubstrates der Schwarzerde. Die unterschiedliche Sichtbarkeit des Farbstoffes in Monolithen des gleichen Bodens lässt sich daraus erklären, dass die Monolithen der Messkabinen feuchter waren als die des Außenbereichs und feuchte Böden grundsätzlich dunkler sind als trockene. In den Monolithen der Pararendzina hebt sich das durch Brilliant Blue FCF eingefärbte Bodenmaterial hingegen deutlich von dem nicht gefärbten Bodenmaterial ab. Es sind auch keine Unterschiede in der Intensität des Kontrastes zwischen den Monolithen des Außenbereichs und denen der Messkabinen feststellbar. Vergleicht man Pararendzina und Schwarzerde miteinander, sieht man, dass das Bodenmaterial der Pararendzina weitaus heller ist, was die Sichtbarkeit des Farbstoffes im Boden begünstigt. Daraus lässt sich schließen, dass Brilliant Blue FCF besser geeignet ist zur Visualisierung der Fließwege in einem farblich helleren Boden in Bezug auf die Kontraststärke zum Bodenmaterial.

Die fehlende Wasserzufuhr in den Monaten vor dem Experiment hat in den Monolithen der Messkabinen zu einer starken Austrocknung des Bodenmaterials und daraus resultierend zur Ausbildung von Rissstrukturen geführt. Im Außenbereich waren die Böden zwar den natürlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt, jedoch hatten sie eine relativ regengeschützte Position, was auch hier zur Austrocknung und Rissbildung geführt hat. Trotz der Vorsättigung haben sich die Rissstrukturen nicht zurückgebildet. Dies lässt auf eine Gefügeänderung schließen, denn diese Rissstrukturen wurden größtenteils vom Wasser als bevorzugte Bahnen benutzt und eingefärbt. Die in 9 cm Tiefe anschließenden röhrenartigen Makroporen waren kaum eingefärbt. Dies macht deutlich, dass sie nur vereinzelt mit den Rissstrukturen in Verbindung standen und der Farbstoff hauptsächlich in den oberen Schichten adsorbiert wurde. Fraglich ist jedoch, in wie weit dies den realen Wassertransport darstellt. Das Wasser könnte auch die röhrenartigen Makroporen genutzt haben, ohne sie einzufärben.

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel festgestellt wurde, ist ein Randflusseffekt in den Monolithen des Außenbereichs aufgetreten. In den Messkabinen ist dieser weitgehend durch die Beregnung innerhalb des Kreissegments verhindert worden. Somit wird deutlich, dass die Verwendung eines solchen Kreissegments zur Beregnung in Monolithen diesen Durchmessers für diese methodischen Untersuchungsansätze sehr sinnvoll ist.

Die Apparatur zur Beregnung (manuell angefertigtes Sieb) sollte jedoch optimiert werden, da es teilweise schneller Wasser nachlieferte als in den Boden infiltrieren konnte. Besonders betroffen war der Monolith Pararendzina 4. Die verlangsamte Infiltration in Pararendzina 4 erklärt auch die geringe Verlagerung des Farbstoffes in die Tiefe, im Unterschied zu den anderen Monolithen. Das Bodensubstrat hatte mehr Zeit durch die stockende Infiltration den Farbstoff zu adsorbieren.

Ob die wiederholte Beregnung mit der Brilliant Blue FCF-Lösung sinnvoll war, ist in diesem Kontext allerdings fraglich. Die angenommene bessere Darstellung der Fließbewegung von Wasser im Boden kann an dieser Stelle nicht bestätigt werden, da sich das Verhalten des Farbstoffes im Boden lediglich durch den verringerten Randflusseffekt in den Monolithen der Messkabinen unterschied, was nicht auf die Häufigkeit der Beregnung zurückzuführen ist.

Da sich das von Brilliant Blue FCF eingefärbte Material in der Schwarzerde farblich schlecht von dem ungefärbten Bodenmaterial abhob, ist über alternative Tracer zur Visualisierung der Fließpfade des Wassers im Boden nachzudenken. HANGEN (2003) verwendete auf einem dunklen Kippboden Jodid als Tracer. Zur Sichtbarmachung des Jodid-Tracers ist jedoch die zusätzliche Aufbringung eines Bleichmittels auf die tracerbehandelte Bodenoberfläche nötig. Es könnte aber auch eine Erhöhung der Konzentration des im Wasser gelösten Brilliant Blue FCF das visuelle Nachweisen in der Schwarzerde verbessern. Dazu müssten allerdings weiterführende Experimente zur Konzentrationshöhe durchgeführt werden. Darüber hinaus sollte die zusätzliche Verwendung eines konservativen Tracers in Betracht gezogen werden, auch wenn dieser die Adsorption von Brilliant Blue FCF an den festen Bodenbestandteilen erhöhen könnte.

Die Bildanalyse stellt in diesem methodischen Sachzusammenhang grundsätzlich nur eine Näherung dar. Jedoch reduziert sie den notwendigen Aufwand im Vergleich zu klassischen Analyse-Methoden deutlich. Die heterogenen Transportprozesse können durch Brilliant Blue FCF gut visualisiert werden, ohne eine hohe Anzahl an Daten ermitteln zu müssen. Des Weiteren liefert die Pixelauszählung ein semiquantitatives Ergebnis über die vertikale Verteilung des Tracers. Im Fall der Monolithen der Schwarzerde sind die Ergebnisse der Bildanalyse jedoch fraglich, da sich der Farbstoff kaum von der Umgebung abgesetzt hat und zu einer alternativen Bildbearbeitung gezwungen werden musste. Im Rahmen der eigenen Arbeit wurde versucht Standards für die Farbbereichsauswahl und die Toleranzbereiche festzulegen. Jedoch waren diese ab einer gewissen Tiefe nicht mehr verwendbar, da sie ein falsches Abbild der Realität zeigten. Somit mussten die Toleranzbereiche manuell nach subjektiver Wahrnehmung verändert werden, was wiederum den allgemeinen Fehler erhöht haben kann. Um die Methode jedoch als aussagekräftig oder unbrauchbar bewerten zu können, sind auch hier weitere Untersuchungen notwendig.

5.3 Vergleichbarkeit der Methoden FDR-Sonde und Farbtracer

Grundsätzlich handelt es sich bei den verwendeten Methoden um eine quantitative (FDR) und eine qualitative bzw. semiquantitative (Farbtracer) Methode.

Um eine qualitative Aussage durch FDR-Sonden zu erhalten, müsste die Dichte der Messpunkte erhöht werden. Dies wiederum erhöht jedoch die Störung des Bodens durch das Einführen der Sonden, d.h. die Anzahl der durch die FDR-Sonden erzeugten horizontalen Makroporen würde erhöht werden. Folglich würden die Ergebnisse hierdurch einen hohen Fehlerquotienten beinhalten.

Ein klarer Vorteil der volumetrischen Wassergehaltsbestimmung mit Hilfe von FDR-Sonden gegenüber der Verwendung eines Farbtracers ist die Erfassung und die Darstellung der Bodenfeuchtedynamik über einen mehr oder weniger langen Zeitraum. Mit einem Farbtracer kann die zeitliche Dimension nicht

dargestellt werden. Darüber hinaus kann das Experiment nicht an gleicher Stelle wiederholt werden, weil der Boden abgetragen werden muss um die Bewegung des Tracers visuell festhalten zu können. Jedoch lässt sich die räumliche Dimension mit Brilliant Blue FCF darstellen, was mit einer FDR-Sonde nur mit Einschränkungen erfolgen kann.

Der Quantifizierungsversuch des durch das Farbtracerexperiment gewonnenen qualitativen Datenmaterials mittels einer Pixelauszählung ergab somit nur semiquantitative Ergebnisse. Dies begründet sich daraus, dass bereits die Visualisierung durch Bildaufnahme und -bearbeitung nur eine Annäherung an die Realität darstellt.

6 Fazit

Ein Ziel der Untersuchung war es festzustellen, ob Matrixflüsse oder präferentielle Flüsse in den Böden vorhanden waren bzw. welcher der beiden Flüsse dominierte. Es stellte sich heraus, dass sowohl ein Matrixfluss vorlag als auch präferentielle Fließpfade vom infiltrierten Wasser genutzt wurden. Resultierend aus der besseren Durchfeuchtung des Bodenmaterials der Schwarzerde fanden Matrixfluss und präferentieller Fluss hier zeitweise parallel statt, ohne dass einer der Flüsse dominierte. In der Pararendzina hingegen dominierte der präferentielle Fluss stets, was auf die schlechtere Wasseraufnahmefähigkeit der Bodenmatrix zurückzuführen ist.

Des Weiteren wurde untersucht, ob durch die FDR-Methode in Bezug auf das Fließverhalten von Wasser im Boden qualitativ gleichwertige Ergebnisse wie durch die Visualisierung mit Brilliant Blue FCF erzielt werden. Es zeigte sich, dass hier die Messdichte der punktuellen volumetrischen Wassergehaltsbestimmung mittels FDR-Sonden zu gering war. Die Ergebnisse ermöglichten somit nur allgemeine Vorstellungen über das Fließverhalten von Wasser im Boden. Somit kann eine qualitative Aussagekraft der FDR-Sonden nicht bestätigt werden.

Parallel wurde untersucht, ob eine Quantifizierung der qualitativen Daten des Farbtracerversuches mit Brilliant Blue FCF möglich ist. Damit konnte allerdings nur semiquantitatives Datenmaterial erstellt werden, weil bereits die Visualisierung durch Bildaufnahme und -bearbeitung nur eine Annäherung an die Realität darstellt.

Ferner stellte sich heraus, dass die Anwendung von Brilliant Blue FCF bei dieser Untersuchung zum Fließverhalten in den Monolithen der Schwarzerde keine optimalen Ergebnisse lieferte. Für zukünftige Studien empfiehlt sich daher die Verwendung eines anderen Farbtracers. Die Eignung von Brilliant Blue FCF für dunkle Böden sollte jedoch nicht gänzlich ausgeschlossen und Versuche mit einer höheren Konzentration des Farbstoffes im Beregnungswasser in Betracht gezogen werden.

Da sich Brilliant Blue FCF in der Pararendzina deutlich abhob, ist der Farbstoff in Bezug auf Visualisierung, Toxizität, Adsorptionsverhalten, Anschaffungskosten und Analyseaufwand in den meisten Böden der beste Kompromiss. Auch die FDR-Sonde eignet sich zur punktuellen Darstellung der Bodenfeuchtedynamik. In Kombination geben beide Methoden ein mehr oder weniger gutes Abbild der räumlichen und zeitlichen Verteilung von in den Boden infiltriertem Niederschlag wieder.

7 Zusammenfassung

KRAUSS, L., SCHMIDT, G., ZIERDT, M., FRÜHAUF, M.: Experimentelle Bestimmung präferenzierter Fließpfade infiltrierten Niederschlags am Beispiel einer Schwarzerde und einer Pararendzina der Querfurter Platte. - Hercynia N.F. 46 (2013): 21 – 40.

Für die Analyse der Fließbewegung infiltrierten Niederschlags im Boden wurden der Farbtracer Brilliant Blue FCF und die FDR-Methode verwendet. Ein Ziel der Untersuchung war es herauszufinden, wie sich das Wasser in Böden bewegt und ob es Unterschiede im Fließverhalten gibt. Gleichzeitig fand

ein Vergleich der obengenannten Methoden statt. Die Untersuchung wurde in jeweils vier Monolithen einer Schwarzerde und einer Pararendzina der Querfurter Platte durchgeführt. Zwei Monolithen je Boden wurden in Messkabinen untergebracht und von Juli bis September 2011 künstlich bewässert. Die anderen Monolithen wurden im Außenbereich des Universitätsgeländes der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg angesiedelt und waren den natürlichen Witterungsbedingungen im Untersuchungszeitraum ausgesetzt. Die Resultate zeigen, dass in der Schwarzerde präferentieller und Matrixfluss vorlagen, ohne dass einer der beiden Fließarten dominierte. In der Pararendzina dominierte der präferentielle Fluss hingegen stets. Die Methodenanalyse zeigte, dass in dieser Untersuchung die quantitativen Ergebnisse der FDR-Methode keine qualitativen Aussagen erlauben. Der Quantifizierungsversuch der durch das Farbtracerexperiment gewonnenen qualitativen Ergebnisse ergab nur semiquantitatives Datenmaterial. Ferner stellte sich heraus, dass im Rahmen dieser Untersuchung Brilliant Blue FCF zum Fließverhalten von Wasser in den Monolithen der Schwarzerde keine optimalen Ergebnisse lieferte.

8 Danksagung

Dank geht an Herrn Dr. Michael Zierdt für die fachliche Unterstützung und an Herrn Thomas Thienelt, der so freundlich war, die Parameter und Profilbilder der Böden zu überlassen. Für die Unterstützung im Labor Dank an Herrn Michael von Hoff, Frau Silke Kurze und Herrn Bernd Wendt.

9 Literatur

- BOHL, H. (1996): Eichung der TDR zur Wasserbestimmung in Böden auf Basis gemischt-dielektrischer Modelle. - Bodenökologie u. Bodengenese 22. – Tech. Univ. Berlin.
- CHIFFLARD, P., GAIL, S., ZEPP, H. (2003): Untersuchungen zur räumlichen Variabilität der Oberbodenfeuchte in Abhängigkeit von Relief und Boden. - Innovative Feuchtemessung in Forschung u. Praxis 1: 283-306.
- ECOTECH UMWELT-MESSSYSTEME GMBH (1999): Theta-Sonde ML2x. Bedienungsanleitung. - Bonn.
- FANK, J. (2009): Tracerhydrologie in der Lysimetrie. - In: Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (Hrsg.): Tagungsband, 13. Gumpensteiner Lysimetertagung: S. 63-68.
- FLURY, M., FLÜHLER, H. (1994): Brilliant Blue FCF as a dye tracer for solute transport studies – a toxicological overview. – J. Environ. Quality 23: 1108-1112.
- GERMÁN-HEINS, J., FLURY, M. (2000): sorption of Brilliant Blue in soils as affected by pH and ionic strength. - Geoderma 97: 87-101.
- HANGEN, E. (2003): Präferentieller Fluss in einem heterogenen aufgefrosteten Kippboden. - Cottbuser Schriften zu Bodenschutz u. Rekultivierung 19. – Techn. Univ. Cottbus.
- HÖTLING, B., COLDEWEY, W.G. (2009): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. - München.
- KÄSS, W. (2004): Geohydrologische Markierungstechnik. - In: Matthes, G. (Hrsg.): Lehrbuch der Hydrogeologie 9. – Gebr. Borntraeger, Stuttgart.
- KNOBLAUCH, S. (1996): Wasser- und Stofftransport über präferentielle Fließbahnen in Böden – eine Literaturübersicht. - WasserWirtschaft 86 (11): 589-602.
- KRAUSS, L. (2012): Experimentelle Bestimmung präferenzierlicher Fließpfade infiltrierten Niederschlags am Beispiel einer Schwarzerde und einer Pararendzina der Querfurter Platte. - Dipl.arb., Univ. Halle-Wittenberg.
- LVERMGEO (2003): Sachsen-Anhalt: messen, planen, orientieren, Karten neu erleben und interaktiv fliegen. Top50 Version 4. M 1:50.000.
- <http://cdnetz.bibliothek.uni-halle.de/NetManBin/nmwebclt.asp?CONFIGID=TOP500D&DT=6&LANGUAGE=German> (02.12.2012).
- PLAGGE, R. ROTH C., RENGER, M. (1994): Kontinuierliche Messung des Bodenwassergehaltes im Feld und Labor mittels der Time Domain Reflectometry (TDR). - Abschlussber. d. DFG-Forschungsvorhabens RE 422/14-1 (unveröff. Manusk.).
- SCHAEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. – Springer Spektrum, Heidelberg.
- THIENELT, T. (2008): Analysedaten von Schwarzerde und Pararendzina der Querfurter Platte. - Halle (unveröff. Manusk.).

Manuskript angenommen: 27. Juni 2013

Adressen der Autoren:

Lydia Krauß

Dr. rer. nat. Gerd Schmidt

Dr. rer. nat. Michael Zierdt

Prof. Dr. Dr. h.c. Manfred Frühauf

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften, Von-Seckendorff-Platz 4, 06120 Halle(Saale)

E-Mail: lydia_krauss@gmx.de

gerd.schmidt@geo.uni-halle.de

michael.zierdt@geo.uni-halle.de

manfred.fruehauf@geo.uni-halle.de

