

Universität Leipzig
Fakultät für Physik- und Geowissenschaften
Institut für Geographie

**Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitung von Ackerflächen
auf den sickerwassergebundenen Stofftransport**
Untersucht mit Hilfe von Experimenten an Bodensäulen

Diplomarbeit
Zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Geograph

vorgelegt von:
Frank Zimmermann

1. Gutachter: Prof. Dr. habil Hans Neumeister
2. Gutachter: Dr. Walter A. Schmidt

Leipzig, den 16.04.2003

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich ehrenwörtlich, die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Gedanken in der Arbeit kenntlich gemacht zu haben.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials habe ich Unterstützungsleistung von folgender Institution erhalten:

1. Freistaat Sachsen, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (SLfL)

Ich erkläre mich einverstanden, dass diese Diplomarbeit nach positiver Begutachtung in der Zweigstelle Geographie der Universitätsbibliothek Leipzig zur Verfügung steht.

Mir ist bekannt, dass jede Weitergabe meiner Diplomarbeit bzw. deren Ergebnisse an Dritte oder eine Publikation der Zustimmung des ersten Gutachters sowie der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft bedarf.

Frank Zimmermann

Leipzig, 16.04.2003

Danksagung

Den nachfolgend genannten Personen möchte ich für ihren Beitrag zum Gelingen meiner Diplomarbeit besonders danken.

Herrn Prof. Dr. Hans Neumeister (Institut für Geographie) für die Betreuung meiner Diplomarbeit. Er hat mir für die konzeptionelle und inhaltliche Gestaltung sehr viel Freiraum gelassen und stand jederzeit für interessante und anregende Gespräche bereit.

Herrn Dr. Walter (Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft) danke ich für die Bereitstellung des Themas, die Betreuung dieser Arbeit und die wertvollen Anregungen und Hinweise.

Den Mitarbeitern des FB 4 der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Referat Rekulтивierung und Bodenschutz danke ich für das nette und angenehme Arbeitsklima. Dabei möchte ich Herrn Berno Zimmerling für die in allen Belangen stets ungebrochene Diskussionsbereitschaft und konstruktive Zusammenarbeit ganz besonders danken. Weiterhin danke ich Herrn Dr. Hans Lippold für die Unterstützung bei der Durchführung der chemischen Analysen der Proben.

Dem Praktikanten Herrn Leif Heimfahrt danke für die Hilfe bei der Probenahme und der Durchführung der bodenphysikalischen Untersuchungen.

Frau Karin Bikfalvi (Bibliothekarin) danke ich für die Mithilfe bei Recherchen und die Beschaffung entsprechender Literatur.

Weiterer Dank an die Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft für die zur Verfügung gestellten Mittel und Daten.

Der Südzucker AG danke ich für die Bereitstellung der Versuchsfläche.

Herzlich danken möchte ich meiner Kommilitonin Dana Pietsch für die freundschaftliche Hilfe und die vielen wertvollen Anregungen.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Freundin Mandy Klotz für ihre Geduld und Motivation sowie ihrer Mitarbeit bei der Anfertigung des Manuskriptes danken. Meiner Familie danke ich für die moralische und finanzielle Unterstützung meines Studiums.

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Gleichungsverzeichnis.....	VI
1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	1
2 WISSENSSTAND ZUM WASSERGEBUNDENEN STOFFTRANSPORT IN ACKERBÖDEN... 4	4
2.1 WASSERBEWEGUNG IM BODEN	4
2.1.1 Infiltration.....	4
2.1.2 Bodenmatrix und Makroporensystem.....	8
2.2 BODENWASSERGEBUNDENER STOFFTRANSPORT	12
2.2.1 Die Konvektions-Dispersion-Gleichung	12
2.2.2 Einfluss des Makroporenflusses auf den Stofftransport	15
2.3 BEEINFLUSSUNG DES WASSER- UND STOFFTRANSPORTES DURCH DIE BODENBEARBEITUNG.....	16
2.4 METHODEN	19
2.4.1 Messtechniken	19
2.4.2 Tracerversuche.....	21
3 DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET..... 23	23
3.1 LAGE, AUSGANGSSUBSTRAT FÜR DIE BODENBILDUNG, BÖDEN UND KLIMA	23
3.2 FLÄCHENNUTZUNG UND EIGENSCHAFTEN DER VERSUCHSFLÄCHEN	26
4 MATERIAL UND METHODEN..... 30	30
4.1 GEWINNUNG UNGESTÖRTER BODENSÄULEN SOWIE STECHZYLINDER- UND MISCHPROBEN	30
4.2 DIE TRACERVERLAGERUNGSEXPERIMENTE.....	32
4.2.1 Das Beregnungsexperiment	32
4.2.1.1 Versuchsaufbau	32
4.2.1.2 Bodensäulenvorbehandlung und Durchführung des Versuches	34
4.2.2 Der Überstauversuch	35
4.2.2.1 Versuchsaufbau	35
4.2.2.2 Bodensäulenvorbehandlung und Durchführung des Versuches	37
4.2.3 Der Farbtracerversuch	38
4.3 TRACERANALYTIK.....	39
4.4 ERMITTLUNG DER BODENWASSERBEWEGUNG, DER DICHTEN UND DES PORENVOLUMENS AN DEN BODENSÄULEN.....	40
5 DAS STOFFTRANSPORTEXPERIMENT UND SEINE ERGEBNISSE..... 42	42
5.1 BODENPHYSIKALISCHE KENNGRÖßEN DER BODENSÄULEN	43
5.1.1 Trockenrohddichte	43
5.1.2 Gesamtporenvolumen	45
5.1.3 Wassergehalt bei pF 1,8.....	46
5.1.4 Gesättigte Wasserleitfähigkeit	47
5.2 DIE TRACERVERLAGERUNG BEIM BEREGNUNGSVERSUCH	48
5.2.1 Beschreibung der Durchbruchskurven.....	50
5.2.2 Wiederfindungsrate	52
5.2.3 Gesamtdurchflussrate	54
5.3 DIE TRACERVERLAGERUNG BEIM ÜBERSTAUVERSUCH.....	56
5.3.1 Beschreibung der Durchbruchskurven unter gesättigten Bedingungen	56
5.3.2 Wiederfindungsraten.....	58
5.4 DER FARBTRACERVERSUCH	60
5.4.1 Untersuchung von Randeffekten	60
5.4.2 Fließwege und Stofftransportpfade.....	62

6	DISKUSSION	64
6.1	BODENPHYSIK	64
6.1.1	Trockenrohichte	64
6.1.2	Gesamtporenvolumen	66
6.1.3	Wassergehalte bei pF 1,8	67
6.1.4	Gesättigte Wasserleitfähigkeit	68
6.2	ABHÄNGIGKEIT DES STOFFTRANSPORTES VON DEN VORBEDINGUNGEN UND DER BODEN- BEARBEITUNG	70
6.2.1	Direktsaat	71
6.2.2	Konservierende Bodenbearbeitung	72
6.2.3	Konventionelle Bodenbearbeitung	72
6.2.4	Zusammenfassung	73
6.3	VERSUCHSMETHODIK	74
6.3.1	Der Beregnungsversuch	75
6.3.2	Der Überstauversuch	75
7	FAZIT	77
8	LITERATURVERZEICHNIS	80
9	ANHANG	87

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BS	Bodensäule
cm WS	cm Wassersäule
C-org	organischer Kohlenstoffgehalt
D	Bodenbearbeitungssystem Direktsaat
GPV	Gesamtporenvolumen
ha	Hektar
hPa	Hektopascal
HPLC	High Pressure Liquid Chromatograph
I	Infiltration
KAS	Kalkammonsalpeter
kF	kF-Wert; gesättigte Wasserleitfähigkeit
M	Bodenbearbeitungssystem Mulch
Masse-%	Prozentanteil an der untersuchten Gesamtmasse
MW	Mittelwert
µm	Mikrometer
N-Düngung	Stickstoffdüngung
NN	Normal Null
NS	Niederschlag
P	Bodenbearbeitungssystem Pflug
pF	pF-Wert; Maß für die Saugspannung des Wassers im Boden
PVC	Polyvinylchlorid
PV	Porenvolumen
R	Retardationsfaktor
Stabw	Standardabweichung
SZ	Stechzylinder
TDR	Time Domain Reflectometry
UV	Ultraviolett
Vol-%	Prozentanteil am untersuchten Gesamtvolumen
Wf.-rate	Wiederfindungsrate
<u>Institutionen</u>	
AG Boden	Arbeitsgemeinschaft Boden
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
FB4	Fachbereich 4 der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft
KA 4	Kartieranleitung 4. Auflage der AG Boden
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
SLfL	Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Schema der Wasserflüsse in einem ungestörten Boden mit Makropore.	10
Abb. 2: Schema zur Erklärung der mechanischen Dispersion	13
Abb. 3: Stadien (a, b, c) der Stoffverlagerung im ungestörten Boden mit Makroporen bei eingeschränktem Austausch zwischen Bodenmatrix und Makroporensystem	15
Abb. 4: Böden und Bodenbearbeitungssysteme des Versuchsstandortes	24
Abb. 5: Temperaturgang an der Klimamessstation Spröda von Januar 1999 bis Juni 2002	25
Abb. 6: Niederschlagsgang an der Klimamessstation Spröda von Januar 1999 bis Juni 2002	25
Abb. 7: Messtransect für die Probenahme	31
Abb. 8: Schema der Beregnungsanlage.....	33
Abb. 9: Entwässerung der Bodensäulen auf Feldkapazität	34
Abb. 10: Schema der Überstauanlage	36
Abb. 11: Prinzip einer Durchbruchskurve.....	39
Abb. 12: Schematische Darstellung der Größen für die Berechnung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (K_p) der Bodensäulen an der Überstauanlage.....	41
Abb. 13: Beschreibung der Größen eines Boxplots	42
Abb. 14: Oberflächen der drei Bearbeitungsvarianten.....	43
Abb. 15: Trockenrohdichte der Bodensäulen.....	44
Abb. 16: Gesamtporenvolumen der Bodensäulen.....	46
Abb. 17: Wassergehalt der Bodensäulen bei $pF_{1,8}$	47
Abb. 18: Gesättigte Wasserleitfähigkeit der Bodensäulen.....	48
Abb. 19: Beregnungsversuch: Durchbruchskurven der Varianten Direktsaat, Mulch und Pflug	49
Abb. 20 Beregnungsversuch: Mittlere Durchbruchskurven.....	51
Abb. 21: Mittlere Austrittszeit des ersten Perkolates aus den Bodensäulen	51
Abb. 22: Wiederfindungsraten von Bromid beim Beregnungsversuch.....	55
Abb. 23: Gesamtdurchflussraten beim Beregnungsversuch.....	55
Abb. 24: Überstauversuch: Durchbruchskurven der Varianten Direktsaat, Mulch und Pflug	57
Abb. 25: Überstauversuch: Mittlere Durchbruchskurven	58
Abb. 26: Wiederfindungsraten von Chlorid beim Überstauversuch	60
Abb. 27: Farbtracerversuch an Bodensäulen - keine Randeefekte nachweisbar	61
Abb. 28: Einfärbung der Bodenmatrix im Bereich einiger Makroporen.....	61
Abb. 29: Einfärbung der Bodenmatrix in der Lockerungsschicht der Variante Konservativ	61
Abb. 30: Eingefärbte Makropore (Direktsaat)	62
Abb. 31: Farbtracerverlagerung Mulch.....	63
Abb. 32: Farbtracerverlagerung Pflug.....	63

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Definitionen der Makroporen.....	9
Tabelle 2: Körngrößenverteilung der bodenbildenden Sedimente.....	24
Tabelle 3: Fruchtfolge des Standortes Zschortau.....	26
Tabelle 4: Acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen auf der Versuchsfläche.....	27
Tabelle 5: Bodenart und Kornfraktionen im Untersuchungszeitraum Frühjahr 2001.....	27
Tabelle 6: Humusgehalt, Gehalt an organischem Kohlenstoff (C-org.) und pH-Werte im Untersuchungszeitraum April 2001.....	28
Tabelle 7: Aggregatstabilität vom 05.06.2002.....	28
Tabelle 8: Trockenrohddichte, gesättigte Wasserleitfähigkeit, Gesamtporenvolumen und Wassergehalt bei Feldkapazität im Untersuchungszeitraum Juni/Juli 2002.....	28
Tabelle 9: Makroporendichte: Anzahl vertikaler Poren pro $m^2 > 1$ mm; Untersuchungs- zeitraum: November 2000.....	29
Tabelle 10: Bodenphysikalische Kennwerte der Bodensäulen.....	45
Tabelle 11: Wiederfindungsraten von Bromid.....	53
Tabelle 12: Wiederfindungsraten von Chlorid.....	59
Tabelle 13: Trockenrohddichten der Stechzylinderproben und der Bodensäulen.....	65
Tabelle 14: Gesamtporenvolumen der Stechzylinderproben und der Bodensäulen.....	66
Tabelle 15: Wassergehalte bei pF 1,8 der Stechzylinderproben und der Bodensäulen.....	67
Tabelle 16: Gesättigte Wasserleitfähigkeit der Stechzylinderproben und der Bodensäulen.....	68

GLEICHUNGSVERZEICHNIS

Gleichung 1: Darcy Gesetz	6
Gleichung 2: Kontinuitätsgleichung.....	7
Gleichung 3: Richards Gleichung (eindimensionaler Fluss).....	7
Gleichung 4: Konvektiver Stofffluss.....	12
Gleichung 5: Dispersive Flussdichte.....	13
Gleichung 6: Konvektions-Dispersions-Gleichung.....	14
Gleichung 7: Formel für die Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit nach Umstellung des Darcy Gesetztes	40
Gleichung 8: Formel für die Berechnung der gesättigten Wasserleitfähigkeit der Bodensäulen.....	40

1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Ziel der Landwirtschaft ist es, mit möglichst geringem Energie- und Kostenaufwand einen optimalen Ertrag bei guter Produktqualität zu erzeugen. Gleichzeitig sind hierbei die Funktionen des Bodens nachhaltig in ihrer Leistungsfähigkeit zu erhalten bzw. wiederherzustellen. Um das zu unterstützen, wurde 1998 das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) verabschiedet, welches in §17 (2) "die Bodennutzung im Rahmen der guten fachlichen Praxis" festlegt. Diese fordert eine nachhaltige Sicherung der Leistungsfähigkeit und Fruchtbarkeit der Böden als natürliche Ressource (HEISLER et al. 1998).

Durch standortbedingte Gegebenheiten und die heute praktizierte Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen treten Probleme durch Bodenerosion und dem damit verbundenen Stoffaustrag durch Oberflächenabspülung auf. In Sachsen sind ca. 60 % der landwirtschaftlichen Fläche erosionsgefährdet (STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT 1999). Wie in zahlreichen Forschungsarbeiten belegt wurde, leistet die konservierende Bodenbearbeitung (nicht wendende bzw. pfluglose Bearbeitung) einen wirksamen Beitrag zum Bodenschutz (SCHMIDT et al. 2000, 2001 und 2002; NITZSCHE et al. 2000; BRUNOTTE/ SOMMER 2001; HORN et al. 2001; KRÜCK et al. 2001; ZIMMERLING et al. 2001). Von der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (SLfL), Fachbereich Bodenkultur und Pflanzenbau, werden seit einigen Jahren Untersuchungen zu pflanzenbaulichen Maßnahmen und zum Wasserhaushalt auf dauerhaft konservierend bearbeiteten Ackerflächen durchgeführt. Einen Untersuchungsschwerpunkt der SLfL bildet dabei ein nördlich von Leipzig befindlicher Ackerstandort (Zschortau), der seit 1997 unterschiedlich bewirtschaftet wird (1. konventionell mit dem Pflug, 2. konservierend pfluglos und 3. ohne Bodenbearbeitung durch Direktsaat). Bisherige Untersuchungen auf diesem Standort zeigen, dass eine langjährig unterschiedliche Intensität der Bearbeitung einerseits Auswirkungen auf die Bodenstruktur und die Tragfähigkeit, und andererseits auch auf das Bodenleben und die Durchwurzelung hat.

Wenige Erkenntnisse liegen jedoch über die Auswirkungen der verschieden intensiv bearbeiteten Böden in Bezug auf den vertikalen Wasser- und Stofftransport vor. Sowohl der Wassertransport, als auch die dadurch möglicherweise verursachte vertikale Stoffverlagerung sind entscheidend von der Struktur und Funktionalität des Porensystems abhängig. Eine Differenzierung der Porenstruktur durch die verschiedenen Bewirtschaftungsmethoden ist nur auf langjährig angelegten Versuchsflächen möglich. Außerdem ist sie standortabhängig und bodenartspezifisch unterschiedlich. Für Löß- und Lehmstandorte liegen zahlreiche Belege vor, dass unterschiedliche Bodenbearbeitungsverfahren zu unterschiedlichen

Porenstrukturen führen (BEISECKER 1994; EHLERS 1996). Auf dauerhaft konservierend bearbeiteten Flächen kann es über einen höheren Makroporenfluss zu verstärktem Stoffaustrag kommen (BEISECKER 1994; NORDMEYER/ ADERHOLD 1995; SHIPITALO et al. 2000).

Um genauere Erkenntnisse bezüglich des Stoffaustrages auf konservierend bestellten Flächen zu erhalten, sollen in dieser Diplomarbeit die Auswirkungen einer langjährig unterschiedlichen Bodenbearbeitung auf den Wasserhaushalt und dem damit verbundenen Stofftransport in der Ackerkrume untersucht werden. Dabei wird ein Hauptaugenmerk auf den Makroporenfluss gelegt. Es wird von der Hypothese ausgegangen, dass sich bei langjährig konservierender bzw. fehlender Bodenbearbeitung (Direktsaat) in der Ackerkrume (bis 30 cm) eine stabile Porenstruktur mit einem größeren Anteil an kontinuierlichen Makroporen (vertikal verlaufende, durchgängige Poren von der Ackerkrume bis in tiefere Bodenschichten) entwickelt, welche den Wasser- und Stofftransport im Boden beeinflussen. Hierzu werden drei unterschiedliche Bodenbearbeitungsvarianten untersucht und miteinander verglichen.

Im Rahmen der Arbeit wird geprüft, ob die positiven Effekte konservierender Bodenbearbeitung (bessere Infiltration, geringere Oberflächenverschlammung und Erodibilität der Oberböden, etc.) negativ auf die Filterfunktion (schnellere und tiefere Wasser- und Stoffverlagerung z.B. durch Makroporenfluss) der Böden wirken. Hierfür soll eine Versuchsmethodik entwickelt werden, die in Abhängigkeit von differenzierten Vorbedingungen die Wasser- und Stoffflüsse quantifizieren kann.

Bezüglich dieser Zielstellung ergeben sich folgende Untersuchungsschwerpunkte:

1. Auswertung vorliegender Untersuchungsergebnisse für den Standort Zschortau (z.B. Makroporendichte, Infiltration etc.)
2. Untersuchungen zur Boden- und Porenstruktur der verschieden bearbeiteten Teilflächen am Standort Zschortau an Stechzylinderproben im Labor
3. Entwicklung einer Methode zur Ermittlung des Wasser- und Stofftransportes an Bodensäulen (Berechnungs- und Überstauversuche)
4. Beprobung von Bodensäulen und Ermittlung des Wasser- und Stofftransportes im Oberboden unter standardisierten Bedingungen in Abhängigkeit vom Bodenbearbeitungssystem. Prüfung verschiedener Szenarien:

- normaler Fall: ungesättigter Boden, Tracer in der Bodenmatrix, Niederschlagsintensität kleiner als die Infiltrationskapazität (Beregnungsversuch)
 - worst case-Versuch: gesättigter Boden mit Wasserüberstau, Tracer wird der Bodensäule als Lösung zugeführt (Überstauversuch)
5. Nachweis der hydraulischen Wirksamkeit von Makroporen und Prüfung auf Randeffekte durch Anwendung eines Farbtacers
 6. Auswertung der Durchbruchkurven, um die Wasser- und Stoffverlagerung zu beschreiben und abzuschätzen
 7. Kritische Betrachtung und Fehleranalyse der durchgeführten Methoden

2 WISSENSSTAND ZUM WASSERGEBUNDENEN STOFFTRANSPORT IN ACKERBÖDEN

Stoffverlagerung in Böden (z.B. Nährstoffe und Pflanzenschutzmittel) ist in der Regel an das Wasser gebunden. Damit gibt es einen direkten Zusammenhang zwischen der Wasserbewegung und der Stoffverlagerung. In diesem Sinn soll zunächst auf den entscheidenden Prozess der Wasserbewegung eingegangen werden.

2.1 WASSERBEWEGUNG IM BODEN

Das Wasser im Boden ist selten in einem statischen Gleichgewicht, da Niederschläge, Evapotranspiration und Wasseraufnahme durch Pflanzen (letztere zwei sollen hier nicht näher erläutert werden) das Einstellen des Gleichgewichtes ständig unterbrechen. Bodenwasser ist daher meist in Bewegung, in Richtung zum niedrigsten Potential (EHLERS 1996). Das trifft sowohl für den wassergesättigten Grund- und Stauwasserbereich als auch für die wasserungesättigte Zone oberhalb der Grundwasseroberfläche zu (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1992).

Nach NORDMEYER/ ADERHOLD (1995) wird das Fließverhalten von verschiedenen Faktoren beeinflusst. So können bodenart- und bodenstrukturbedingte unterschiedlich durchlässige Bereiche im Bodenprofil auftreten (z.B. Horizontgrenzen oder Sandlinsen). Daneben weisen strukturierte Böden häufig biogene Poren (Tier- und Wurzelgänge) und Risse (z.T. witterungsbedingt) auf, welche das Fließgeschehen beeinflussen. Aber auch Dichte- und Viskositätsunterschiede des Wassers, eingeschlossene Luft sowie hydrophobe Bodenpartikel tragen zu einem ungleichmäßigen Fließen bei. Laut GISI (1990) variiert die Wasserbewegung in natürlichen Böden sehr stark; schon innerhalb weniger Meter sind Unterschiede von ein bis zwei Zehnerpotenzen möglich.

2.1.1 Infiltration

Die bodenabwärts gerichtete Wasserbewegung wird maßgeblich durch die Infiltration bestimmt. Nach HARTGE/ HORN (1991) kennzeichnet die Infiltration das Vorrücken des Wassers im Bodenprofil, solange der Wassernachschub von der Bodenoberfläche anhält. Die Umverteilung des Wassers nach Beendigung der Wasserzufuhr bis zum Einstellen eines Gleichgewichtszustandes wird Redistribution genannt. Als Infiltrationsrate wird der Verlauf der Infiltration beschrieben, welche die versickerte Wassermenge pro Zeiteinheit an-

gibt. Entscheidend beeinflusst wird der Verlauf der Infiltration von der Art der Veränderung der Wasserleitfähigkeit bei wechselndem Wassergehalt, vom Porenvolumen und vom Anfangswassergehalt des Bodens vor der Infiltration sowie durch das Ausmaß der Verschlammung, welche von der Gefügestabilität der Bodenoberfläche abhängt (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL 1992). BENNECKE (1996) nennt weitere Gründe, welche die Infiltration beeinflussen: Bodenart, Bodenstruktur, Verdichtungsgrad des Bodens, Porengrößenverteilung, Hangneigung, Niederschlagsintensität sowie Streuauflage und Bewuchs.

Während der Infiltration lässt sich nach HARTGE/ HORN (1991) die vertikal gerichtete Ausbreitung des Wassers im Boden in drei Zonen unterteilen: Sättigungs-, Transport- und Befeuchtungszone. Die Sättigungszone liegt direkt unter der Bodenoberfläche und nimmt nur wenige Zentimeter in der Tiefe ein. Voraussetzung für die Bildung einer Sättigungszone ist die ausreichende Wasserzufuhr. In der Transportzone sind die Wassergehalte vom Anfangswassergehalt, von der Wasserzufuhr und von der hydraulischen Leitfähigkeit dieser Bodenschicht abhängig. Die Ausdehnung der Transportzone nimmt im Vergleich zur Sättigungszone stark zu. Der Transportzone schließt sich die Befeuchtungszone an, deren Bodenwasser in Abhängigkeit vom Anfangswassergehalt recht tief und schnell in den Boden eindringt.

Das Vorrücken der Befeuchtungsfront ist am Anfang der Infiltration sehr groß, nimmt aber mit fortschreitender Zeitdauer exponentiell ab. Hauptursache hierfür ist die Auffüllung des im Boden vorhandenen Speicherraumes für Wasser, was eine stetige Verringerung des für die Wasserbewegung im Boden verantwortlichen hydraulischen Gradienten zur Folge hat. Aber auch Oberflächenverschlammung, Quellvorgänge, Dichteunterschiede, Verstopfung von Poren oder Kompression eingeschlossener Luft führen zu einer Abnahme der Infiltrationsrate (BEISECKER 1994; EHLERS 1996; UHLIG 2001). Die Infiltrationsrate wird im Verlauf der Infiltration immer schwächer, bis sie eine relativ konstante Endinfiltrationsrate erreicht, welche bei gleichbleibender Wasserzufuhr von der geringsten Leitfähigkeit des Bodenkompiments bestimmt wird. Bei stark verschlammten Bodenoberflächen wird die Endinfiltrationsrate durch die Durchlässigkeit der Verschlammungsschicht charakterisiert (BEISECKER 1994).

Die Wasserbewegung im Boden findet hauptsächlich in der Bodenmatrix entlang des Gefälles von Matrix- und Gravitationspotential statt. Laut KNOBLAUCH (1996) wird Sickerwasser in homogenen Böden erst nach vollständiger Sättigung des Bodens durch erneute Wasserzufuhr gebildet. Das im Boden vorhandene Wasser wird dadurch sukzessive nach unten gedrängt. Dieser Verdrängungsprozess geht in der Regel sehr langsam vonstatten.

Es gibt zahlreiche Gleichungen und Modelle, welche die Wasserbewegung im Boden beschreiben. Am einfachsten wird die Wasserbewegung mit Hilfe des Darcy-Gesetzes (vgl. Gleichung 1) dargestellt. Darcy wies experimentell nach, dass sich die Menge Wasser, welche sich in einer Zeiteinheit [s] durch einen definierten Fließquerschnitt [cm²] bewegt, dem Gradienten des hydraulischen Potentials (Matrix- + Gravitationspotential) direkt proportional verhält (ZACHARIAS 1999).

Gleichung 1: Darcy Gesetz (nach BAUMGARTNER/ LIEBSCHER 1996)

$$q = -K \cdot \frac{d\psi_h}{dz}$$

q	<i>Flussrate</i>	(cm/s)
K	<i>hydraulische Leitfähigkeit</i>	(cm/s)
ψ_h	<i>hydraulisches Potential</i>	(cm)
z	<i>Ortskoordinate in vertikaler Richtung</i>	(cm)

Die Darcy-Gleichung beschreibt eindimensionale und stationäre Strömungen. Eine solche Strömung ist im Boden jedoch nur in sehr kleinen Ausschnitten und bei minimalen Fließstrecken vorhanden. Größere Bodenbereiche werden stets von anderen Strömungen beeinflusst und sind demzufolge nicht eindimensional. Die durchströmten Querschnitte sind, wie die Geschwindigkeitsverteilungen, nicht mehr konstant. Für die Beschreibung eines solchen Strömungsfeldes ist die Darcy-Gleichung unzureichend, da wechselnde Fließquerschnitte bei konstanter Fließmenge veränderte Geschwindigkeiten erfordern (SCHEFFER/ SCHACHTSCHABEL 1992).

Für die Beschreibung instationärer Wasserbewegung im Boden ist - neben dem Gesetz von Darcy - die Kontinuitätsgleichung (vgl. Gleichung 2, Gleichung der Massenerhaltung) von Bedeutung. Sie sagt aus, dass in einem definierten Bodenvolumen die pro Zeiteinheit stattfindende Änderung des Bodenwassergehaltes den Zu- und Abflüssen entspricht (BAUMGARTNER/ LIEBSCHER 1996). Durch Einsetzen der Darcy-Gleichung (vgl. Gleichung 1) in die Kontinuitätsgleichung (vgl. Gleichung 2) ergibt sich die allgemeine Fließgleichung nach Richards (vgl. Gleichung 3, eindimensionaler Fluss). Es wird davon ausgegangen, dass der Boden ein starres, isotropes System ist, in welchem eindeutige Beziehungen zwischen dem Wasserhaushalt, dem Matrixpotential und der hydraulischen Leitfähigkeit bestehen (BEISECKER 1994; SCHEFFER/ SCHACHTSCHABEL 1992).

Gleichung 2: Kontinuitätsgleichung (nach BAUMGARTNER/ LIEBSCHER 1996)

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = -\frac{\delta q}{\delta z}$$

q	Flussrate	(cm/s)
θ	volumetrischer Wassergehalt	(cm ³ /cm ³)
z	Ortskoordinate in vertikaler Richtung	(cm)
t	Zeit	(s)

Gleichung 3: Richards Gleichung (eindimensionaler Fluss) (nach BAUMGARTNER/ LIEBSCHER 1996)

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \cdot \left(K \cdot \frac{\delta\psi_h}{\delta z} \right)$$

q	Flussrate	(cm/s)
K	hydraulische Leitfähigkeit	(cm/s)
ψ_h	hydraulisches Potential	(cm)
θ	volumetrischer Wassergehalt	(cm ³ /cm ³)
z	Ortskoordinate in vertikaler Richtung	(cm)
t	Zeit	(s)

Mit Hilfe der Richards-Gleichung (vgl. Gleichung 3) kann der Wassertransport in homogenen Böden sehr gut beschrieben werden.

Die meisten Böden besitzen jedoch eine sehr heterogene Porenstruktur, bei denen es zu einem dem Hauptwasserfluss der Bodenmatrix vorausseilenden schnellen Sickerwasserfluss (preferential flow) kommen kann (BEISECKER 1994; NORDMEYER/ ADERHOLD 1995; KNOBLAUCH 1996; SCHWARZ/ KAUPENJOHANN 2001). Dieser schnelle Sickerwasserfluss kann nach zwei Typen unterschieden werden (DEMUTH/ HILTPOLD 1993; NORDMEYER/ ADERHOLD 1995; KNOBLAUCH 1996; LIERMANN 1999; SCHWARZ/ KAUPENJOHANN 2001).

1. Bodenfinger: Aufgrund kleinräumiger Variabilitäten breitet sich in Böden mit unterschiedlich durchlässigen Zonen die Durchfeuchtungsfront zungen- oder fingerartig nach unten aus. Dies ist häufig an Horizontgrenzen oder bei Texturunterschieden innerhalb einer Bodenschicht (z.B. Tonlinsen) zu beobachten. Dieses Fließen ist nicht zwangsläufig von Makroporen abhängig, sondern es findet auch in der Bodenmatrix statt.
2. Makroporenfluss: Er findet in großen Poren (Bioporen), Spalten oder Rissen strukturierter Böden statt.

Die großen Poren sind aber nur dann am präferentiellen Fluss beteiligt, wenn eine vertikale Kontinuität der Poren besteht (KNOBLAUCH 1996). Laut NORDMEYER/ ADERHOLD (1995) können Makroporen im Bodenprofil erst dann größere Mengen an Wasser leiten, wenn es

zum Oberflächenabfluss oder zum Wasserstau innerhalb des Bodenkörpers kommt. Dies ist hauptsächlich im Winterhalbjahr oder nach langanhaltenden Starkregenfällen der Fall. Der Boden ist in dann gesättigt oder es tritt Infiltrationsüberschuss auf, so dass das Niederschlagswasser in das Makroporensystem eindringt und es zum schnellen laminaren Fluss (gleichmäßiger Fluss ohne Vermischung des Wassers) bis in tiefere Bodenschichten kommt.

2.1.2 Bodenmatrix und Makroporensystem

Makroporen sind Hohlräume der ungesättigten Bodenzone, die das Wasser schneller leiten als sich der Potentialgradient zur angrenzenden Matrix ausgleichen kann. Das Wasser in den Makroporen fließt turbulent, wird kaum durch Kapillarkräfte beeinflusst und eilt der Hauptinfiltrationsfront um einige Zentimeter pro Sekunde voraus (LIERMANN 1999).

Makroporen werden in der Literatur sehr unterschiedlich definiert. Zum einem werden Makroporen über den Äquivalentdurchmesser (in μm) bzw. über das Matrixpotential (in kPa) definiert und zum anderen durch funktionelle Definitionen beschrieben (LIERMANN 1999). In Tabelle 1 sind verschiedene Definitionen für Makroporen zusammengefasst.

Makroporen können durch die Tätigkeit der Bodenfauna, durch Pflanzenwurzeln, Schrumpfungs- und Gefrierprozesse, Verwitterung sowie durch innere Erosion entstehen. Das Ergebnis sind Spalten und Risse, Röhren und Kanäle sowie unregelmäßige Hohlräume (BEISECKER 1994; KNOBLAUCH 1996; SCHWARZ/ KAUPENJOHANN 2001).

Tabelle 1: Definitionen der Makroporen (nach LIERMANN 1999, S. 115)

Autoren	Definitionen und Äquivalentdurchmesser
Nelson, Bayer (1940)	Kapillardruck*: > -30 (hPa)
Marshall (1959)	Kapillardruck: > -100 (hPa) Durchmesser > 0,03 mm
Brewer (1964)	grobe Makroporen: Durchmesser 5 mm mittlere Makroporen: Durchmesser 2-5 mm feine Makroporen: Durchmesser 1-5 mm sehr feine Makroporen: Durchmesser 0,075-1 mm
Mc Donald (1967)	Kapillardruck: > -60 (hPa)
Bullock, Thomasson (1979) Webster (1974) Scheffer, Schachtschabel (1992)	Kapillardruck: > -50 (hPa); Durchmesser > 0,06 mm
Ranken (1974)	Kapillardruck: > -10 (hPa)
Reeves (1980)	ausgedehnte Makrospalten: 2-10 mm Makrospalten: 0,2-2 mm
Luxmoore (1981)	Kapillardruck: > -3 (hPa); Durchmesser > 1 mm
Beven, Germann (1981)	Durchmesser > 0,03 mm; bereits bei Regenintensitäten von 1-10 mm/h
Beven, Germann (1982)	Hohlräume, die das Wasser schneller leiten als sich der Potentialgradient zur angrenzenden Matrix ausgleichen kann; Funktionale Trennung in Poren der kapillaren und nicht kapillaren Wasserbewegung
Radulovich (1989)	Poren, die bei Feldkapazität entwässert sind
Bouma (1981)	Durchmesser > 2,5 mm Aufgrund unterschiedlicher Fließbedingungen kann weder die gesättigte Wasserleitfähigkeit noch ein einheitlicher Potentialgradient für ein repräsentatives Einheitsvolumen definiert werden
Hötzl et al. (1992)	Durchmesser > 2,5 mm
Wohlrab (1992)	Durchmesser > 2 mm

*Kapillardruck: aufgewendeter Druck, welcher nötig ist, damit das Wasser durch eine Kapillare mit bestimmter Größe fließt

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, reichen nach BEVEN/ GERMANN (1982) bereits Niederschlagsintensitäten von 1-10 mm/h aus, um einen Makroporenfluss zu verursachen. Ob es zu Makroporenfluss kommt, hängt aber auch von der Infiltrations- und Sickerleistung des Bodens ab. BEVEN/ GERMANN (1981) unterscheiden daher vier Situationen von Wasserflüssen in und auf Böden:

1. Wenn die Infiltrationskapazität der Bodenmatrix größer als die Niederschlagsintensität ist, kommt es ausschließlich zum Matrixfluss.
2. Ist die Infiltrationskapazität der Bodenmatrix erschöpft, aber nicht die des Makroporensystems, kommt es zum Makroporenfluss. Gleichzeitig findet ein lateraler Wasserfluss von den Wänden der Makroporen in die Bodenmatrix statt.

3. Übersteigt die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität von Bodenmatrix und Makroporensystem, kommt es zusätzlich zum Oberflächenabfluss.
4. Ist die Bodenmatrix in der Umgebung einer Makropore gesättigt, kann es zu einem Übergang von Wasser aus der Bodenmatrix in die Makropore kommen.

Abbildung 1 zeigt am Beispiel vereinfacht dargestellter Bodenkörper, mögliche Wasserflüsse nach einem Niederschlagsereignis.

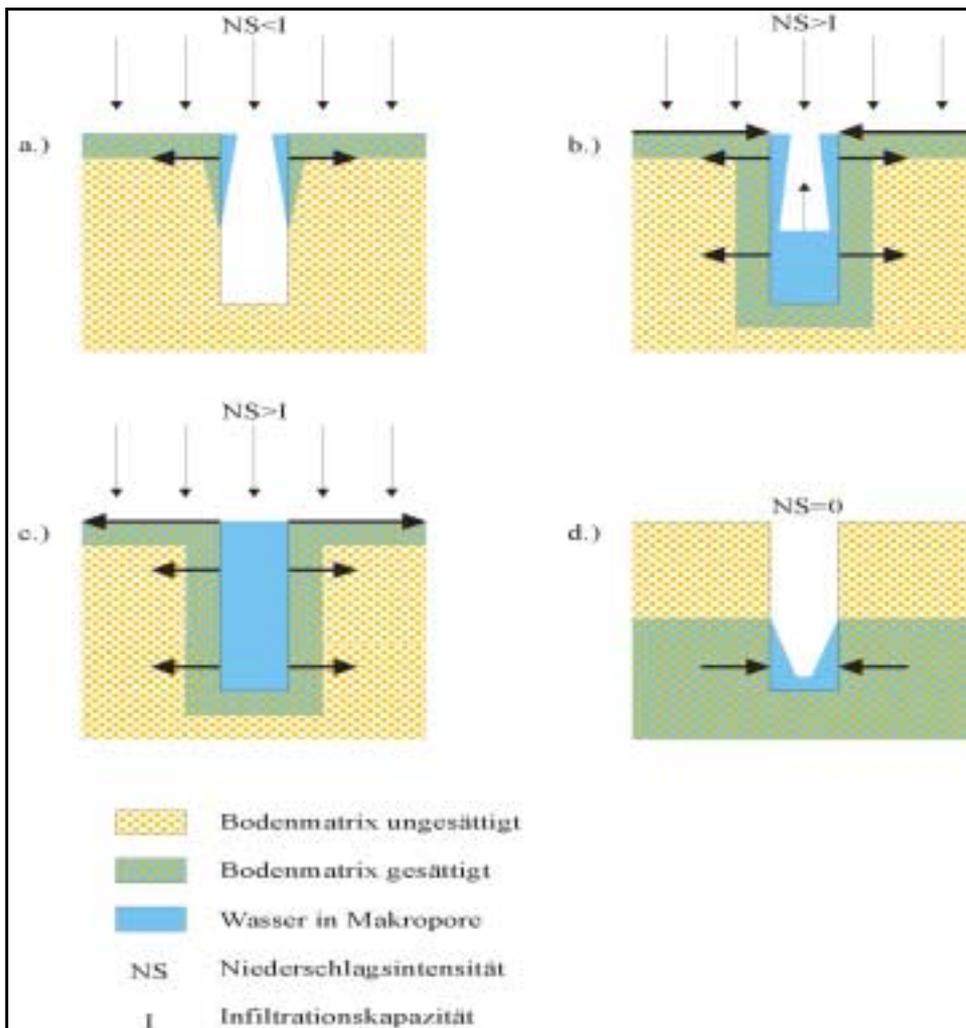


Abb. 1: Schema der Wasserflüsse in einem ungestörten Boden mit Makropore. (a) Infiltration in den trockenen Boden; (b) Die Infiltrationskapazität der Bodenmatrix ist erschöpft, es kommt zum Makroporenfluss.; (c) Die Infiltrationskapazität der Bodenmatrix und des Makroporensystems sind erschöpft, es kommt zum Oberflächenabfluss.; (d) Ist die Bodenmatrix um eine Makropore gesättigt, kommt es zum Übertritt von Wasser aus der Bodenmatrix in die Makropore. (verändert nach Beven/ Germann 1981)

Trotz einer theoretischen Abtrennung des Makroporensystems von der gesamten Bodenmatrix treten zwischen beiden Strukturelementen in Bezug auf den Wasserfluss vielseitige Wechselwirkungen auf. Neben der Niederschlagsintensität ist der Makroporenfluss vom Mikrotiefenrelief, von der ungesättigten Leitfähigkeit und dem Anfangswassergehalt der Bo-

denmatrix abhängig. Fließt Wasser in die Makroporen, wird ein Teil des Wassers zurückgehalten, was von der kapillaren Leitfähigkeit der angrenzenden Bodenmatrix abhängt. Hydrophobe Materialien wie Ton, Schleim und Regenwurmlosung können diese Leitfähigkeit zusätzlich beeinflussen (KNOBLAUCH 1996). Fließt aber bei ungesättigten Verhältnissen ein Teil des Infiltrationswassers über die Makroporen an der angrenzenden Bodenmatrix vorbei, wird dieser Vorgang als "bypass-flow" oder "shortcircuiting-flow" bezeichnet. Demgegenüber wird der schnelle Wassertransport im Boden bei nahezu gesättigten Fließbedingungen als "preferential flow" bezeichnet (BEISECKER 1994).

Makroporenfluss und der Fluss in der restlichen Bodenmatrix laufen im Boden parallel ab und tragen damit beide zur Gesamtversickerung bei. Der Anteil des Makroporenvolumens am Gesamtporenvolumen eines Bodens beträgt ca. 1-2 Vol.%, aber dennoch können bei Wassergehalten nahe der Feldkapazität 40 % bis 80 % der Gesamtinfiltration über den Makroporenfluss erklärt werden (BEISECKER 1994; LIERMANN 1999).

Tritt Makroporenfluss auf, sind die Gleichungen von Darcy (vgl. Gleichung 1) und Richards (vgl. Gleichung 3) für die Berechnung des Wasserflusses nicht mehr ausreichend. Von BEISECKER (1994) werden hierfür zwei Gründe genannt:

1. Der Wasserfluss in den Makroporen wird kaum von den Kapillarkräften des Bodens beeinflusst und ist in der Regel schneller als es dem hydraulischen Gradienten entspricht, so dass bei Sättigung der Bodenmatrix und daher fehlenden Potentialgradienten unterschiedliche Wasserleitfähigkeiten vorzufinden sind.
2. Aufgrund der Wandrauigkeit von einigen Makroporen kann es innerhalb der Poren zum turbulenten Fließen kommen, so dass die für das Darcy-Gesetz vorausgesetzte laminare Strömung nicht gegeben ist.

Aufgrund der Heterogenität von Böden ist es nicht möglich, alle Fließbewegungen experimentell zu erfassen bzw. rechnerisch zu simulieren. Vor allem Bodeneigenschaften, die zu schnellem Wassertransport im Boden führen (Makroporen etc.), sind teilweise schwierig in Modelle zu implizieren, da einige Parameter nicht oder kaum direkt messbar und damit auch nicht objektiv sind (BOHNE 1996; SCHWARZ/ KAUPENJOHANN 2001). Trotzdem wurden für die Wasserbewegung in heterogenen Böden zahlreiche Modelle entwickelt. CHILDS (1969) wendete erstmals das Modell der Rohrströmung nach dem Hagen-Poiseuilleschen Gesetz auf Makroporen im Boden an. Ein weiterer Ansatz zur Beschreibung des Makroporenflusses geht vom Prinzip der kinematischen Welle aus (z.B. GERMANN/ BÜRGI 1996). GERKE/ VAN GENUCHTEN (1993); KÖHNE (1999) sowie KÄTTERER et al. (2001) nutzen in

ihren Modellen das Doppelporositätskonzept, um den Wassertransport in heterogenen Böden zu beschreiben.

Die Schwierigkeit der Simulation von Stoffverlagerungsprozessen in Böden macht die Durchführung von Messungen an Böden bzw. entsprechenden Bodenproben (z.B. Stechzylinderproben, Monolite) erforderlich.

2.2 BODENWASSERGEBUNDENER STOFFTRANSPORT

Die im Bodenwasser gelösten Stoffe bewegen sich, wie im Kapitel 2.1 erläutert, entsprechend der Fließrichtung und Fließgeschwindigkeit mit dem Bodenwasser. Im weiteren Sinne wird jedoch auch die Bodenwasserbewegung selbst, die Diffusion von Gasen in der Bodenluft, der Transport von suspendierten Partikeln sowie die mechanische Umlagerung von Festsubstanz (Erosion) als Stofftransport angesehen (GISI 1990). Diese Stoffverlagerungen werden durch verschiedene Prozesse und Faktoren beeinflusst. Dabei wird in physikalische, chemische oder biologische Prozesskomponenten unterschieden (ZACHARIAS 1999).

2.2.1 Die Konvektions-Dispersions-Gleichung

Der Stofftransport in der Bodenlösung erfolgt in der Hauptsache durch Diffusion und Konvektion (Massenfluss). Die Diffusion spielt hauptsächlich beim Transport über kürzere Distanzen eine Rolle (z.B. Aufnahme von Nährstoffen durch die Pflanzenwurzeln). Über größere Transportdistanzen dominiert die Konvektion (vgl. Gleichung 4). Sie stellt die Verlagerung einer Stoffkomponente pro Zeiteinheit mit der Wasserbewegung durch einen einheitlichen Bodenquerschnitt dar. Der konvektive Stofftransport kann somit auf den Darcy-Fluss bezogen werden, welcher jedoch nur eine mittlere Fließgeschwindigkeit abbildet.

Gleichung 4: Konvektiver Stofffluss (nach GISI 1990)

$$j_c = q \cdot c$$

j_c	<i>konvektiver Stofffluss</i>	(g/cm^2s)
q	<i>Flussrate</i>	(cm/s)
c	<i>Konzentration der zu betrachtenden Stoffkomponente</i>	(g/cm^3)

Die im Boden fließende Lösung durchströmt jedoch zum Teil sehr heterogene Bereiche, legt dabei verschiedene Wege zurück und erreicht sehr unterschiedliche Strömungsge-

schwindigkeiten (vgl. Kap. 2.1.1). Die Folge ist, dass die Bodenlösung unterschiedlich weit transportiert wird und zur Durchmischung der Flüssigkeitszonen beiträgt (vgl. Abb. 2). Dieser Prozess wird als mechanische Dispersion bezeichnet. Bei einer makroskopischen Betrachtung der Durchmischung werden die Prozesse von Diffusion und mechanischer Dispersion zusammengefasst und als hydrodynamische Dispersion (Dispersion) bezeichnet (vgl. Gleichung 5). Dabei bewegt sich die Bodenlösung von der höheren zur niedrigeren Konzentration (GISI 1990; HARTGE/ HORN 1991; KÄSS 1992; ZACHARIAS 1999).

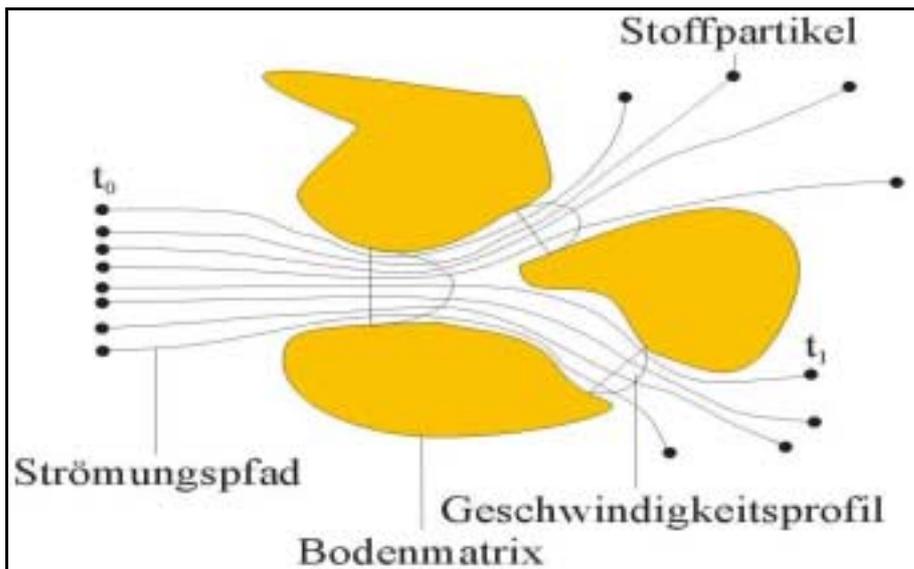


Abb. 2: Schema zur Erklärung der mechanischen Dispersion; t = Zeit (verändert nach Gisi 1990)

Der in Gleichung 5 enthaltene Proportionalitätsfaktor zwischen Flussdichte und Konzentrationsgradient (dc/dz) setzt sich aus dem volumetrischen Wassergehalt θ , als Maß für den relativen Fließquerschnitt, und dem Dispersionskoeffizienten D zusammen. Der Dispersionskoeffizient hängt von der mittleren Fließgeschwindigkeit v ab, die sich aus der Fließrate und dem effektiv zur Verfügung stehenden Fließquerschnitt bestimmen lässt (GISI 1990).

Gleichung 5: Dispersive Flussdichte (nach GISI 1990)

$$j_d = -\theta \cdot D \cdot \frac{dc}{dz}$$

j_d	dispersive Flussdichte	(g/cm^2s)
θ	volumetrischer Wassergehalt	(cm^3/cm^3)
D	Dispersionskoeffizient	(cm^2/s)
c	Konzentration der zu betrachtenden Stoffkomponente	(g/cm^3)
z	Ortskoordinate in vertikaler Richtung	(cm)

Der Transport einer gelösten Stoffkomponente ergibt sich aus der Summe des konvektiven und dispersiven Flusses. Wird dieser Fluss (vgl. Gleichungen 4 und 5) in eine differentielle Massenbilanzgleichung eingesetzt und werden Stoffe mit dem Bodenwasser transportiert, erhält man die Konvektions-Dispersions-Gleichung (vgl. Gleichung 6).

Gleichung 6: Konvektions-Dispersions-Gleichung (nach GISI 1990)

$$\frac{\partial \theta \cdot c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta \cdot D \cdot \frac{\partial c}{\partial z} - q \cdot c \right) + \theta \cdot s$$

q	<i>Flussrate</i>	(cm/s)
c	<i>Konzentration der zu betrachtenden Stoffkomponente</i>	(g/cm^3)
D	<i>Dispersionskoeffizient</i>	(cm^2/s)
θ	<i>volumetrischer Wassergehalt</i>	$(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$
z	<i>Ortskoordinate in vertikaler Richtung</i>	(cm)
t	<i>Zeit</i>	(s)
s	<i>Quellen-Senken-Term</i>	(g/cm^3)

Dabei bezeichnet der Quellen-Senken-Term s in Gleichung 6 die Nettorate, mit der die Konzentration c der zu betrachtenden Stoffkomponente durch chemische Umwandlung oder durch Austausch mit anderen Phasen der Bodenlösung erhöht ($s > 0$) oder erniedrigt ($s < 0$) wird. Beispiele für Quellen sind Mineralisierung und Abbau der organischen Substanz (GISI 1990).

Des Weiteren wirken sich Austauschprozesse (Adsorption, Desorption, Lösung etc.) mit anderen Bodenphasen, besonders der Bodenmatrix auf das Transportverhalten von gelösten Stoffen aus (GISI 1990). Diese Austauschprozesse wirken sich auf die Geschwindigkeit des Transportvorganges aus, da einige der transportierten Stoffe immer wieder den Umweg über die immobile Festphase der Bodenmatrix nehmen müssen oder von ihr abgestoßen werden. Ausgedrückt wird diese Verzögerung oder Beschleunigung durch den Retardationsfaktor R ($R = 1$ entspricht der Fließbewegung von Wasser). Je stärker also ein Stoff sorbiert wird, um so größer ist R und um so langsamer wird dieser Stoff transportiert. Bei vielen Anionen, wie z.B. Bromid, ist $R < 1$, was in Abhängigkeit vom Bodensubstrat zu einer geringfügigen Beschleunigung des Stofftransportes führen kann. Laut RUSLOW et al. (1996) ist für ein Lösssubstrat $R_{\text{Bromid}} = 0,71$ und für ein sandig kiesiges Substrat $R_{\text{Bromid}} = 1$. Die Anionen werden von den meist negativ geladenen Kolloidoberflächen abgestoßen und ins Poreninnere gedrängt, wo die Lösung gemäß der Hagen-Poiseuilleschen Gleichung schneller fließt als in den Randbereichen. (GISI 1990; KÄSS 1992; ZACHARIAS 1999).

2.2.2 Einfluss des Makroporenflusses auf den Stofftransport

Wie im Kapitel 2.1.2 erläutert, kann es in heterogenen Böden zum Makroporenfluss kommen, was sich auch auf den Stofftransport auswirkt. In den präferentiellen Fließbahnen der Makroporen ist der Kontakt des Bodenwassers mit der Bodenmatrix nur auf wenige Kontaktstellen begrenzt. Der diffusive Stofftransport ist also nur von Bedeutung, wenn der Boden ungesättigt ist, da dann die Stoffe der eingedrungenen Bodenlösung von der angrenzenden Bodenmatrix aufgenommen werden. Kommt es zum Makroporenfluss, bewegen sich die gelösten und partikulären Stoffe aufgrund der hohen Geschwindigkeit fast ausschließlich konvektiv mit dem Bodenwasser. Austausch- und Umsetzungsprozesse mit der Matrix sind demzufolge nur noch eingeschränkt möglich (vgl. Abb. 3), (GISI 1990; DEMUTH/ HILTPOLD 1993; KNOBLAUCH 1996; SCHWARZ/ KAUPENJOHANN 2001).

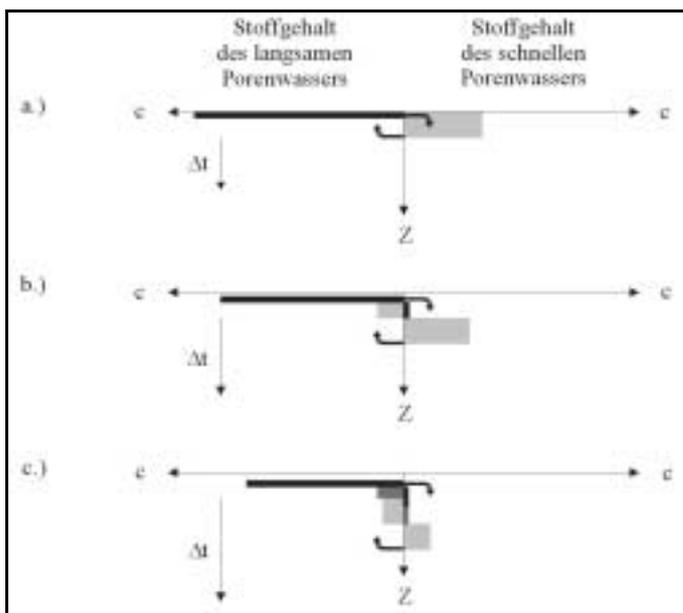


Abb. 3: Stadien (a, b, c) der Stoffverlagerung im ungestörten Boden mit Makroporen bei eingeschränktem Austausch zwischen Bodenmatrix und Makroporensystem. c = Stoffkonzentration; z = Bodentiefe; t = Zeit (verändert nach GISI 1990)

2.3 BEEINFLUSSUNG DES WASSER- UND STOFFTRANSPORTES DURCH DIE BODEN-BEARBEITUNG

Auf Ackerstandorten werden zahlreiche Bodenbearbeitungsmaßnahmen ergriffen, um einen für das Pflanzenwachstum optimalen Bodenzustand zu schaffen. BEISECKER (1994) nennt dazu fünf Teilziele der Bodenbearbeitung:

1. Schaffung eines bestimmten Bodengefüges
2. Einebnung der Bodenoberfläche
3. Einmischen bzw. Verteilen von Ernterückständen, Dünge- und Pflanzenschutzmitteln sowie das Einbringen von Saat- und Pflanzgut
4. Unkrautbekämpfung
5. Sicherung der Befahrbarkeit für Transport-, Pflege- und Erntemaßnahmen

Diese Maßnahmen können sich jedoch negativ auf den Boden auswirken (z.B. Verdichtung). Deshalb wurden im Sinne des Bodenschutzes für die Landwirtschaft zahlreiche neue technische Geräte entwickelt, die neue bodenschonende Bearbeitungsverfahren zulassen. Nach KTBL (1998) werden in Deutschland drei landwirtschaftliche Bodenbearbeitungsverfahren unterschieden und wie folgt definiert:

Konventionelle Bodenbearbeitung

- regelmäßige Lockerung und Wendung des Bodens bis Krumentiefe (bis ca. 30 cm Bodentiefe) durch den Pflug
- Herstellung einer sauberen Bodenoberfläche für die Drillsaat der Folgefrucht

Konservierende Bodenbearbeitung

- Verzicht auf den Pflug
- Lockerung des Bodens mit nichtwendenden Bearbeitungsgeräten (z. B. Grubber, Scheibeneggen, zapfwellengetriebene Geräte)
- Belassen einer mit Pflanzenresten bedeckten Bodenoberfläche für die Mulchsaat der Folgefrucht.

Direktsaat

- Verzicht auf jegliche Bodenbearbeitung seit der vorangegangenen Ernte
- Belassen von Pflanzenreststoffen der Vor- oder Zwischfrucht auf der Bodenoberfläche
- Für die Aussaat sind spezielle Direktsämaschinen erforderlich, welche Säschnitte öffnen, in die das Saatgut abgelegt wird.

Die Auswirkungen der verschiedenen Bearbeitungsverfahren auf infiltrationsbeeinflussende Bodeneigenschaften werden in der Literatur vielfach beschrieben. Die Veränderung des

Infiltrationsverhaltens wird insbesondere durch eine höhere Dichtlagerung des Oberbodens, den Aufbau eines vertikal-kontinuierlichen Makroporensystems und eine geringere Oberflächenverschlämmungsanfälligkeit hervorgerufen (TEBRÜGGE/ DURING 1999).

In Direktsaat bestellte bzw. langjährig konservierend bearbeitete Flächen weisen im Oberboden (bis ca. 35 cm) ein stabileres Bodengefüge als gepflügte Flächen auf. Diese Böden sind aufgrund der fehlenden bzw. geringeren und flacheren Bodenbearbeitung dichter gelagert, was wiederum auf natürliche Setzungsprozesse zurückzuführen ist (SCHMIDT et al. 2002). Die gegenüber den gepflügten Varianten dichtere Lagerung spiegelt sich auch in der Porenverteilung der Böden wieder. In Direktsaat und konservierend bestellten Schlägen besitzen die Böden ein geringeres Porenvolumen, was sich negativ auf Infiltration und die damit verbundene Stoffverlagerung auswirken kann (ZIMMERLING/ SCHMIDT 2002). Nach der Richardsgleichung nimmt bei dichtergelagerten Böden die Geschwindigkeit der Wasserbewegung in der Bodenmatrix ab (vgl. Kap. 2.1.1). Entsprechend verringert sich laut Konvektions-Dispensionsgleichung die Konvektion (vgl. Kap. 2.2.1).

Um jedoch Aussagen zur Wasserbewegung treffen zu können, muss das gesamte Porensystem (Matrix- und Makroporensystem) betrachtet werden. Bei der Entwicklung des Makroporensystems spielt die biologische Aktivität im Boden eine wichtige Rolle. Es ist vielfach nachgewiesen, dass die Artenvielfalt und die dadurch erhöhte biologische Aktivität durch konservierende Bodenbearbeitung und noch mehr durch Direktsaat gefördert wird (HEISLER et al. 1998; NITZSCHE 2000; JOSSI et al. 2001; KÖLLER/ LINKE 2001; KRÜCK et al. 2001; UHLIG 2001; SCHMIDT et al. 2002). Gründe dafür sind das bessere Nahrungsangebot für die Bodenlebewesen durch die Mulchauflage sowie die nichtwendende und flache Bodenbearbeitung, so dass die Wohnröhren der Lebewesen weitestgehend erhalten bleiben. Des Weiteren wirkt sich die erhöhte biologische Aktivität positiv auf die Mineralisierung und Aggregatstabilität aus (HEISLER et al. 1998; KRÜCK et al. 2001).

Besonders wichtig für die Ausbildung eines intakten Makroporensystems ist die Anzahl und Artenvielfalt der Regenwürmer. Dabei spielen die tiefgrabenden Regenwürmer (anektische Arten) eine bedeutende Rolle. HEISLER et al. (1998); JOSSI et al. (2001) und KRÜCK et al. (2001) wiesen auf Flächen mit Direktsaat und konservierender Bearbeitung deutlich höhere Anzahlen dieser Arten nach, als auf gepflügten Flächen. Die senkrechten und an der Oberfläche offenen Gänge können bis in 2 m Tiefe reichen und verbinden somit Ober- und Unterboden (EHLERS 1975).

Es ist nachgewiesen, dass sich gegenüber gepflügten Flächen, auf Böden mit fehlender bzw. geringer Bearbeitung ein stabiles Bodengefüge und ein intaktes Makroporensystem entwickelt. Trotz erhöhter Dichtlagerung wird dadurch mehr Wasser in den Boden infiltriert.

riert und der Oberflächenabfluss verzögert bzw. verhindert. Unter bestimmten Bedingungen kann es durch die erhöhte Infiltration zum sickerwassergebundenen Stofftransport kommen (BEISECKER 1994; NORDMEYER/ ADERHOLD 1995; ZACHARIAS 1999). Dieser hängt von Vorbedingungen, wie der Lage des Stoffes auf der Oberfläche bzw. in der Bodenmatrix und von der Höhe der Niederschläge ab (vgl. Abb. 1). Falls es zum Stofftransport in den Makroporen kommt, dann ist dies durch ein Vorseilen der Stofffront erkennbar (z.B. steiler Anstieg der Durchbruchkurve mit Tailing) (ZACHARIAS 1999).

Bei Direktsaat und konservierender Bodenbearbeitung schützen die Mulchauflage sowie die stabileren Aggregate an der Bodenoberfläche vor Verschlammung und Erosion. Das heißt: Die Infiltration in die Bodenmatrix nimmt zu und der Stoffaustrag über den Oberflächenabfluss nimmt ab. Unter gesättigten Bedingungen der Bodenmatrix kann es zum Übertritt gelöster Stoffe in die Makroporen und damit zum schnellen Stoffaustrag kommen (vgl. Abb. 1) (BEISECKER 1994; NORDMEYER/ ADERHOLD 1995).

Durch die wendende Wirkung des Pfluges werden die Bodenaggregate sowie die Kontinuität des Porensystems zerstört, was sich negativ auf die Infiltration sowie die Tragfähigkeit des Bodens auswirkt. Zudem wird der gepflügte Boden bei weiterer Überführung durch die Druckbelastung der Räder sowie durch Druck- und Scherwirkung des Werkzeugeingriffs verdichtet (Pflugsohle). Dies führt zu einer Abnahme des Porenvolumens und zu einer Porenverteilung zugunsten der Mittel- und Feinporen (BEISECKER 1994). Es kommt zur Bodenverdichtung, welche sich negativ auf den Transport von Wasser und Luft sowie das Wurzelwachstum auswirkt (BEISECKER 1994; BRUNOTTE/ SOMMER 2001; BECKER/ BÄNSCH 2001; HORN/ HARTGE 2001; HORN et al. 2001). Des Weiteren kann die verdichtete Pflugsohle den Fluss des Bodenwassers behindern und so zu Staunässe führen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass durch die unterschiedlichen Bearbeitungsvarianten entstandenen Bodeneigenschaften Auswirkungen auf den Wasser- und Stofftransport haben. Auf Flächen mit Direktsaat und konservierender Bearbeitung wurden gegenüber gepflügten Parzellen höhere Infiltrationen nachgewiesen (SOMMER 1998; SCHMIDT et al. 2001; ZIMMERLING et al. 2001; FRANZLUEBBERS 2002). Die erhöhte Infiltration und geringere Evapotranspiration (Mulchbedeckung) begründen den meist höheren Wassergehalt im Boden. Auf diesen Flächen kann es aufgrund der großen Anzahl an kontinuierlichen Makroporen, insbesondere nach Starkniederschlägen, zu schnellen Wasser- aber auch Stoffflüssen im Boden kommen (vgl. Kap. 2.1 und 2.2).

Im folgenden Kapitel sollen Methoden vorgestellt werden, welche den Wasser- und Stofftransport im Boden beschreiben.

2.4 METHODEN

Es gibt verschiedene Methoden, um Wasser- und Stoffflüsse nachzuweisen. Jedoch ist es schwierig, von einzelnen Messungen auf das gesamte Verhalten des untersuchten Bodens zu schließen. Auch wenn Bodeneigenschaften es erlauben einen Mittelwert zu bestimmen, ist dieser jedoch zum Teil mit erheblichen Fehlern behaftet.

Probleme treten vor allem bei der Quantifizierung von präferentiellen Flüssen auf. Bisher wurden weder geeignete Messmethoden noch theoretische Modelle gefunden, um die Variabilität und Komplexität des Bodens bzw. der darin ablaufenden Prozesse zufriedenstellend zu erfassen (NORDMEYER/ ADERHOLD 1995; SCHWARZ/ KAUPENJOHANN 2001).

2.4.1 Messtechniken

Stoffflüsse im Boden wurden in Laboruntersuchungen mit Tracern und Pflanzenschutzmitteln nachgewiesen (KNAPPE et al. 1994, 1997 und 2002; NORDMEYER/ ADERHOLD 1995; GÄTH et al. 1996; RUSSOW et al. 1996; ZACHARIAS 1999), aber auch Feldstudien belegen solche Transportvorgänge (BEISECKER 1994; LIERMANN 1999; GÖBEL 2000; BENS et al. 2001; BUNDT et al. 2001; ZIHLMANN et al. 2001).

In Anlehnung an DEMUTH/ HILTPOLD (1993) sollen anschließend die wichtigsten physikalischen Messtechniken zur Erfassung der Wasser- und Stoffverlagerung in Böden mit ihren Eigenschaften und Grenzen erläutert werden.

1. Stechzylinderproben: Ermittlung von Größen, wie z.B. hydraulische Leitfähigkeit oder Porosität im Labor.
 - Vorteile: Ermittlung wesentlich einfacher als im Feld
 - Nachteile: Aufgrund der räumlichen Variabilitäten in natürlichen Böden und der räumlichen Begrenztheit der Proben ist eine große Probenanzahl erforderlich. Die Methode ist destruktiv; zeitliche Veränderungen können nicht erfasst werden.
2. Saugkerzen: Es können Proben der Bodenlösung entnommen werden.
 - Vorteile: Die Methode ist nicht destruktiv, zeitliche Veränderungen von Stoffkonzentrationen können erfasst werden.
 - Nachteile: Die zeitliche Auflösung reicht nicht aus, um schnelle Fließprozesse zu erfassen. Es werden Flussmittelwerte geliefert, d.h. das Volumen aus dem die Bodenlösung stammt, kann nicht genau ermittelt werden. Der Einbau kann das Bodengefüge im Ker-

zenbereich verändern. Durch den angelegten Unterdruck wird das Strömungsfeld im Bereich der Saugkerzen verändert.

3. Farbstoffe: Farbstoffe werden mit dem Bodenwasser in den Boden infiltriert, um Fließwege nachzuweisen.
 - Vorteile: Bevorzugte Fließwege werden durch den Farbstoff sichtbar gemacht.
 - Nachteile: Die Methode ist destruktiv. Wechselwirkungen mit der Bodenlösung und -matrix sowie der Chemismus der Farbstoffe bereiten Schwierigkeiten.
4. Säulen- und Lysimeterexperimente: Mit Beregnungsexperimenten kann der Wasser- und Stofftransport ermittelt und charakterisiert werden.
 - Vorteile: Prozesse der Wasser- und Stoffdynamik sind quantitativ und in zeitlich kurzen Perioden gut zu erfassen (KNAPPE/ KEESE 1996). Es können einheitliche Versuchsbedingungen geschaffen werden.
 - Nachteile: Es können Randeffekte und damit bevorzugte Wasserbewegungen auftreten. Bei langjähriger Nutzung kann es zu Reaktionen zwischen Boden und Behälterwand kommen (KEESE/ KNAPPE 1996). Horizontale Wasserbewegungen sind durch die Wände begrenzt. Das Anlegen aber auch das Fehlen einer Saugspannung am unteren Rand verändert die Fließbedingungen.
5. Tensiometer: Mit deren Hilfe lässt sich das Matrixpotential bestimmen. Für eine hohe zeitliche Auflösung können Instrumente mit Druckaufnehmern verwendet werden.
 - Nachteile: Das Matrixpotential ist unter wechselnden Bedingungen in der näheren Umgebung der Kerze nicht mehr konstant. Tensiometermessungen sind volumenbezogen. Es kann nicht unterschieden werden, ob der Druck von der Wasser- oder Gasphase ausgeht.
6. Time Domain Reflectometry (TDR): Mit der TDR-Methode kann der Bodenwassergehalt mit hoher zeitlicher Auflösung bestimmt werden.
 - Nachteile: TDR-Messungen sind volumenbezogen, wobei die Größe des Messvolumens von der eingesetzten Sonde abhängt. In feuchten Böden kann sich der Wassergehalt aufgrund einer Feuchtefront schnell ändern. Diese Änderung kann infolge von preferentiellen Flüssen überlagert werden.
7. Mikro- und Makromorphologische Methoden: Durch makromorphologische Strukturbeschreibungen (Typ, Größe und Ausprägung der Bodenstruktur) lässt sich der Wasserfluss relativ einfach charakterisieren.
 - Nachteile: Die Beschreibung der Angaben ist nur qualitativ. Ihre Übertragbarkeit und Reproduzierbarkeit ist fraglich.

- Durch mikromorphologische Messungen können spezielle Fließwege genau definiert werden.
- Nachteile: Die gemessenen Volumen sind sehr klein und daher schlecht auf eine größere Maßstabebene übertragbar. Beide Methoden sind destruktiv, erlauben keine Prozessbeschreibung und sind sehr aufwendig.

Eine weitere Methode ist die Simulation von Wasser- und Stoffflüssen mit Hilfe von Modellen. Die Validierung der Modelle ist jedoch mit großen Problemen verbunden, welche im Kapitel 2.1.2 schon näher erläutert wurden. Einen guten Überblick über die Möglichkeiten und Grenzen von Wasser- und Stofftransport-Modellen geben BOHNE (1996) und SCHWARZ/ KAUPENJOHANN (2001).

Durch die Beschreibung der einzelnen Methoden sollte verdeutlicht werden, dass diese kritisch zu betrachten sind. Die Übertragbarkeit solcher Ergebnisse auf Feldskala ist daher sehr schwierig. Voraussetzung für eine Quantifizierung der Flüsse in verschiedenen Böden sind standardisierte Versuche. So ist es möglich - in Abhängigkeit von Niederschlag, Bodenwassergehalt und makromorphologischen Strukturen - bevorzugte Wasser- und Stoffflüsse zu erfassen und die Ergebnisse der Untersuchungen von verschiedenen bearbeiteten Böden zu vergleichen. Dafür geeignete Methoden sind Tracerversuche an ungestörten Bodensäulen oder in Lysimetern. Gleichzeitig ist es wichtig, makromorphologische Strukturmerkmale und deren räumliche Variabilität zu erfassen (DEMUTH/ HILTPOLD 1993; NORDMEYER/ ADERHOLD 1995).

2.4.2 Tracerversuche

Um die Prozesse der Wasser- und Stoffverlagerung experimentell in Bodenkörpern nachzuweisen, kommen Tracer zur Anwendung, welche die Bodenlösung markieren. Für die Wasser- und Stoffverlagerung werden konservative und nicht konservative Tracer eingesetzt. Konservative Tracer haben die Eigenschaft, sich fast genauso wie das Wasser durch den Boden zu bewegen, ohne dabei mit der Bodenmatrix oder anderen Stoffen aus der Bodenlösung zu reagieren. Durch konservative Tracer können z.B. Nitratverlagerungen simuliert werden, da Nitrat aufgrund fehlender Sorptionsplätze im Boden ein sehr mobiles Ion ist (KÄSS 1992; BEISECKER 1994; RUSSOW et al. 1996). Stoffe, welche Reaktionen mit der Bodenmatrix zeigen oder biologischen Einflüssen unterliegen (z.B. Pflanzenschutzmittel, Phosphat), müssen mit nicht konservativen Tracern nachgewiesen werden. Um Fließwege

im Boden visuell sichtbar zu machen, werden in der Regel Farbtracer verwendet (KÄSS 1992).

Die Auswertung von Tracerversuchen erfolgt in den meisten Fällen anhand der zeitlichen Konzentrationsveränderung an einem bestimmten Ort im Bodenkörper. Bei der Auswertung dieser Durchbruchkurven wird der Anteil von Konvektions- und Dispersionsprozessen am Transportvorgang charakterisiert (KÄSS 1992).

Für die Lösung der Problemstellung wurden in der Arbeit - aufgrund der zuvor beschriebenen Vorteile - Tracerversuche an Bodensäulen durchgeführt, wie sie unter Kapitel 4 entwickelt und erläutert werden. Die dafür notwendigen Proben wurden am Standort Zschortau entnommen, welcher im Kapitel 3 charakterisiert wird.

3 DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET

3.1 LAGE, AUSGANGSSUBSTRAT FÜR DIE BODENBILDUNG, BÖDEN UND KLIMA

Die Entnahme der Bodensäulen für die Untersuchungen erfolgte auf der Versuchsfläche Zschortau, welche seit mehreren Jahren im Rahmen eines Bearbeitungsversuches der Südzucker AG unterschiedlich bearbeitet wird.

Die Untersuchungsfläche mit den drei Versuchsstandorten befindet sich zwischen Leipzig und Delitzsch, ca. 1,5 km südlich von Zschortau auf einer Höhe von 108 bis 111 m über NN. Die Fläche ist ca. 40 ha groß und nicht geneigt. Naturräumlich wird dieser Ausschnitt dem Leipziger Land und somit dem Gürtel von Gefilden zugeordnet, welche sich in vielfältiger Abwandlung vom Norddeutschen Tiefland nach Südosten bis zum Vorland des Lausitzer Berglandes erstrecken (BERNHARDT et al. 1986; HEILMANN et al. 1995).

Geomorphologisch gehört das Gebiet laut Kugler und Villwock (1995) zur Halle-Leipziger Tieflandsbucht. Die naturräumlich bestimmenden Merkmale sind weite, kuppige Flächen, eine geringe Reliefenergie sowie charakteristische Endmoränenzüge (Hügelketten) aus der Saalevereisung.

Während der Saaleeiszeit wurden in diesem Gebiet mehrere Grundmoränen abgelagert. Die Grundmoräne des zweiten saalezeitlichen Eisvorstoßes (Leipziger Phase) mit einer mittleren Mächtigkeit von ca. 8 m (max. 17 m) bildet den oberflächennahen Untergrund und liefert somit das Ausgangssubstrat (Geschiebelehm) für die Bodenbildung dieses Gebietes. Im Verlauf der Weichseleiszeit wurde der Geschiebelehm periglazial vielfach überprägt. Der südlich der Eisrandlage befindliche Dauerfrostboden unterlag aufgrund der Auftau- und Gefrierprozesse zahlreichen Veränderungen, wie beispielsweise durch Kryoturbation. Dadurch ist der unterlagernde Geschiebelehm sehr heterogen. Während des Rückzuges des Weichseleises nach Norden wurde die saalezeitliche Grundmoräne mit Sandlöss überdeckt, der heute als 30-50 cm mächtige, homogene Auflage durchgehend auftritt (KEESE et al. 1995).

Aus den Sedimenten der Saale- und Weichselkaltzeit bildeten sich die heutigen Böden. Laut KEESE et al. (1995) werden die Böden, entsprechend des oberflächennahen Untergrundes, aus zwei Schichten aufgebaut. Zum einen aus saalezeitlichem Geschiebelehm (bis ca. 1,50 m entkalkt) und zum anderen aus der weichselzeitlichen Sandlössdecke (kalkfrei). Die Unterschiede in der Korngrößenzusammensetzung der Sedimente (vgl. Tab. 2) spiegeln die Charakteristik beider Ausgangssubstrate wieder:

Tabelle 2: Körngrößenverteilung der bodenbildenden Sedimente (KEESE et al. 1995)

	Sand %	Schluff %	Ton %
weichselzeitlicher Sandlöss	43	45	12
saalezeitlicher Geschiebelehm	48	30	22

Auf dem Versuchsstandort dominieren Pseudogleye und Parabraunerden-Pseudogleye (vgl. Abb. 4). Wasserstauer ist der Geschiebelehm. Das Grundwasser steht im Raum Zschortau in einer Tiefe von ca. 20 m an. (KEESE et al. 1995).

Nach TEIWES (1998) werden je nach Tiefenlage des Geschiebelehms flache und tiefe Pseudogleye sowie mittlere und tiefe Parabraunerden-Pseudogleye unterschieden. Die Mächtigkeit der Sandlössdecke schwankt zwischen 35 und 80 cm. Als Bodenart dominiert sandiger Lehm. Jedoch treten partiell Bereiche aus lehmigem Sand mit zum Teil erheblichen Kiesanteilen auf (TEIWES 1998).

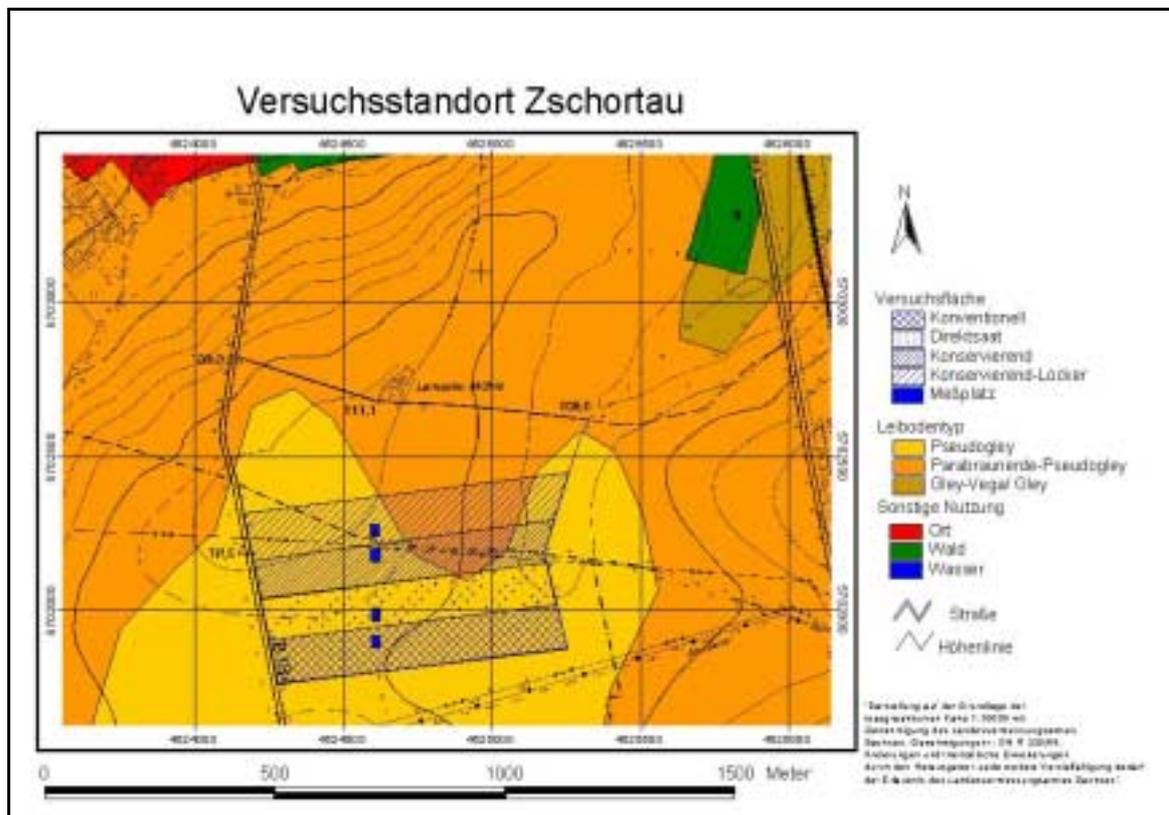


Abb. 4: Böden und Bodenbearbeitungssysteme des Versuchsstandortes

Klimatisch gehört das Untersuchungsgebiet zum kontinental beeinflussten Binnenlandklima und liegt am östlichen Rand des mitteldeutschen Trockengebietes. Durch die Leewirkung des Harzes gelangen bei den vorwiegend regenträchtigen Westwinden jedoch kaum Niederschläge in dieses Gebiet (SCHUMANN/ MÜLLER 1995). Dieser Effekt wird von den

im Südwesten liegenden Höhenzügen (Kyffhäuser, Hainleite, Finne, Thüringer Wald) noch verstärkt.

Für den Versuchsstandort liegen Temperatur- und Niederschlagsdaten der Klimastation Spröda der SLfL vor (vgl. Abb. 5 und 6). Die Station Spröda liegt im Leipziger Land und repräsentiert somit den Standort Zschortau (SCHMIDT et al. 2002). Aus dem 30-jährigen Mittel (1961-1990) ergibt sich eine durchschnittliche Jahrestemperatur von 8,8 °C und eine mittlere Jahressumme der Niederschläge von 512 mm (SLFL 2002).

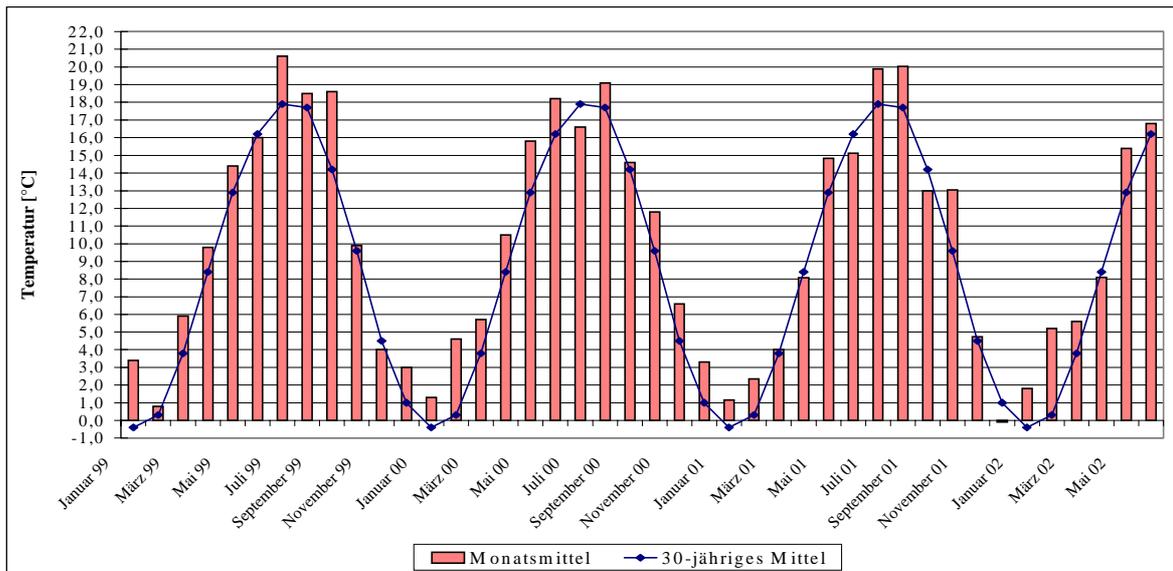


Abb. 5: Temperaturgang an der Klimamessstation Spröda (Leipziger Land) von Januar 1999 bis Juni 2002

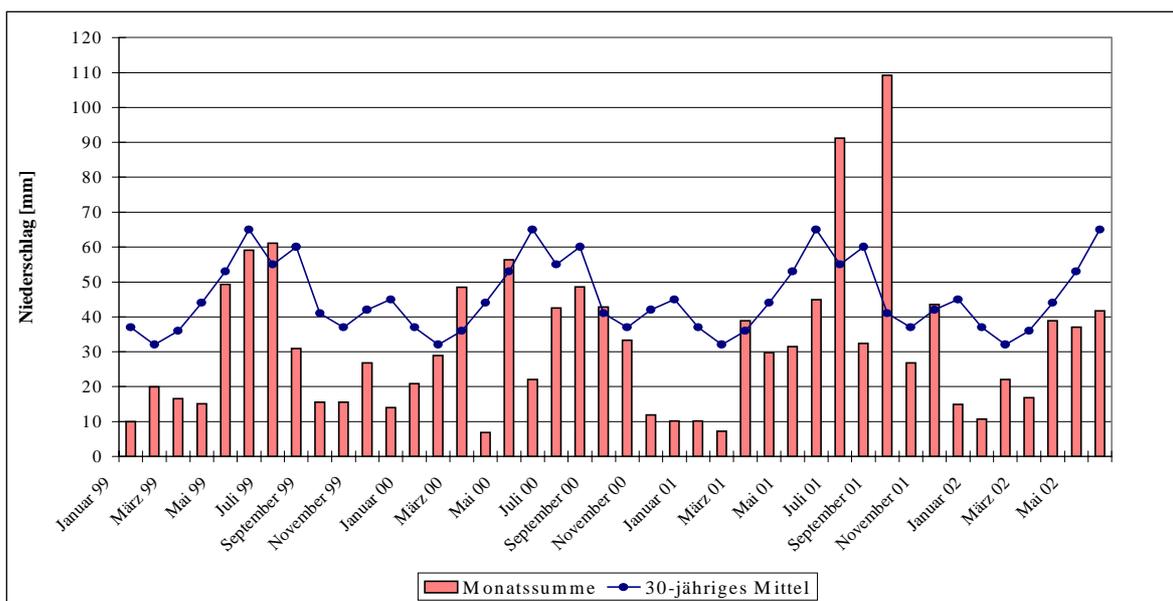


Abb. 6: Niederschlagsgang an der Klimamessstation Spröda (Leipziger Land) von Januar 1999 bis Juni 2002

3.2 FLÄCHENNUTZUNG UND EIGENSCHAFTEN DER VERSUCHSFLÄCHEN

Der Versuchsstandort wird seit 1992 konservierend bearbeitet. 1997 wurden durch die Südzucker AG auf diesem Schlag vier verschiedene Bodenbearbeitungsvarianten in Langparzellen angelegt. Eigene Untersuchungen erfolgten auf den folgenden drei Bearbeitungsvarianten (vgl. Abb. 4):

1. **Konventionelle Bearbeitungsvariante mit dem Pflug (P = Pflug)**
2. **Konservierende Bearbeitungsvariante, Lockerung bis maximal 10 cm mit dem Grubber (M = Mulch)**
3. **Direktsaatvariante (D = Direktsaat)**

Aufgrund der besseren Übersicht werden in den Abbildungen und Tabellen im Folgenden die Begriffe Direktsaat, Mulch (anstelle Konservierender Bodenbearbeitung) und Pflug (anstelle Konventioneller Bodenbearbeitung) verwendet.

In Tabelle 3 werden die angebauten Früchte der letzten vier Jahre dargestellt. Die Bewirtschaftung erfolgt im Rahmen einer betriebsüblichen dreifeldrigen Fruchtfolge mit 33 % Hackfruchtanteil.

Tabelle 3: Fruchtfolge des Standortes Zschortau (SLFL 2002)

Jahr	Frucht
1998/1999	Senf (Zwischenfrucht)/Zuckerrüben
1999/2000	Winterweizen
2000/2001	Wintergerste
2001/2002	Senf (Zwischenfrucht)/Zuckerrüben

Die Bearbeitungsintensitäten der ausgewählten Bodenbearbeitungsvarianten sollen in der folgenden Tabelle (Tab. 4) dargestellt werden. Es werden die einzelnen Bearbeitungsgänge nach der letzten Zwischenfrucht (Senf) bis zum Termin der Probenahme (17.05.2002, vgl. Kap. 4.1) aufgezeigt.

Tabelle 4: Acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen auf der Versuchsfläche Zschortau (SLFL 2002)

	Pflug	Mulch	Direktsaat
Kalkung (10.11.01)	8 t/ha Carbokalk	8 t/ha Carbokalk	8 t/ha Carbokalk
Grundbodenbearbeitung (12.11.01)	Pflug		
Totalherbizid (12.03.02)		3 l/ha Roundup Ultra	3 l/ha Roundup Ultra
N-Düngung (28.03.02)	2,3 dt/ha KAS	2,3 dt/ha KAS	2,3 dt/ha KAS
Lockerung (02.04.02)		Grubber bis 10 cm	
Saatbettbereitung (05.04.02)	Kreiselegge	Kreiselegge	
Aussaat (05.04.02)	Scheibenschar	Scheibenschar	Scheibenschar
Mulchbedeckungsgrad (17.05.02)*	< 1 %	20 %	50 %

*Die Mulchbedeckung wurde durch Zählung anhand der Schnurmethode nach WINNIGE et al. (1998) durchgeführt.

Des Weiteren fanden im April und Mai 2002 fünf weitere Herbizidmaßnahmen statt. Art und Menge der Herbizidgaben waren auf allen Flächen gleich.

Eine detaillierte Profilbeschreibung der Böden des Standortes Zschortau ist bei TEIWES (1998) zu finden. Zur besseren Charakterisierung des Standortes werden in den Tabellen 5 bis 9 weitere Bodenmerkmale dargestellt. Diese Ergebnisse wurden nach standardisierten Methoden ermittelt, welche im Anlage 1 aufgelistet sind.

Aufgrund des hohen Schluffanteils (vgl. Tab. 5) der Böden des Untersuchungsstandortes, sind diese bei Starkregenerereignissen mittel bis stark verschlammungsanfällig (AG BODEN 1994).

Tabelle 5: Bodenart und Kornfraktionen im Untersuchungszeitraum Frühjahr 2001 (SLFL 2002)

	Tiefe [cm]	Bodenart	Bezeichnung	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]
Pflug	0-20	Uls	sandig-lehmiger Schluff	27,6	61,0	10,3
	20-40	Ut3	mittel-toniger Schluff	20,9	65,2	14,3
Mulch	0-20	Uls	sandig-lehmiger Schluff	29,6	59,6	10,4
	20-40	Uls	sandig-lehmiger Schluff	19,3	64,4	17,0
Direktsaat	0-20	Uls	sandig-lehmiger Schluff	32,7	57,5	9,6
	20-40	Uls	sandig-lehmiger Schluff	26,8	59,9	13,3

Tabelle 6 und 7 zeigen jedoch, dass es Unterschiede in der Verschlammungsanfälligkeit zwischen den einzelnen Bearbeitungsvarianten auf dem Schlag gibt. So sind Direktsaat und konservierende Bearbeitungsvariante aufgrund der höheren Humus- bzw. C-org. Gehalte sowie der deutlich größeren Aggregatstabilität weniger verschlammungsanfällig als die gepflegte Parzelle (vgl. Kap. 2.3).

Tabelle 6: Humusgehalt, Gehalt an organischem Kohlenstoff (C-org.) und pH-Werte im Untersuchungszeitraum April 2001 (UHLIG 2001)

Parameter	Tiefe	Pflug	Mulch	Direktsaat
Humus [Masse %]	0-5 cm	1,9	2,8	2,6
	5-10 cm	2,0	2,5	2,1
	10-20 cm	2,0	1,9	1,8
C-org. [Masse %]	0-5 cm	1,1	1,6	1,5
	5-10 cm	1,1	1,5	1,2
	10-20 cm	1,2	1,1	1,1
pH-Wert	0-5 cm	6,9	7,1	6,3
	5-10 cm	7,1	7,1	6,8
	10-20 cm	7,1	6,9	6,9

Tabelle 7: Aggregatstabilität vom 05.06.2002

Parameter	Tiefe	Pflug	Mulch	Direktsaat
Aggregatstabilität [%]	0-5 cm	28,3	58,4	70,6

Auch bei den in Tabelle 8 aufgeführten Bodeneigenschaften werden Unterschiede zwischen den drei Bearbeitungsvarianten sichtbar. Zum Beispiel schafft die Pflugvariante in der Tiefe 10 bis 20 cm aufgrund der tieferen Bearbeitung einen lockeren Oberboden als die Direktsaat und die konservierende Variante. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit ist trotz der höheren Dichtlagerung der konservierenden Variante in der Tiefe 10 bis 20 cm sehr hoch (AG BODEN 1994). Die Pflug- und die Direktsaatvariante weisen wegen der geringeren Trockenrohdichte in dieser Tiefe äußerst hohe Wasserleitfähigkeiten auf (AG BODEN 1994).

Laut KA4 der AG BODEN (1994) wird die Feldkapazität als mittel eingestuft. Sie ist bei der Direktsaat am höchsten und bei der konservierenden Variante am geringsten (vgl. Tab. 8).

Tabelle 8: Trockenrohdichte, gesättigte Wasserleitfähigkeit (kF-Wert), Gesamtporenvolumen (GPV) und Wassergehalt bei Feldkapazität im Untersuchungszeitraum Juni/Juli 2002

Parameter	Tiefe	Pflug	Mulch	Direktsaat
Trockenrohdichte [g/cm ³]	0-5 cm	1,41	1,12	1,42
	5-10 cm	1,46	1,29	1,49
	10-20 cm	1,38	1,60	1,51
kF-Wert geometrisches Mittel [cm/d]	0-5 cm	278	1682	623
	5-10 cm	434	550	110
	10-20 cm	811	292	578
GPV [Vol-%]	0-5 cm	46,90	57,9	46,5
	5-10 cm	44,70	51,1	43,8
	10-20 cm	47,80	39,8	42,9
Wassergehalt pF 1,8 [Vol-%]	0-5 cm	34,7	29,2	39,8
	5-10 cm	33,8	30,7	37,3
	10-20 cm	32,5	31,4	34,3

Tabelle 9 zeigt, dass mit abnehmender Bearbeitungsintensität, von Pflug über die konservierende Bearbeitung bis hin zur Direktsaat, die Anzahl der Makroporen stark ansteigt (vgl. Kap. 2.3). Erst ab einer Tiefe von 40 cm gleichen sich die Makroporenzahlen auf den unterschiedlich bearbeiteten Flächen einander an.

Tabelle 9: Makroporendichte: Anzahl vertikaler Poren pro m² > 1 mm; Untersuchungszeitraum: November 2000 (UHLIG 2001)

Tiefe	Pflug	Mulch	Direktsaat
0 cm	282	458	916
10 cm	194	775	987
20 cm	159	1375	1075
30 cm	53	1533	1251
40 cm	1427	1692	1674
50 cm	1604	1427	1322

Aufgrund der im Kapitel 2.3 dargelegten Besonderheiten des Wasser- und Stofftransportes und der hier dargestellten Standorteigenschaften, wurde im Rahmen der Diplomarbeit eine Versuchsmethodik erarbeitet, mit deren Hilfe Wasser- und Stoffflüsse bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung, in Abhängigkeit von differenzierten Vorbedingungen, quantifiziert werden konnten (vgl. Kap. 4).

4 MATERIAL UND METHODEN

Unter Laborbedingungen wurden (bis auf langjährige Lysimeterversuche) bisher nur wenige Untersuchungen zu Wasser- und Stoffflüssen durchgeführt. Meist beschränkten sich diese Untersuchungen auf wassergesättigte Böden. Ziel war es also, eine einfach und schnell durchzuführende Methode für die Messung der Wasser- und Stoffflüsse zu entwickeln, welche sowohl unter gesättigten als auch unter ungesättigten Bedingungen im Labor durchgeführt werden kann. Dabei wurden mehrere Voruntersuchungen durchgeführt, um das methodische Vorgehen bei den Versuchen zu entwickeln und die Vorbedingungen optimal einzustellen.

4.1 GEWINNUNG UNGESTÖRTER BODENSÄULEN SOWIE STECHZYLINDER- UND MISCHPROBEN

Wie im Kapitel 2 beschrieben, wird die Wasser- und damit auch die Stoffverlagerung im Boden von zahlreichen Faktoren beeinflusst. Mit der Bewegung des Bodenwassers können über verschiedene Fließpfade Nährstoffe, Pflanzenschutzmittel etc. in tiefere Bodenschichten oder ins Grundwasser ausgetragen werden. Mittels konservativer Tracer können die Wasserbewegung sowie die Stoffverlagerung simuliert werden. Für die Untersuchung dieser komplexen Zusammenhänge eignen sich Versuche an ungestörten Bodensäulen. Die Vor- und Nachteile solcher Versuche wurden im Kapitel 2.4.1 bereits dargelegt.

Die Probenahme derartiger Bodensäulen erfolgte bei trockener Witterung am 17.05.2002. Die Bodenfeuchte betrug an diesem Tag durchschnittlich 27 Vol-%, was nach KA 4 der AG BODEN (1994) als feucht bis schwach feucht zu bewerten ist. Der Boden mit den Bearbeitungsvarianten Mulch und Direktsaat war kaum und der mit der Pflugvariante stark verschlämmt. Der Mulchbedeckungsgrad zum Probenahmezeitpunkt ist der Tabelle 4 zu entnehmen. Bezüglich der Zielstellung ist die Entnahme ungestörter Bodensäulen erforderlich, damit die differenzierte Porenstruktur der verschiedenen Bearbeitungsvarianten erhalten bleibt.

Die Gewinnung der Proben fand ca. einen Monat nach der Aussaat der Zuckerrüben statt. Der Austrieb der Pflanze (Zweiblattstadium) hatte bereits begonnen.

Pro Bearbeitungsvariante wurden acht Bodensäulen entnommen. Hierfür wurde auf der Untersuchungsfläche, pro Bearbeitungsvariante, ein Messtransect angelegt (vgl. Abb. 7). Der Abstand der Einzelproben auf einer Diagonalen betrug 2 m. Die Proben wurden zwischen den Pflanzenreihen und außerhalb der Fahrspuren entnommen.

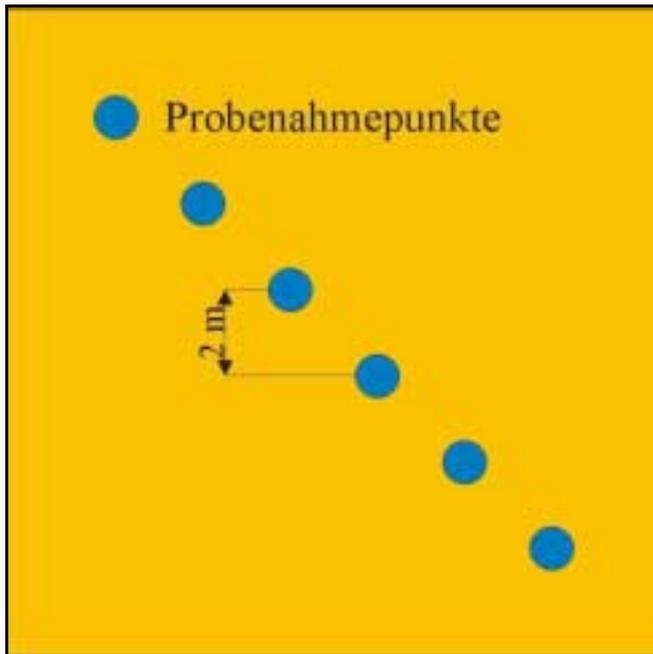


Abb. 7: Messtransekt für die Probenahme

Die Proben wurden mittels speziell angefertigter Hülsen aus Edelstahl entnommen, welche über einen einseitigen Anschlag verfügten, um das Eintreiben zu erleichtern. Der Innendurchmesser der Hülsen betrug 12,5 cm, die Höhe 20 cm. Aufgrund der Bodeneigenschaften (vgl. Kap. 3.2) konnten die mit einer Schlaghaube versehenen Hülsen mittels Körpergewicht ca. 10 bis 15 cm gleichmäßig in den Boden eingedrückt werden. Danach wurde die Hülse mit einem Gummihammer bis zur gewünschten Tiefe von ca. 18 cm eingetrieben. Anschließend wurden diese ausgegraben. Die Unterseite der Bodensäule wurde mit einem Messer begradigt und mit einer Gaze versehen, welche mit Klebeband befestigt wurde. Um Austrocknung sowie biologische Aktivitäten zu mindern bzw. verhindern, wurde die Bodensäule abschließend luftdicht verpackt und bis zur Untersuchung bei 6°C im Kühlschrank aufbewahrt.

Pro Bodensäule wurden zusätzlich in den Bodentiefen 0 bis 5 cm, 5 bis 10 cm und 10 bis 15 cm jeweils drei Stechzylinder (100 cm³) entnommen. An diesen wurden Bodenfeuchte, Trockenrohdichte, pF- und kF-Werte sowie das Gesamtporenvolumen bestimmt, um den Standort im Vorfeld der Säulenversuche besser zu charakterisieren (vgl. Kap. 3.2). Auch diese Proben wurden luftdicht verpackt und im Kühlschrank gelagert.

Zur Bestimmung der Aggregatstabilität wurde pro Bearbeitungsvariante eine Mischprobe aus der Oberkrume (0-5 cm) entnommen (vgl. Kap. 3.2). Diese wurde bis zur weiteren Untersuchung lufttrocken gelagert.

Eine Beeinflussung der Bodensäule, vor allem zwischen Zylinderwand und Bodenprobe, ist aufgrund des skelettarmen bzw. -freien Bodens an diesem Standort unwahrscheinlich.

4.2 DIE TRACERVERLAGERUNGSEXPERIMENTE

Um die Wasserbewegung und Nitratverlagerung zu simulieren, wurden an den gewonnenen Bodensäulen Berechnungs- (ungesättigte Bedingungen) und Überstauversuche (gesättigte Bedingungen) durchgeführt. Dabei wurden die konservativen Tracer Bromid und Chlorid verwendet. Die natürlichen Bromid- bzw. Chloridgehalte im Boden lagen vor den Untersuchungen unterhalb der Nachweisgrenze von 0,2 mg, so dass die im Perkolat enthaltenen Konzentrationen voll den ausgebrachten Tracern zugeordnet werden konnten.

Im Folgenden soll die Entwicklung der Methode und die Durchführung der Berechnungs-, Überstau- und Farbtracerversuche beschrieben werden. Die Untersuchungen fanden in den Monaten Juli und August 2002 statt. Ziel von Voruntersuchungen war es zunächst, das methodische Vorgehen bei den Versuchen zu entwickeln und die Vorbedingungen optimal einzustellen.

4.2.1 Das Berechnungsexperiment

4.2.1.1 Versuchsaufbau

Die Versuchsanlage setzt sich aus zwei Komponenten zusammen (vgl. Abb. 8 und Anlage 2), der Wasserzufuhr mit dem Regnerkopf und der Perkolatentnahme (Zylinder als Untersatz für die Bodenprobe).

1. Die Wasserzufuhr und der Regnerkopf:

Die Wasserzufuhr wird über einen 10 Liter-Kanister gesteuert. Das Wasser tropft in eine Säule mit Überlauf, so dass der Wasserspiegel ständig auf einer einheitlichen Höhe verbleibt. Überschüssiges Wasser fließt durch den Überlauf ab und wird in einem Messbecher aufgefangen. So ist gewährleistet, dass der Wasserdruck für den Regnerkopf und somit die Niederschlagsintensität während der Versuche konstant bleibt. Durch Regulierung der Druckhöhe in der Säule, kann auch die Niederschlagsintensität reguliert werden.

Das Wasser wird von der Säule über einen Schlauch mit 10 mm Innendurchmesser dem Regnerkopf zugeführt. Der Regnerkopf besteht aus dem Endstutzen eines PVC-Abwasserrohres. Die Öffnung ist mit einer Plexiglasscheibe luftdicht verschlossen. In die Plexiglasscheibe ist eine kleine Röhre (Innendurchmesser 10 mm) sowie ein Schlauchende

(Innendurchmesser 4 mm) eingeklebt. Über das Rohr erfolgt die Wasserversorgung und über das Schlauchende wird das System entlüftet. Der Schlauch ist mit einer Schlauchklemme versehen. Die Unterseite des Regnerkopfes wurde mit 49 Bohrungen versehen, welche gleichmäßig auf der Fläche (Durchmesser 12 cm) verteilt sind. Auf jede Bohrung ist eine Metallkanüle mit einem Innendurchmesser von 0,4 mm geklebt. Durch diese feinen Kanülen wird eine gleichmäßige Beregnung mit kleinen Tropfen gewährleistet. Die Tropfen fallen von ca. 8 cm Höhe auf die Oberfläche der Bodenprobe. Die Beregnung kann durch das Schließen einer Schlauchklemme sofort unterbrochen werden.

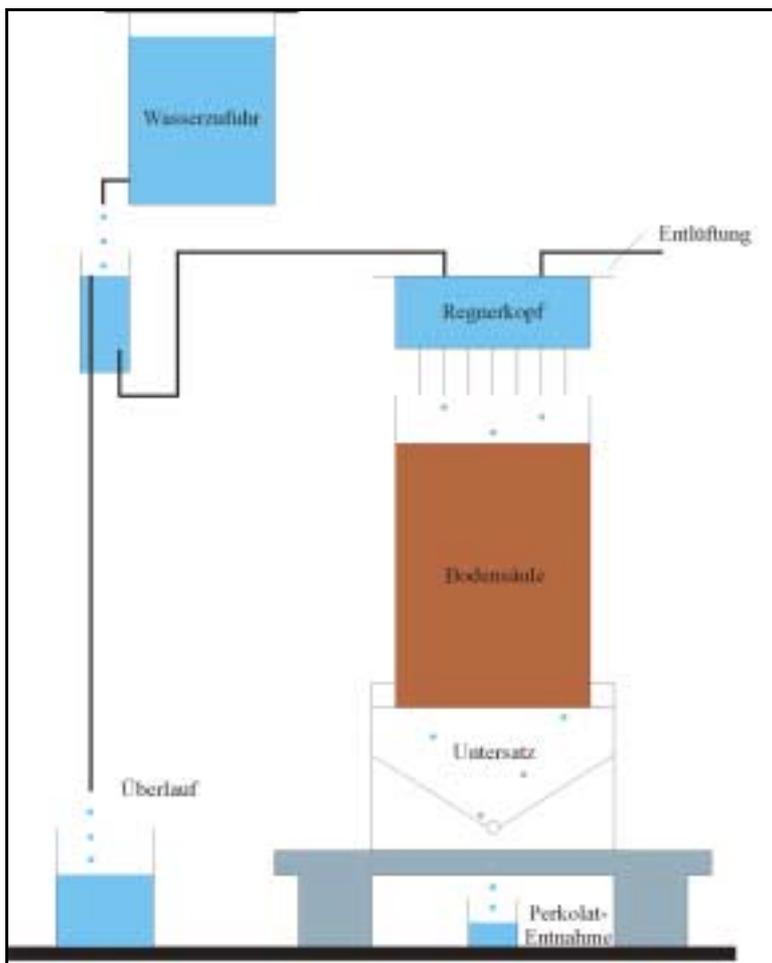


Abb. 8: Schema der Beregnungsanlage

2. Die Perkolatentnahmekomponente:

Die Bodenprobe steht mit der Entnahmhülse auf einem Untersatz. Der Untersatz ist ein Segment eines PVC-Abwasserrohres, in welches ein Trichter eingeklebt ist. Bedeckt wird der Trichter mit einem Plastikgitter, das mit einer Filtergaze versehen ist. Das Trichterende mündet in ein Abflussrohr mit einem Innendurchmesser von 10 mm. Der Einlauf in dieses Rohr ist ebenfalls mit einer Gaze versehen und abgedichtet. Das Abflussrohr ist schräg

eingebaut, so dass ein Wasserstau im Trichter ausgeschlossen werden kann. Anfallendes Perkolat fließt über den Trichter und das Abflussrohr in die Probenbecher ab.

4.2.1.2 Bodensäulenvorbehandlung und Durchführung des Versuches

Um gleiche Vorbedingungen zu schaffen, wurden die Proben basal aufgesättigt. Die Aufsättigung erfolgte in einem Eimer, welcher 10 cm mit entionisiertem Wasser gefüllt war. Durch die langsame Aufsättigung sollten Lufteinschlüsse im Porensystem vermieden werden. Die Aufsättigung dauerte 48 Stunden. Im Anschluss wurden die Proben gewogen. Danach sind die Proben innerhalb von 24 Stunden über eine Mariottsche Flasche auf ca. pF 1,8 (Feldkapazität) entwässert worden. Dazu wurden die Bodensäulen auf einem mit Feinsand gefüllten Zylinder gestellt (vgl. Abb. 9). Dieser Zylinder besitzt am unteren Ende ein Ausflussrohr, welches über einen Schlauch mit der Mariottischen Flasche verbunden ist. Die Mariottsche Flasche ist 63 cm unterhalb der Probenoberfläche angebracht, so dass ein gegebener Unterdruck entsteht, welcher die Probe auf Feldkapazität entwässert. Danach wurden die Proben nochmals gewogen.

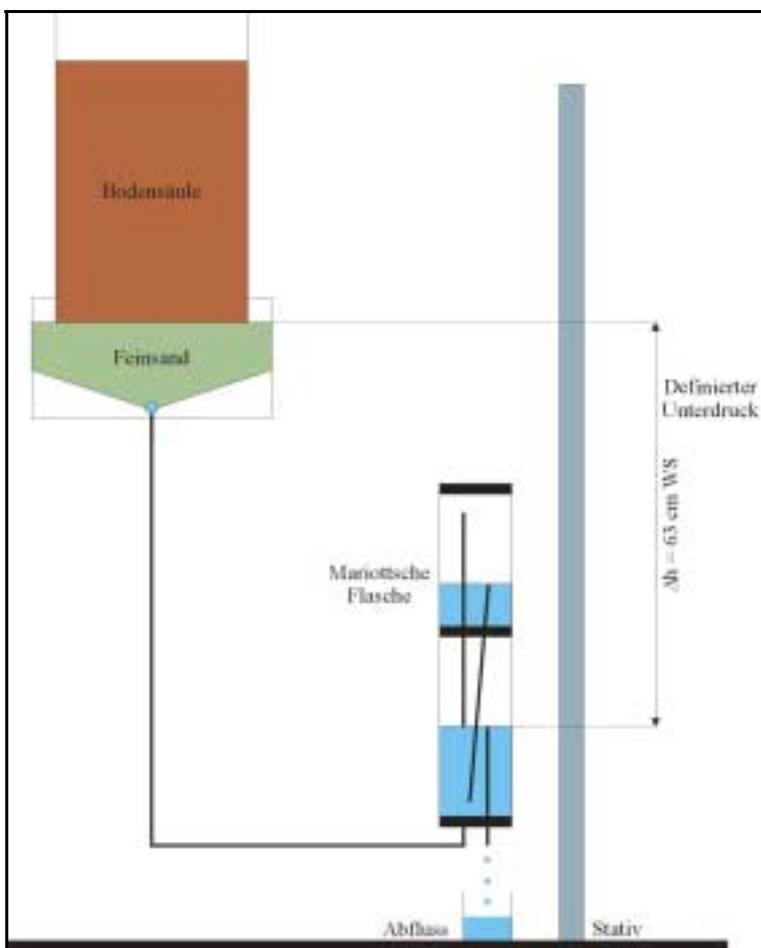


Abb. 9: Entwässerung der Bodensäulen auf Feldkapazität

Der Versuch begann mit einer 1-minütigen Beregnung der Bodenprobe. Im Anschluss wurde 1,1 g fein zermörstertes Kaliumbromid mit einem Salzstreuer gleichmäßig auf der Probe verteilt und anschließend weitere vier Minuten beregnet. Danach wurde die Beregnung für eine Stunde unterbrochen, damit sich der Tracer löst und in die Bodenmatrix eindringt.

Die Menge des Tracers wurde nach den Voruntersuchungen festgelegt. Sie betrug 1100 mg Kaliumbromid (entspricht 738,5 mg Bromid) und richtete sich nach der optimalen Nachweisbarkeit von Bromid mittels Ionenchromatographen.

Nach der 60-minütigen Unterbrechung begann der eigentliche Beregnungsversuch. Jede Bodensäule wurde 450 min beregnet, was in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit etwa dem Austausch von ca. 1,5 Porenvolumen entsprach. Dabei betrug die Beregnungsintensität ca. 15 mm/h. Die Beregnung erfolgte mit entionisiertem Wasser. Nach Beginn des Perkolataustritts wurden alle 5 min Proben entnommen, ab der 250. Minute der Beregnung alle 10 min. Das Perkolat wurde in zuvor eingewogenen Bechergläsern (ca. 70 ml) aufgefangen.

Die Durchflussrate wurde durch Wägung bestimmt. Nach Beendigung der Beregnung erfolgte die genaue Bestimmung des Volumens der Bodensäule. Die dazu notwendige Höhe der Säule wurde aus dem Mittelwert, welcher sich aus acht Einzelwerten errechnete, ermittelt.

Der Untersatz der Bodenprobe wurde nach jedem Versuch mit entionisiertem Wasser gereinigt. Die Perkolate lagerten bis zur Konzentrationsbestimmung von Bromid im Kühlschrank. Die Bodensäulen wurden anschließend für den Überstauversuch vorbereitet, welcher im folgenden Kapitel erläutert wird.

4.2.2 Der Überstauversuch

4.2.2.1 Versuchsaufbau

Die Versuchsanlage (Abb. 10 und Anlage 3) wurde so angelegt, dass Perkolationsversuche unter gesättigten Bedingungen bei variablen Druckhöhengradienten durchgeführt werden konnten. Sie setzt sich im Wesentlichen aus drei Komponenten zusammen: der Wasserzufuhr mit dem Injektor, dem Tracerapplikator sowie der Perkolatentnahme (Untersatz für die Bodensäule mit der Entnahmeröhre).

1. Die Wasserzufuhr:

Die Wasserzufuhr ist nahezu identisch mit der vorab beschriebenen Beregnungsanlage (vgl. Kap. 4.2.1.1). Den einzigen Unterschied bilden die Düsen, über die das Wasser der Probe injiziert wird. Anstelle der Kanülen sind hier auf den Injektor Plastikpipettenaufsätze mit einem Innendurchmesser von 1 mm aufgeklebt. Diese gewährleisten die für diesen Versuch benötigte größere Wasserzufuhr sowie die Wasserinjektion in den Überstau.

2. Die Perkolatentnahme:

Der Untersatz mit der Gummimanschette, auf welchen die Bodensäule mit der Entnahmehülse aufgesetzt wird, besteht aus einem 5 cm langen Teil eines PVC Abwasserrohres. Durch die Gummimanschette wird die Hülse wasser- und luftdicht mit dem Untersatz verbunden. Die Unterseite ist mit einer Plexiglasscheibe versehen. Am unteren Ende ist ein Abflussrohr mit einem Innendurchmesser von 10 mm schräg eingeklebt. Der Einlauf dieses Rohres ist mit einer Gaze versehen. Der Zufluss wird durch eine im Abwasserrohr schräg eingeklebte Platte gesichert. Der Untersatz ist mit Grobsand (\varnothing 1 mm) befüllt. Dieses Substrat besitzt eine ausreichende Wasserleitfähigkeit, um den Wasserfluss der Bodensäule nicht zu behindern.

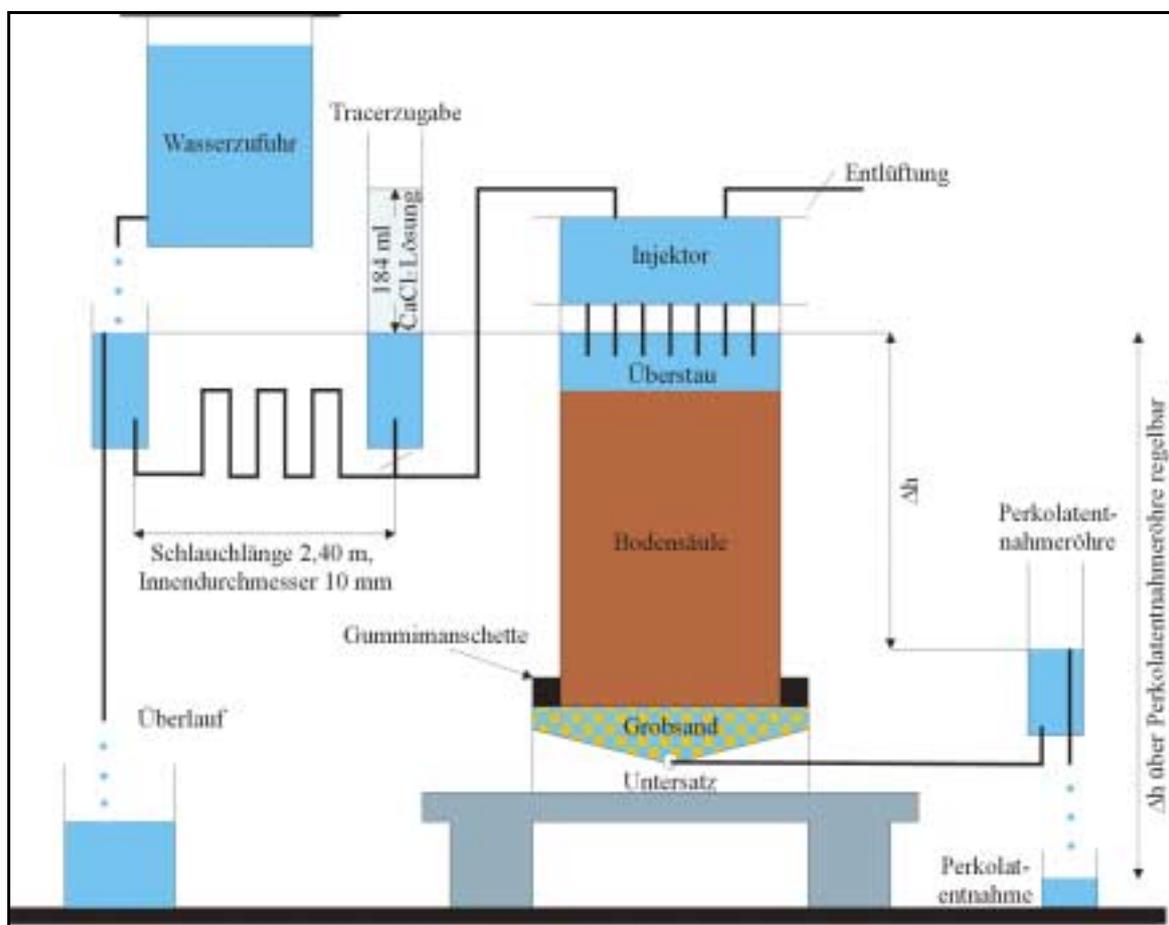


Abb. 10: Schema der Überstauanlage

Das Abflussrohr ist mit der Perkolatentnahmeröhre über einen Schlauch (Innendurchmesser 10 mm) verbunden. Sie ist wie die Röhre, über welche die Wasserzufuhr gesteuert wird, aufgebaut. Über die Entnahmeröhre kann durch Änderung der Druckhöhe eine optimale Fließgeschwindigkeit eingestellt werden. Das Perkolat fließt in die Entnahmeröhre, läuft am Überlauf ab und wird in Bechergläsern aufgefangen.

3. Der Tracerapplikator:

Der Tracerapplikator wurde in die Komponente der Wasserzufuhr integriert, um eine Tracergabe in gelöster Form direkt mit der Wasserzufuhr zu ermöglichen. Hierzu wurde dem System über eine Plexiglasröhre und ein Schlauchsystem (2,40 m, Innendurchmesser 10 mm) ein bestimmtes Volumen der Tracerlösung zugeführt, ohne dabei den Druckhöhengradienten zu verändern.

4.2.2.2 Bodensäulenvorbehandlung und Durchführung des Versuchs

Zu Beginn wurden die Bodensäulen mit den Edelstahlhülsen auf den Untersatz der Überstauanlage gesetzt und mit einer Gummimanschette sowie Schlauchklemmen wasser- und luftdicht verbunden.

Die Sättigung der Bodensäulen erfolgte über die Entnahmeröhre (vgl. Abb. 10). Der Überlauf der Röhre wurde mit einer Schlauchklemme verschlossen. Anschließend wurde die Röhre mit entionisiertem Wasser befüllt, so dass sich die Bodensäule langsam von unten aufsättigte (ca. 24 h). Die Aufsättigung erfolgte, bis ein Überstau von 2 cm erreicht war. Der Wasserspiegel des Überstaus stimmte mit dem der Röhre für die Wasserzufuhr überein. So war eine konstante Überstauhöhe in der Bodensäule gewährleistet. Die Düsen des Injektors wurden in den Überstau getaucht, so dass nun die konstante Überstauhöhe über die Wasserzufuhr geregelt werden konnte (vgl. Abb. 10). Der Überlauf der Entnahmeröhre wurde anschließend wieder geöffnet und die Druckhöhe an der Entnahmeröhre so eingestellt, dass ein gleichmäßiger und beherrschbarer Durchfluss einsetzte.

Nach Abnahme von zwei Perkolatproben an der Entnahmeröhre, wurde die Tracerlösung zugeführt. Als Tracer kam CaCl_2 zum Einsatz. Die Konzentration des Tracers betrug 0,01 mol CaCl_2 . Hierzu wurde ein Gramm CaCl_2 in einem Liter Wasser gelöst. Die applizierte Tracerlösung entsprach ca. einem Fünftel des Porenvolumens (184 ml CaCl_2 entspricht 117,5 mg Cl). Dabei wurde von einem durchschnittlichen Porenvolumen der Bodensäule von 50 % ausgegangen (Mittelwert der Stechzylindermessungen, vgl. Tab. 8). Der Tracer wurde dem System über eine Röhre zugeführt (vgl. Abb. 10 und Anlage 3). Die Länge des Schlauches war so ausgelegt, dass er die Tracerlösung vollständig aufnehmen konnte (vgl.

Kap. 4.2.2.1). Das überschüssige entionisierte Wasser wurde über den Überlauf der Wasserzufuhr herausgedrückt, so dass die Überstauhöhe konstant blieb.

Nachdem die Tracerzugabe durch das Erreichen gleicher Druckverhältnisse zwischen der Röhre mit der Tracerlösung und der Überstauhöhe in der Hülse beendet war, wurde zusätzlich mit einer Schlauchklemme der Tracerappikator von der Wasserzufuhr getrennt. Das nachfließende Wasser verdrängte die Tracerlösung im Schlauch und führte sie über den Injektor in den Überstau der Bodensäule.

Die Perkolatabnahme (ca. 3-5 min) richtete sich nach der Durchflussgeschwindigkeit der Lösung durch die Bodensäule. Das Perkolat wurde in zuvor eingewogenen Bechergläsern (ca. 70 ml) aufgefangen. Nach Austausch von ca. zwei Porenvolumen wurde der Versuch beendet. Die Durchflussrate wurde wie beim Beregnungsversuch durch Wägung bestimmt. Nach Beendigung des Versuches erfolgte die Reinigung des gesamten Systems mit entionisiertem Wasser. Der Grobsand im Untersatz wurde nach jedem Versuch ausgetauscht. Die Perkolate lagerten bis zur Konzentrationsbestimmung von Chlorid im Kühlschrank.

Zur Bestimmung der Dichte und des Porenvolumens der Bodensäulen, wurden diese im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet. An sechs Bodensäulen erfolgte vor der Trocknung der Farbtracerversuch, welcher im nächsten Kapitel erläutert wird.

4.2.3 Der Farbtracerversuch

Mit Hilfe des Farbtracerversuches sollten einerseits die bevorzugten Fließwege in der Bodensäule gekennzeichnet und andererseits der Einfluss von eventuellen Randeffekten untersucht werden.

Der Versuch erfolgte direkt im Anschluss an den Überstauversuch mit selbiger Anlage (vgl. Kap. 4.2.2.1).

Als Farbstoff wurde Brilliant Blau verwendet. Dieser ist laut FLURY/ FLÜHLER (1994 und 1995) zur Einfärbung von Fließpfaden geeignet, da sich die Farbe sehr gut vom Boden abhebt und nur eine geringe Toxizität besitzt. Der Farbstoff wird relativ gut von der Bodenmatrix sorbiert, so dass die eingefärbten Bereiche einen schnellen und direkten Kontakt mit der Tracerlösung erkennen lassen. Jedoch besitzt Brillant Blau aufgrund der Wechselwirkung mit der Bodenmatrix etwas andere Fließeigenschaften als Wasser (FLURY/ FLÜHLER 1995; KASTEEL et al. 2002). Die Bewegung der Farbtracerlösung durch die Bodensäule wird durch diese Wechselwirkung verlangsamt, so dass sie nicht 100 %ig mit der des Wassers vergleichbar ist. Dieser Nachteil ist allerdings für diese Untersuchungen von geringer Bedeutung.

Es wurde ein Gramm Brillant Blau in einem Liter Wasser gelöst. Von dieser Lösung wurden 40 ml in den Überstau injiziert. Der Versuch lief nun so lange weiter, bis der erste Farbtracer die Bodensäule wieder verlassen hatte. Danach wurde der Versuch abgebrochen und die Anlage gereinigt. Die Bodensäulen wurden bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet, danach auseinandergebrochen und angefärbte Fließbahnen fotografisch erfasst.

4.3 TRACERANALYTIK

Zur Bestimmung der Stoffkonzentrationen von Bromid und Chlorid in den einzelnen Perkolaten wurde ein Ionenchromatograph (HPLC-Gerät der Firma BIO RAD) verwendet (vgl. Anhang 1).

Vor der Beprobung hatten die Perkolate eine konstante Temperatur von 10 °C, so dass Fehler aufgrund unterschiedlicher Temperaturen der Proben ausgeschlossen werden können.

Nach Ermittlung der einzelnen Konzentrationen wurden Durchbruchkurven erstellt (vgl. Abb. 11). Mit Hilfe der Durchbruchkurven soll der zeitliche Verlauf der Konzentration der Tracerlösung (Bromid, Chlorid) im Ausfluss der Bodensäule, d.h. der Wasser- und Stofffluss, beschrieben werden (vgl. Kap. 5.2 und 5.3).

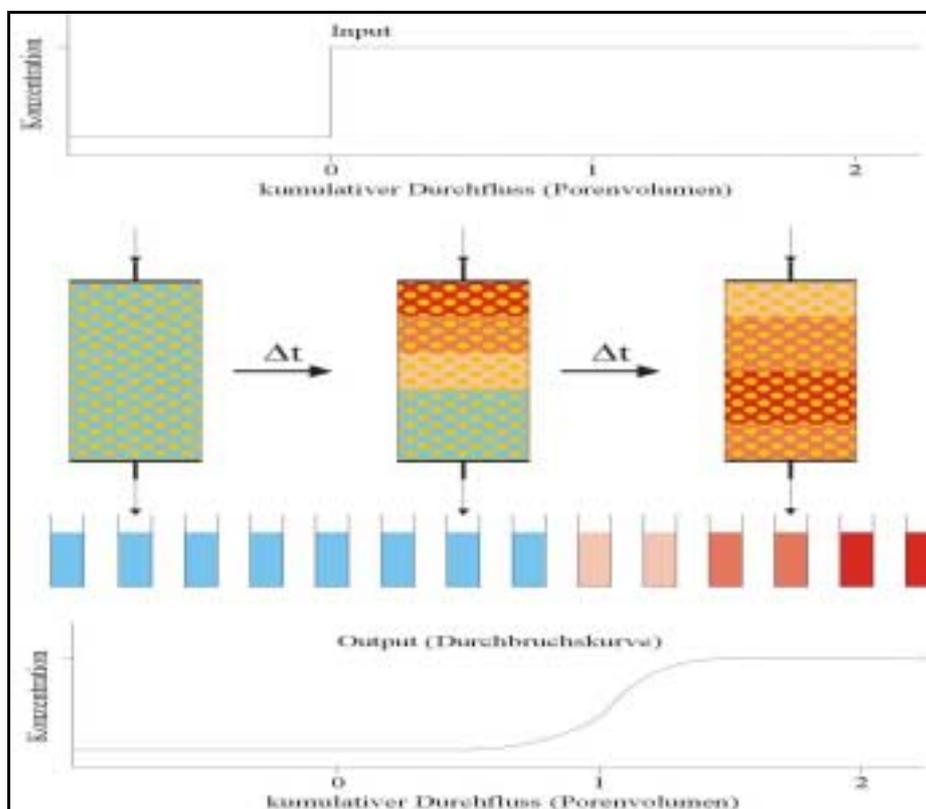


Abb. 11: Prinzip einer Durchbruchkurve (verändert nach GISI 1990)

4.4 ERMITTLUNG DER BODENWASSERBEWEGUNG, DER DICHTEN UND DES PORENVOLUMENS AN DEN BODENSÄULEN

Nach der Bestimmung des Trockengewichtes, wurden Dichte, Porenvolumen und die kF-Werte für die untersuchten Bodensäulen ermittelt. Diese Werte sollten neben den der Stechzylinder, den Einfluss der unterschiedlichen Bodenbearbeitung auf die Bodeneigenschaften widerspiegeln. Vor allem die kF-Werte sind für die Auswertung der Bodenwasserbewegung von großer Bedeutung.

Die kF-Werte wurden durch Umstellung der Darcy Gleichung (vgl. Kap. 2.1.1, Gleichung 1) nach K ermittelt (vgl. Gleichung 7). Die im Überstauversuch verwendeten Größen wurden dabei in diese Gleichung eingesetzt (vgl. Abb. 12 und Gleichung 8).

Gleichung 7: Formel für die Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit (K) nach Umstellung des Darcy Gesetzes

$$\boxed{K = \frac{q \cdot dz}{d\psi_h}} \quad \text{mit} \quad \boxed{q = \frac{Q}{A \cdot t}} \quad \boxed{d\psi_h = \Delta z + \Delta h} \quad \boxed{dz = \Delta l}$$

Gleichung 8: Formel für die Berechnung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (K_f) der Bodensäulen

$$\boxed{K_f = \frac{Q \cdot \Delta l}{A \cdot t \cdot (\Delta z + \Delta h)}}$$

K_f	gesättigte Wasserleitfähigkeit	(cm/s)
q	Flussrate	(cm/s)
Q	Durchflussmenge	(cm ³)
A	Fläche	(cm ²)
t	Zeitintervall	(s)
Δl	Ortskoordinate in vertikaler Richtung (Länge der Bodensäule)	(cm)
Δz	Gravitationspotential (entspricht der Länge der Bodensäule)	(cm)
Δh	Matrixpotential (Druckhöhe)	(cm)

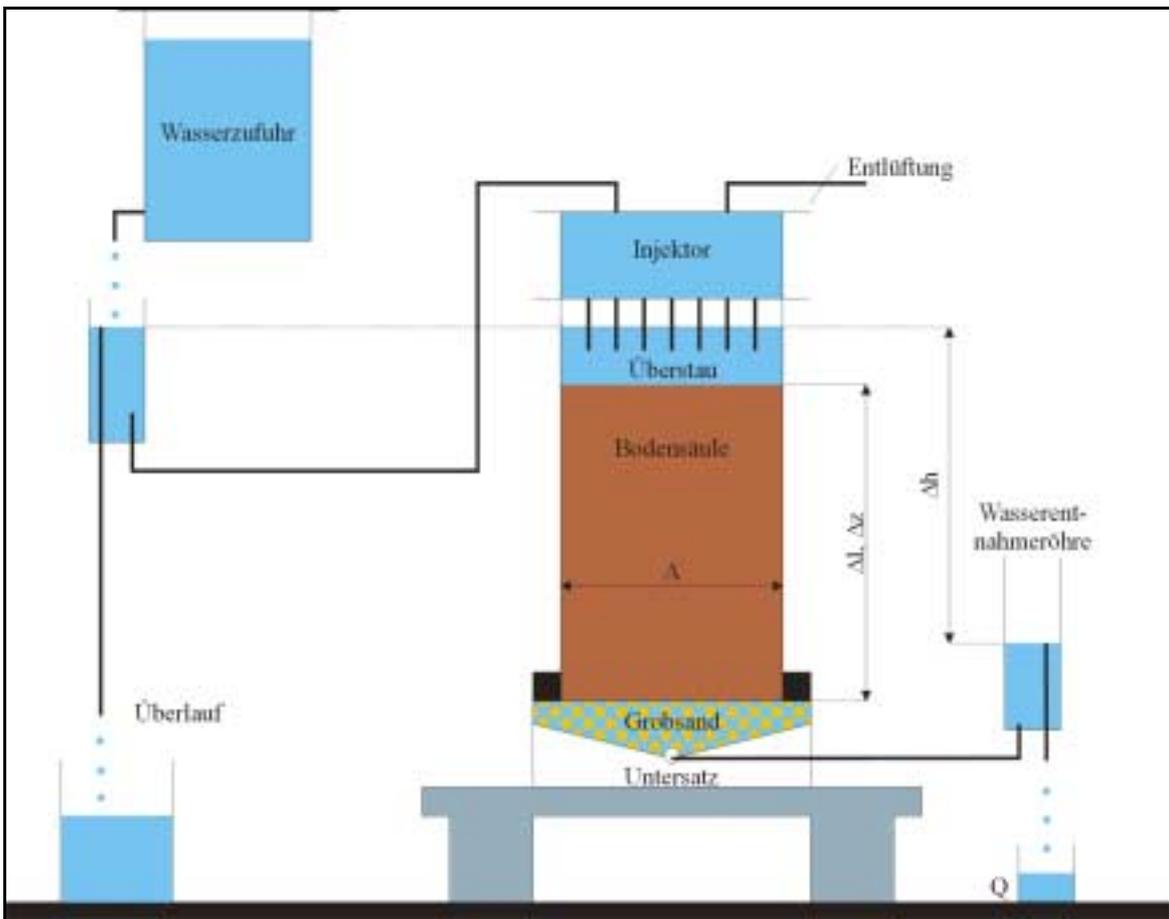


Abb. 12: Schematische Darstellung der Größen für die Berechnung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (K_f) der Bodensäulen an der Überstauanlage

Die Trockenrohddichte sowie das Gesamtporenvolumen der Bodensäulen wurden wie bereits im Kapitel 3.2 erläutert, bestimmt.

Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt und im Kapitel 6 diskutiert, so dass eingeschätzt werden kann, ob die angewandte Methode zur Lösung der Problemstellung geeignet ist.

5 DAS STOFFTRANSPORTEXPERIMENT UND SEINE ERGEBNISSE

Die Darstellung der Ergebnisse gliedert sich in vier Teile:

1. Abbildung bodenphysikalischer Kenngrößen der Bodensäulen, welche zur besseren Interpretation des Beregnungs- und Überstauversuches dienen.
2. Darstellung der Ergebnisse der Tracerverlagerung beim Beregnungsversuch
3. Darstellung der Ergebnisse der Tracerverlagerung beim Überstauversuch
4. Abbildung der bevorzugten Fließbahnen beim Farbtracerversuch

Der Beregnungs- und Überstauversuch wurde an allen 24 Bodensäulen durchgeführt. Die Bodensäule P1 (Variante Pflug, 1. Bodensäule) diente dabei als Testsäule zur optimalen Einstellung der Anlagen, so dass die Ergebnisse dieser Säule nicht mit aufgeführt werden. Der Farbtracerversuch wurde an drei Bodensäulen jeder Bearbeitungsvariante durchgeführt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in Boxplots dargestellt. In Abb. 13 ist ein Boxplot abgebildet, an welchem die verwendeten Größen beschrieben werden, da in den folgenden Boxplot-Diagrammen auf eine Legende verzichtet wird.

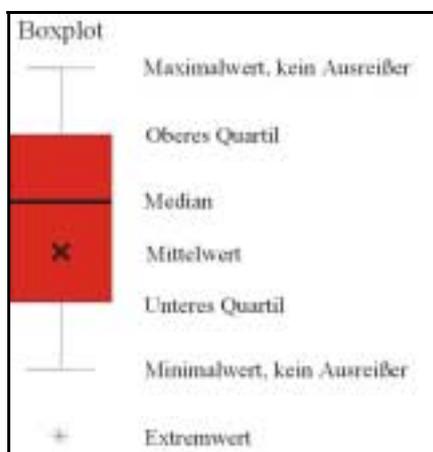


Abb. 13: Beschreibung der Größen eines Boxplots

Die Bodensäulen der gepflügten Fläche waren alle stark verschlämmt, wogegen die der Konservierenden und der Variante Direktsaat kaum oder gar nicht verschlämmt waren und eine Streuauflage besaßen (vgl. Abb. 14).

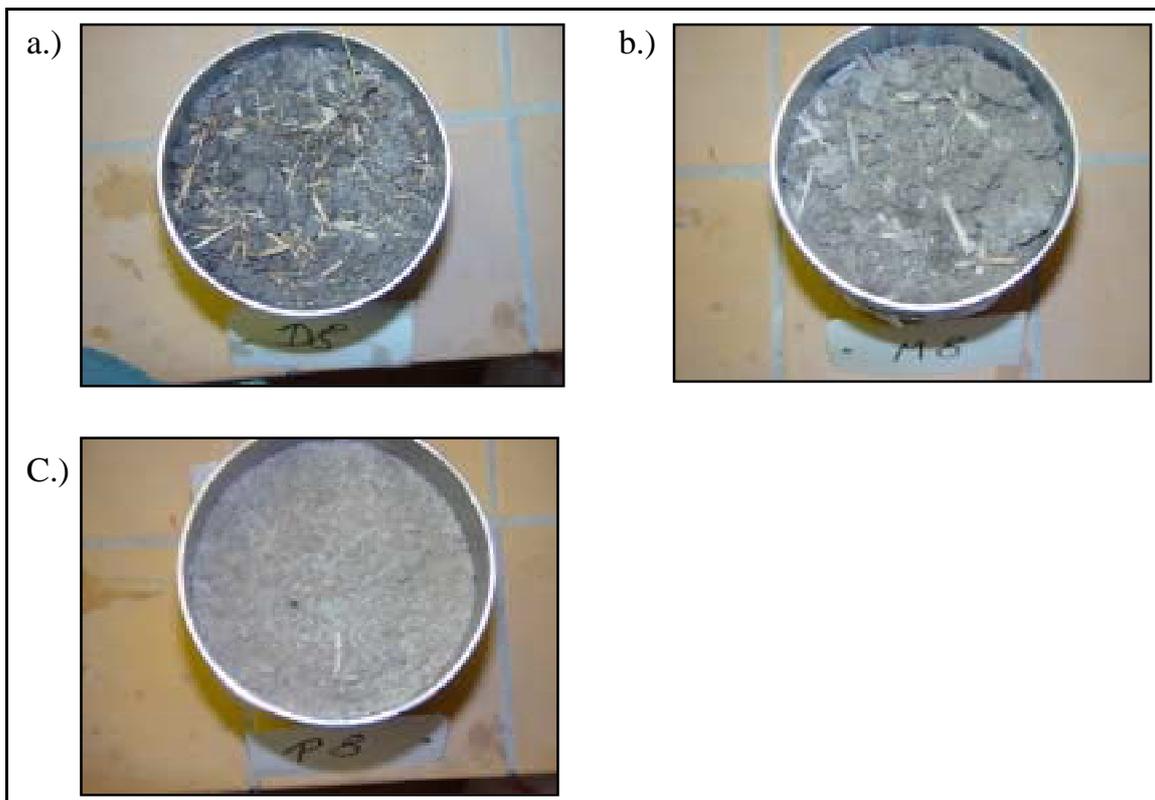


Abb. 14: Oberflächen der drei Bearbeitungsvarianten. (a) Direktsaat: stabile Bodenaggregate, unverschlammte Bodenoberfläche mit Streuauflage; (b) Mulch: stabile Bodenaggregate, unverschlammte Bodenoberfläche mit Streuauflage; (c) Pflug: instabile Bodenaggregate, Bodenoberfläche stark verschlammmt

5.1 BODENPHYSIKALISCHE KENNGRÖßEN DER BODENSÄULEN

Neben der Bestimmung der Trockenrohddichte und des Porenvolumens wurden an jeder Bodensäule der Wassergehalt bei $pF-1,8$ (vgl. Anhang 1) sowie der kF -Wert (vgl. Kap. 4.4) untersucht.

Diese Parameter sind stark von der Bodenbearbeitung abhängig. So weisen beispielsweise gelockerte Bodenschichten gegenüber ungelockerten eine geringere Lagerungsdichte auf.

Die an den Bodensäulen ermittelten bodenphysikalischen Kenngrößen werden in Tabelle 10 zusammengefasst dargestellt.

5.1.1 Trockenrohddichte

Bei der Auswertung der Trockenrohddichten konnten zwischen den einzelnen Bearbeitungsvarianten kaum Unterschiede festgestellt werden. Laut KA 4 der AG BODEN (1994) wird der Mittelwert der Trockenrohddichten der drei Bearbeitungsvarianten mit Werten von

1,25 - 1,45 g/cm³ als gering eingestuft. Lediglich zwei Bodensäulen der Variante Direktsaat werden bezüglich der Trockenrohddichte als mittel (1,51 und 1,46 g/cm³) und eine Bodensäule der konservierenden Variante als sehr gering (1,24 g/cm³) eingestuft (vgl. Tab. 10).

So betrug die mittlere Trockenrohddichte der Variante **Direktsaat** 1,43 g/cm³, die Standardabweichung 0,044 g/cm³, der Minimalwert 1,37 g/cm³ und der Maximalwert 1,51 g/cm³ (vgl. Abb. 15 und Tab. 10).

In den Bodensäulen der **konservierend** bearbeiteten Variante betrug die Trockenrohddichte im Durchschnitt 1,31 g/cm³, die Standardabweichung 0,057 g/cm³, das Minimum 1,24 g/cm³ und das Maximum 1,42 g/cm³ (vgl. Abb. 15).

Die mittlere Trockenrohddichte der **konventionell** bearbeiteten Variante betrug 1,39 g/cm³, die Standardabweichung 0,053 g/cm³, das Minimum 1,32 g/cm³ und das Maximum 1,45 g/cm³ (vgl. Abb. 15).

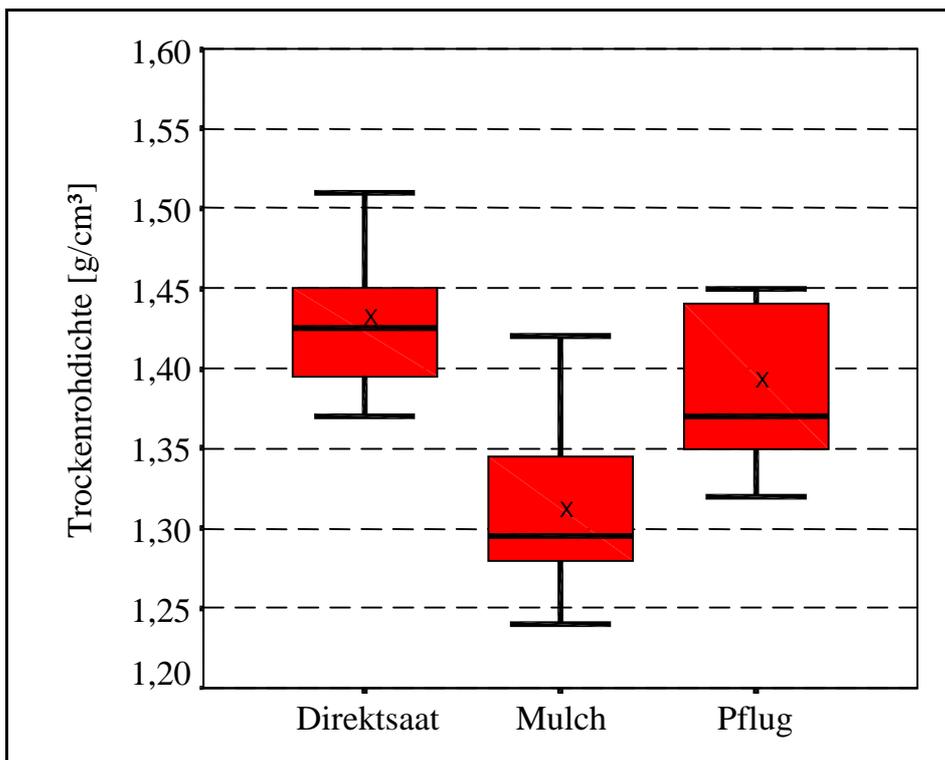


Abb. 15: Trockenrohddichte der Bodensäulen

5.1.2 Gesamtporenvolumen

Ein Zusammenhang ist zwischen der Trockenrohddichte, dem Gesamtporenvolumen sowie dem Wassergehalt bei pF 1,8 zu erkennen (vgl. Tab. 10).

So weist die Variante **Direktsaat** aufgrund der höheren Trockenrohddichte das geringste Gesamtporenvolumen auf. Es betrug im Mittel 46,21 Vol.-%. Die Standardabweichung war 1,6 Vol.-%. Der Minimalwert betrug 43,2 Vol.-% und der Maximalwert 48,4 Vol.-% (vgl. Abb. 16).

Für die **konservierend** bearbeitete Fläche wurde aufgrund der geringeren Trockenrohddichte im Mittel das größte Gesamtporenvolumen von 50,6 Vol.-% ermittelt. Die Standardabweichung betrug für diesen Versuch 2,2 Vol.-%, das Minimum 46,4 Vol.-% und das Maximum 53,2 Vol.-% (vgl. Abb. 16).

Das Gesamtporenvolumen der Bodensäulen der **konventionellen** Variante lag zwischen den Werten der Direktsaat und der konservierenden Variante. Es betrug 47,3 Vol.-% bei einer Standardabweichung von 1,9 Vol.-% sowie einem Minimalwert von 45,2 Vol.-% und einem Maximalwert von 49,9 Vol.-% (vgl. Abb. 16).

Tabelle 10: Bodenphysikalische Kennwerte der Bodensäulen. GPV = Gesamtporenvolumen; MW = Mittelwert; Stabw. = Standardabweichung; D = Direktsaat; M = Mulch; P = Pflug

Probe	Bodenphysikalische Kennwerte											
	Dichte [g/cm ³]	MW [g/cm ³]	Stabw.	pF1,8 [Vol%]	MW [Vol%]	Stabw.	GPV [Vol%]	MW [Vol%]	Stabw.	kF-Wert [cm/d]	MW [cm/d]	Stabw.
D1	1,51			33,11			43,15			113,97		
D2	1,37			32,29			48,43			113,03		
D3	1,42			32,11			46,55			142,80		
D4	1,44			31,13			45,67			126,20		
D5	1,40			32,15			47,21			226,00		
D6	1,46			32,03			45,07			24,13		
D7	1,39			32,88			47,40			231,79		
D8	1,43	1,43	0,044	33,34	32,38	0,71	46,20	46,21	1,62	82,42	132,54	69,41
M1	1,42			27,05			46,41			197,98		
M2	1,32			25,95			50,32			149,98		
M3	1,24			28,66			53,24			179,37		
M4	1,27			30,11			52,25			199,90		
M5	1,29			29,01			51,41			207,47		
M6	1,29			28,59			51,44			202,80		
M7	1,37			32,14			48,42			116,60		
M8	1,30	1,31	0,058	29,46	28,87	1,87	51,01	50,56	2,19	259,27	189,17	42,30
P2	1,44			25,42			45,60			33,95		
P3	1,35			29,72			49,05			70,31		
P4	1,35			28,88			49,03			98,44		
P5	1,32			29,62			49,86			34,33		
P6	1,37			29,68			48,33			167,31		
P7	1,45			30,57			45,19			0,33		
P8	1,44	1,39	0,053	30,80	29,24	1,80	45,69	47,53	1,92	2,61	58,18	59,54

5.1.3 Wassergehalt bei pF 1,8

Ein ähnliches Bild zeichnen die Werte der Wassergehalte bei pF 1,8 (vgl. Tab. 10).

In der Variante **Direktsaat** wurde bei pF 1,8 der mittlere Wassergehalt von 32,4 Vol.-% ermittelt, die Standardabweichung betrug 0,7 Vol.-%. Der Minimalwert betrug 31,1 Vol.-% und der Maximalwert 33,3 Vol.-% (vgl. Abb. 17).

Die Böden der konventionell und konservierend bearbeiteten Flächen wiesen etwas geringere Wassergehalte auf, unterschieden sich aber untereinander kaum.

So betrug der mittlere Wassergehalt bei pF 1,8 in den Böden der **konservierend** bearbeiteten Variante 28,9 Vol.-% bei einer Standardabweichung von 1,9 Vol.-%. Als Minimum wurde ein Wert von 26,0 Vol.-% und als Maximum ein Wert von 32,1 Vol.-% ermittelt (vgl. Abb. 17).

Bei der **konventionell** bearbeiteten Fläche betrug der mittlere Wassergehalt 29,2 Vol.-%. Die Standardabweichung war hier 1,8 Vol.-%. Der Minimalwert betrug 25,4 Vol.-% und der Maximalwert 30,8 Vol.-% (vgl. Abb. 17).

Die Mittelwerte der Wassergehalte bei pF 1,8 werden bei allen drei Varianten nach KA 4 der AG Boden (1994) als mittel (26-39 Vol.-%) eingestuft.

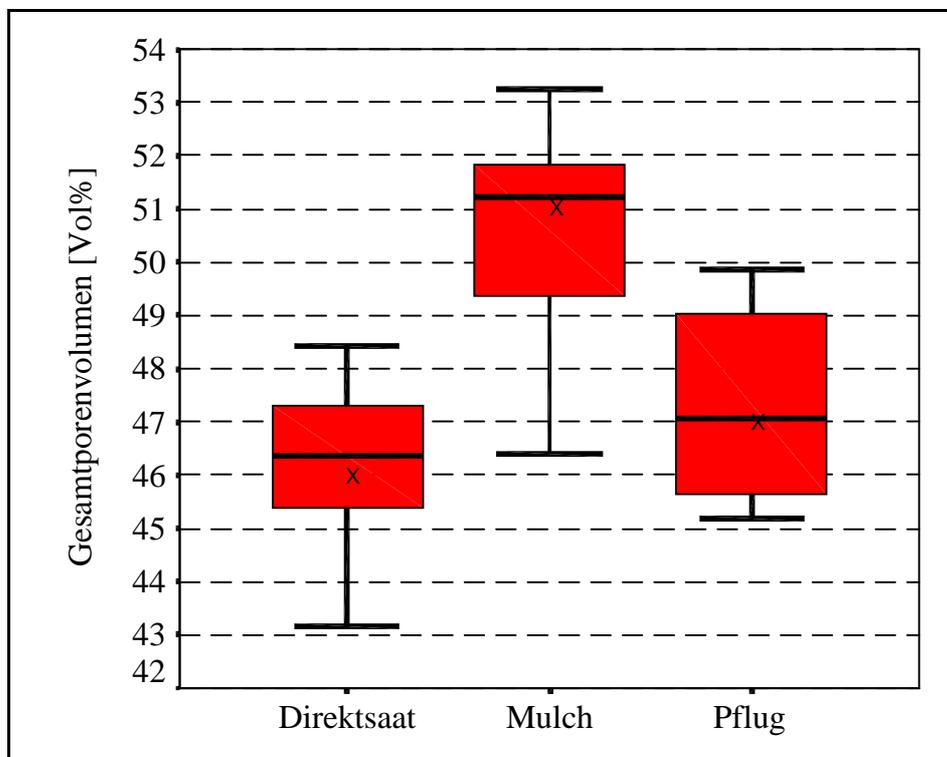


Abb. 16: Gesamtporenvolumen der Bodensäulen

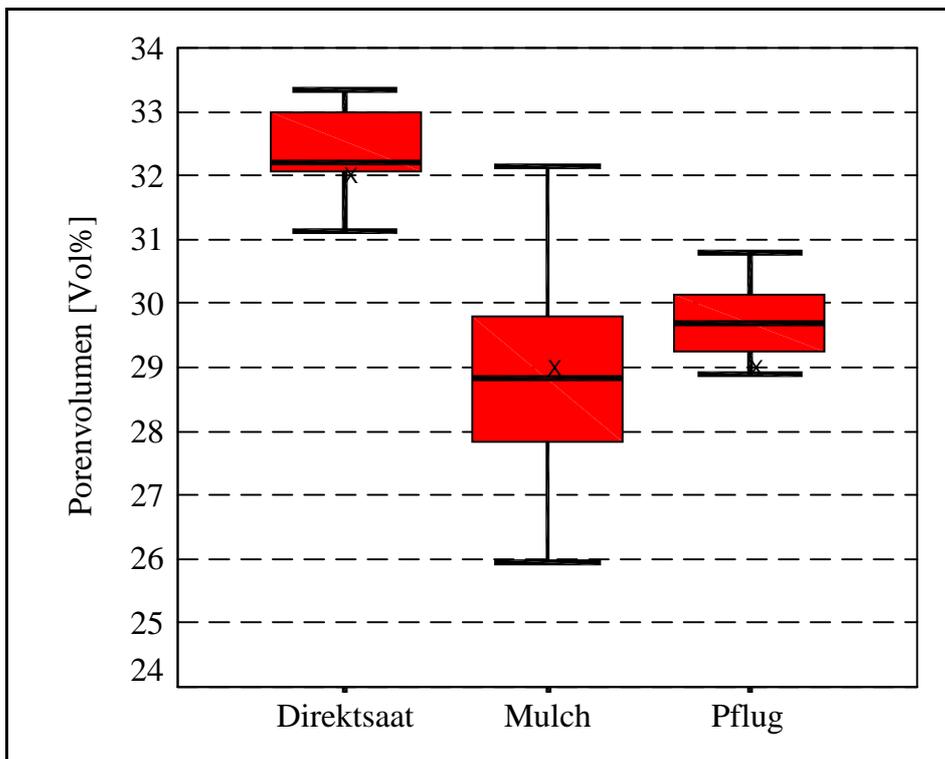


Abb. 17: Wassergehalt der Bodensäulen bei pF1,8

5.1.4 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Während des Überstauversuches wurde die gesättigte Wasserleitfähigkeit (kF-Wert) der einzelnen Bodensäulen bestimmt. Die Berechnung der gesättigten Leitfähigkeiten erfolgte anhand der gemessenen Durchflussraten. Vergleicht man die kF-Werte der einzelnen Proben, so zeigen sich erhebliche Abweichungen (vgl. Tab. 10). Die kF-Werte streuen laut KA 4 der AG BODEN (1994) von sehr gering (< 1 cm/d) bis sehr hoch (100 - 300 cm/d). Für einen lehmig sandigen Schluff ist bei mittlerer Trockenrohdichte eine gesättigte Wasserleitfähigkeit von ca. 50 cm/d in der KA 4 der AG BODEN (1994) angegeben, was als hoch (40 - 100 cm/d) einzustufen ist.

Die Böden der konservierenden Variante verfügten im Mittel über die höchsten gesättigten Wasserleitfähigkeiten. Dagegen wies die konventionelle Variante wesentlich niedrigere Werte auf. Die kF-Werte der Variante Direktsaat lagen zwischen diesen beiden. Nach KA 4 der AG BODEN (1994) werden die kF-Werte der konservierenden Variante und Direktsaat als sehr hoch und die der konventionellen Variante als hoch eingestuft.

Während des Versuches war auffällig, dass die Durchflussraten bei einigen Bodensäulen stark schwankten. Es kam sowohl zur Abnahme als auch zur Zunahme der Durchflussraten. Jedoch überwog die Abnahme dieser. Für die Mehrzahl der Proben wurden zu Beginn

der Messung die größten Durchflussraten ermittelt, welche im Laufe des Versuches leicht abfielen.

Bei den kF-Werten zeigten sich große Unterschiede zwischen den einzelnen Bearbeitungsvarianten (vgl. Abb. 18 und Tab. 10). In den Böden der Variante **Direktsaat** betrug die mittlere gesättigte Wasserleitfähigkeit 132,54 cm/d. Die Standardabweichung betrug 69,4 cm/d, der Minimalwert 24,13 cm/d und der Maximalwert 231,8 cm/d (vgl. Abb. 18).

Bei der **konservierend** bearbeiteten Variante wurden folgende Werte ermittelt: Der mittlere kF-Wert betrug hier 189,2 cm/d, die Standardabweichung war 42,3 cm/d, der Minimalwert 116,6 cm/d und der Maximalwert lag bei 259,3 cm/d (vgl. Abb. 18).

In der **konventionellen** Variante betrug der kF-Wert 58,2 cm/d, die Standardabweichung 59,5 cm/d, das Minimum 0,33 cm/d und das Maximum 167,3 cm/d (vgl. Abb. 18).

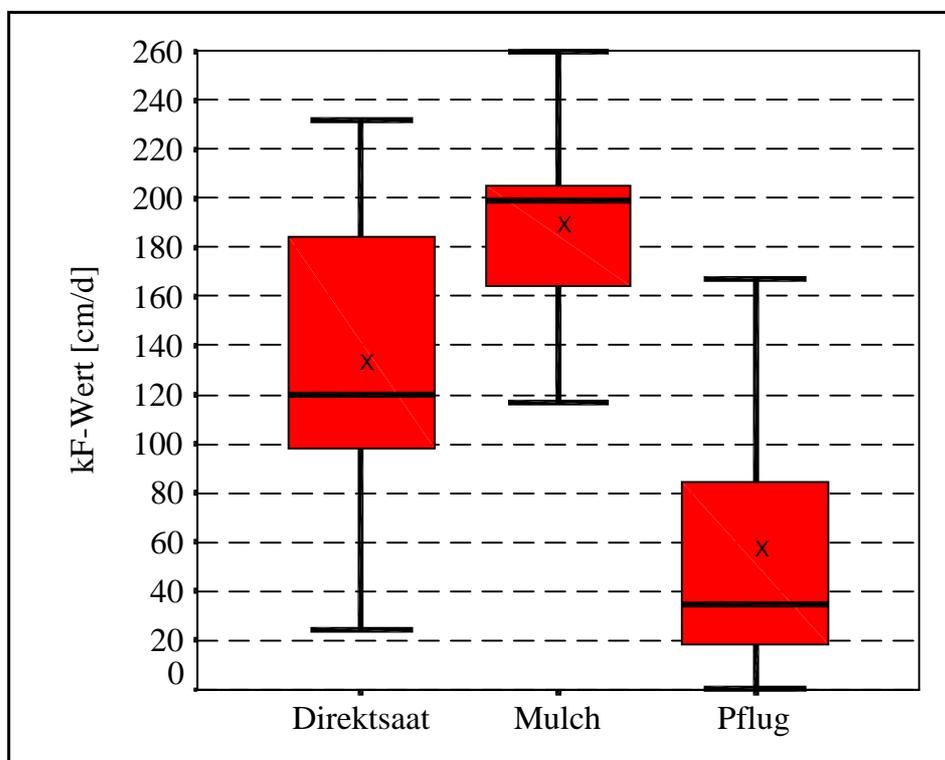


Abb. 18: Gesättigte Wasserleitfähigkeit der Bodensäulen

5.2 DIE TRACERVERLAGERUNG BEIM BERECHNUNGSVERSUCH

Die Auswertung des Berechnungsversuches zeigt, dass auf allen drei Bearbeitungsvarianten sehr frühe Tracerdurchbrüche zu verzeichnen sind. In der Abbildung 19 sind die gemessenen Durchbruchkurven der Bodenbearbeitungsvarianten Direktsaat, Konservierend und Konventionell dargestellt. Um eine bessere visuelle Vergleichbarkeit der einzelnen Durch-

bruchskurven zu ermöglichen, wurde auf der Ordinate die Bromidkonzentration in allen Diagrammen auf einen Höchstwert von 2600 mg/l festgelegt (vgl. Abb. 19).

Die dargestellten Durchbruchskurven zeigen, dass bei 21 der 23 untersuchten Proben das Konzentrationsmaximum deutlich vor dem Bodenwasseraustausch entsprechend eines Porenvolumens eintrat. Das heißt, es muss zu einem der Hauptinfiltrationsfront der Bodenmatrix vorauseilenden schnellen Fluss gekommen sein (vgl. Kap. 2.1.2). Im Extremfall wurde das Konzentrationsmaximum schon in der ersten Perkolatprobe ermittelt. Die ausgeflossene Perkolatmenge entsprach dabei nur 0,01 Porenvolumen der jeweiligen Bodensäule (vgl. D5, D7 D8 in Abb. 19). Bei einer Probe (vgl. P7 in Abb. 19) konnte selbst nach 450 min noch kein Perkolat entnommen werden, so dass dieser Versuch abgebrochen wurde.

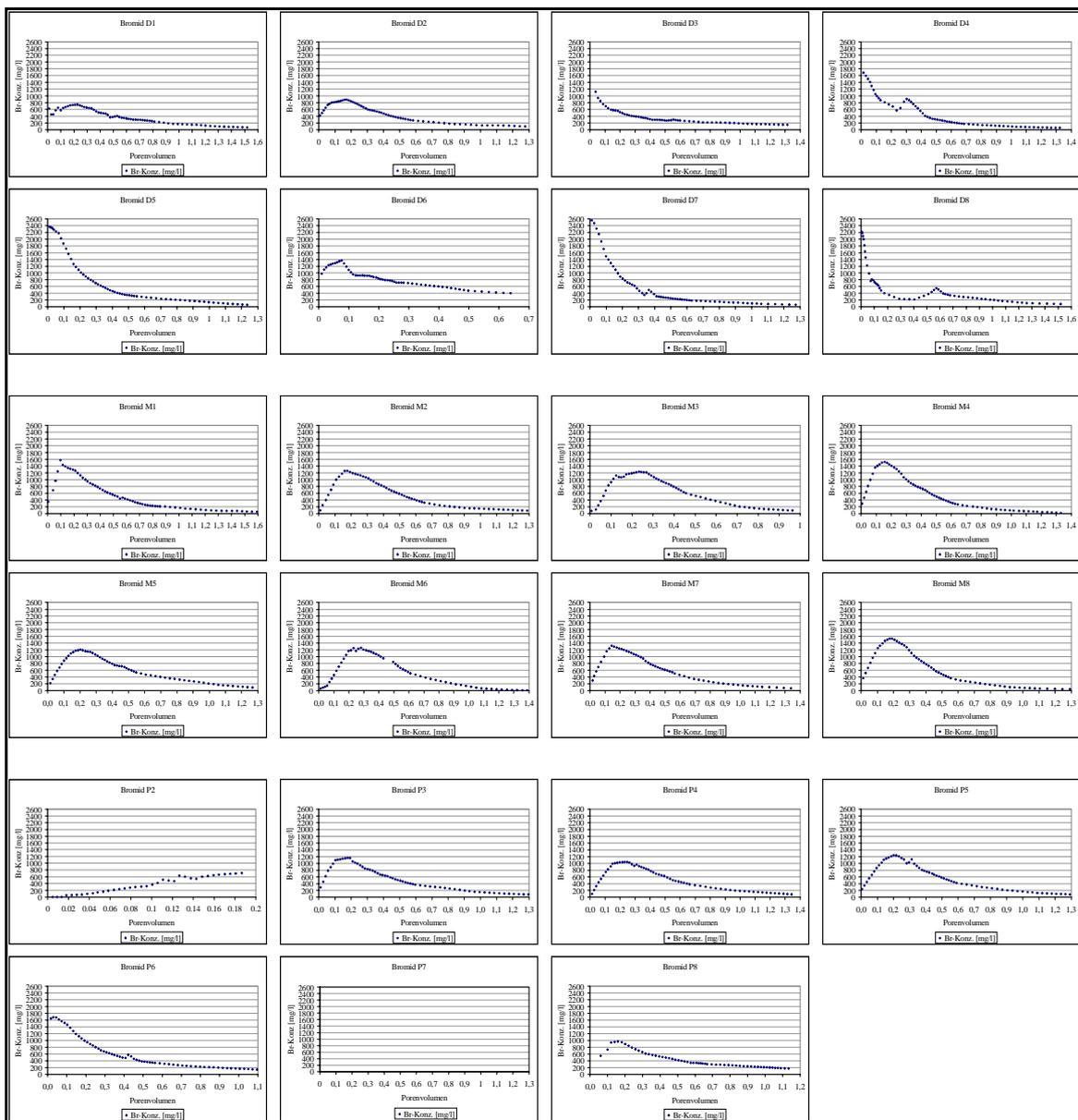


Abb. 19: Beregnungsversuch: Durchbruchskurven der Varianten Direktsaat (D1 – D8), Mulch (M1 – M8) und Pflug (P2 – P8)

Die Durchbruchkurven zeichnen sich in fast allen Fällen durch eine ausgeprägte rechts-schiefe Gestalt (linksgipflige Verteilung) aus. Sie lassen sich grob in zwei Kurventypen kategorisieren. Die Mehrzahl der Proben ist durch einen "mäßigen" präferentiellen Fluss gekennzeichnet, das heißt die Anstiege der Durchbruchkurven verlaufen eher flach, mit einem Konzentrationsmaximum vor dem Austausch eines Porenvolumens (vgl. z.B. P3, P4, P8 und M3, M5, M6 in Abb. 19). Im Gegensatz dazu sind ein Teil der Proben durch einen "sehr starken" präferentiellen Fluss gekennzeichnet (vgl. z.B. D3, D4, D5, D7, D8 in Abb. 19). Hier haben die Durchbruchkurven ihr Konzentrationsmaximum zu Beginn bzw. steigen extrem stark an. Nach dem Konzentrationsmaximum fällt die Durchbruchkurve sehr rasch wieder ab.

5.2.1 Beschreibung der Durchbruchkurven

Um die Unterschiede zwischen den einzelnen Bearbeitungsvarianten besser herauszustellen, wurden die mittleren Durchbruchkurven der Bearbeitungsvarianten berechnet und miteinander verglichen (vgl. Abb. 20). Dabei traten Unterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten auf. Die Standardabweichungen sind der Tabelle 11 und Minimal- und Maximalwerte den Abbildungen 21 – 23 zu entnehmen.

Im Mittel trat das erste Perkolat bei der Variante **Direktsaat** schon nach 28 min aus (vgl. Abb. 21), die Bromidkonzentration betrug hier 319,2 mg/l (vgl. Abb. 20). Das Konzentrationsmaximum der Variante Direktsaat lag bei ca. 1442 mg/l und wurde nach einem Durchfluss von 0,04 Porenvolumen erreicht (vgl. Abb. 20). Nach dem Konzentrationsmaximums fiel die Durchbruchkurve sehr steil ab (vgl. Abb. 20).

Bei der **konservierenden** Variante trat das erste Perkolat im Mittel nach 36 min aus (vgl. Abb. 21). Die Bromidkonzentration betrug in dieser Perkolatprobe 36,2 mg/l (vgl. Abb. 20). Das Konzentrationsmaximum lag bei ca. 1260 mg/l. Es wurde nach 0,2 Porenvolumen erreicht (vgl. Abb. 20). Auch hier war nach dem Erreichen des Konzentrationsmaximums ein steiler Abfall der Durchbruchkurve zu erkennen. Dieser war jedoch nicht so extrem wie in der Variante Direktsaat (vgl. Abb. 20).

Bei der **konventionell** bearbeiteten Variante trat das erste Perkolat im Mittel nach 104 min aus (vgl. Abb. 21) und hatte eine Bromidkonzentration von 311,3 mg/l (vgl. Abb. 20). Das Konzentrationsmaximum betrug ca. 749 mg/l und wurde nach einem Durchfluss von 0,16 Porenvolumen erreicht (vgl. Abb. 20). Die Durchbruchkurve lief nach Erreichen des Konzentrationsmaximums relativ flach aus (vgl. Abb. 20).

Das heißt, die Variante Direktsaat war durch einen "sehr starken", vermutlich durch Makroporen bedingten, Stofftransport gekennzeichnet. Aber auch die konservierend bearbeitete Variante wies noch einen "starken" Stoffaustrag über bevorzugte Pfade auf. Bei der konventionellen Variante wurden ebenfalls Stoffe über die Makroporen ausgetragen. Allerdings waren die Bromidkonzentrationen wesentlich geringer als bei den anderen Bearbeitungsvarianten.

Betrachtet man die einzelnen Durchbruchkurven, so besitzen neun von ihnen einen Doppelpeak (vgl. Abb. 19 D1, D4, D7, D8, P5, P6, M3, M4, M6). Dieser befindet sich in allen Fällen vor einem Austausch von 0,6 Porenvolumen.

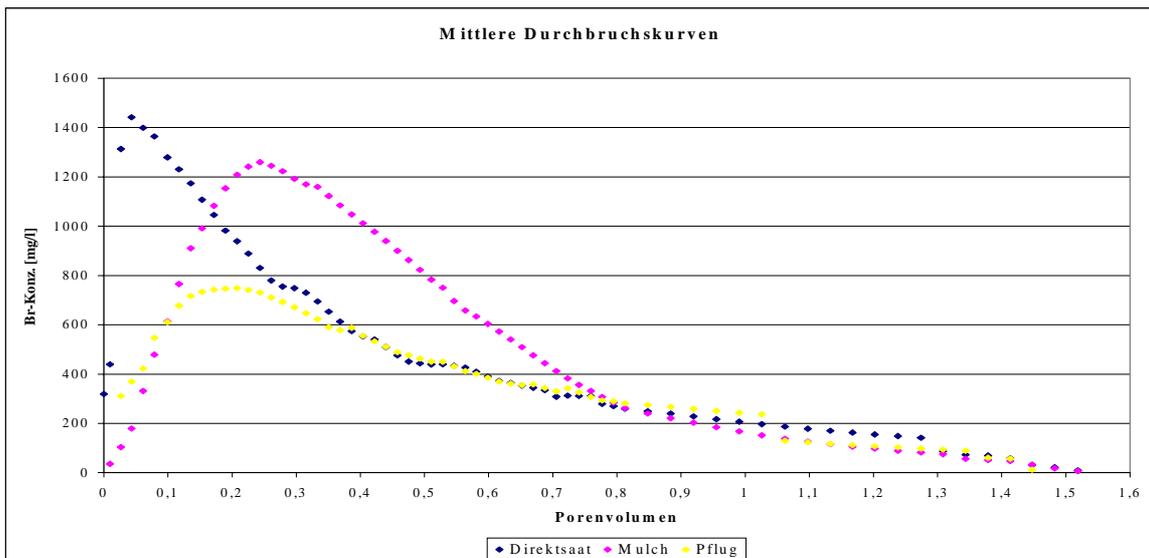


Abb. 20 Beregnungsversuch: Mittlere Durchbruchkurven

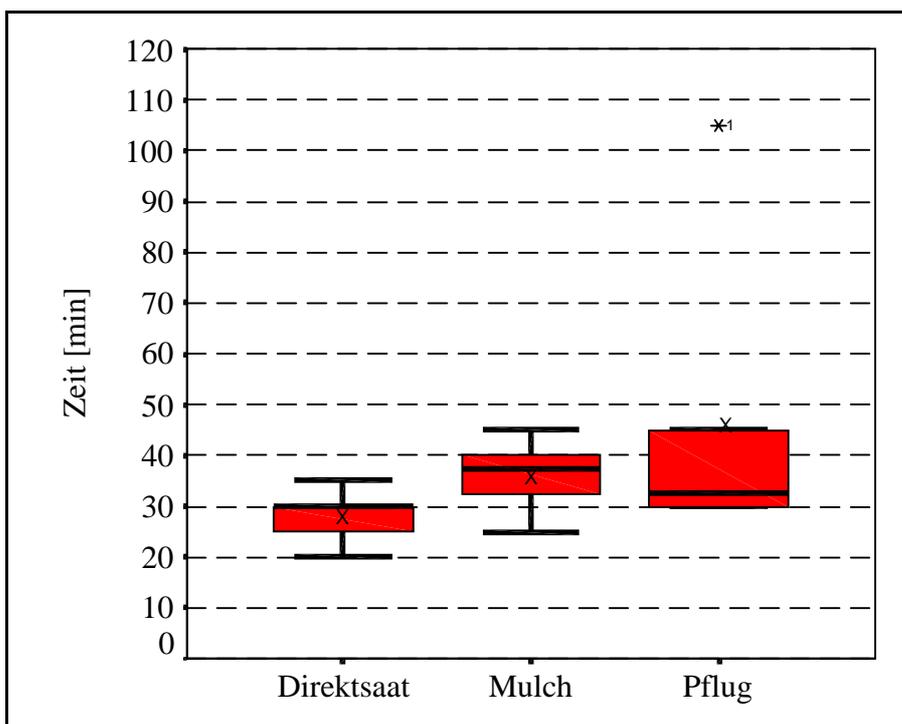


Abb. 21: Mittlere Austrittszeit des ersten Perkolates aus den Bodensäulen

5.2.2 Wiederfindungsrate

Nach einer Berechnungsdauer von 450 min zeigt das Verhältnis von aufgebracht und im Perkolat wiedergefundener Bromidmenge, dass bei der Variante **Direktsaat** im Mittel ca. 68 % des ausgebrachten Bromids wieder ausgetragen wurde. Die Standardabweichung betrug 4 %, das Minimum 57 % und das Maximum 91 % (vgl. Abb. 22).

In der **konservierend** bearbeiteten Variante wurden im Mittel 92 % des aufgebracht Bromids wiedergefunden. Hier betrug die Standardabweichung 7 %, das Minimum 82 % und das Maximum 99 % (vgl. Abb. 22).

Die Wiederfindungsrate der **konventionell** bearbeiteten Variante war am geringsten. Sie betrug im Mittel 59 % bei einer Standardabweichung von 38 %. Der Minimalwert betrug 0 % und der Maximalwert 87 % (vgl. Abb. 22).

Hieraus wird ersichtlich, dass in der konservierenden Variante nach 450 min Berechnung die größte Bromidmenge im Perkolat wiedergefunden wurde. Dagegen wies die konventionell bearbeitete Variante die geringste Wiederfindungsrate auf. Die Wiederfindungsrate der Variante Direktsaat lag zwischen den beiden anderen.

Betrachtet man jedoch die ausgetragenen Bromidmengen im Verlauf des Versuches, so ergeben sich zwischen den einzelnen Bearbeitungsvarianten Unterschiede der ausgetragenen Bromidmenge zu den verschiedenen Zeitpunkten des Versuches. Diese Werte sollen im Folgenden dargestellt werden. Die Standardabweichungen sowie die Minimal- und Maximalwerte zu den einzelnen Mittelwerten sind der Tabelle 11 zu entnehmen.

In der Variante **Direktsaat** wurden nach 20 min der Berechnung 0,4 % der aufgebracht Bromidmenge wieder ausgetragen. Nach 80 min waren es durchschnittlich 22,7 % und nach 360 min 63,5 % (vgl. Tab. 11). Bezog man die Wiederfindungsrate von Bromid auf das Porenvolumen (PV), ergaben sich für die Variante Direktsaat folgende Werte: Nach dem Austausch von 0,05 PV wurden rund 10 %, nach 0,3 PV 37,3 % und nach 1 PV 55,7 % ausgetragen (vgl. Tab. 11).

Auf den Böden der **konservierend** bearbeiteten Variante wurde nach 20 min noch kein Bromid ausgetragen. Erst nach 30 min war ein Bromidaustrag zu verzeichnen. Er betrug aber nur 0,2 % der aufgebracht Bromidmenge. Nach 80 min stieg er auf 17,9 % und nach 360 min auf 88,9 % an (vgl. Tab. 11). In Bezug auf das Porenvolumen wurden nach dem Austausch von 0,05 PV 3,7 % Bromid ausgetragen. Nach 0,3 PV waren es 45 % und nach 1 PV 88,5 % (vgl. Tab. 11).

Tabelle 11: Wiederfindungsraten (Wf.-rate) von Bromid; ausgebrachte Bromidmenge (Br-Menge): 738,5 mg Bromid; PV = Porenvolumen, rote Werte = Minimum; blaue Werte = Maximum; - = Versuch beendet; (Fortsetzung nächste Seite)

PV	Br-Menge [mg]	Wf.-rate [%]									
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	MW	Stabw.	
0,05	27,63	33,37	57,27	71,87	121,04	52,43	132,46	91,76	73,48	38,72	9,95
0,10	48,04	70,65	97,44	143,47	215,03	117,42	212,53	123,95	128,57	60,59	17,41
0,20	114,61	155,83	153,68	226,21	359,16	205,14	330,24	176,88	215,22	87,08	29,14
0,30	169,29	232,50	200,79	293,08	435,74	277,42	398,17	197,32	275,54	97,00	37,31
0,40	222,89	286,05	233,84	365,79	495,34	341,03	437,63	223,02	325,70	103,01	44,10
0,50	262,57	328,05	262,42	399,74	535,84	392,73	467,80	257,15	363,29	104,00	49,19
0,60	290,93	360,81	292,34	424,44	567,99	442,79	491,35	303,79	396,81	102,25	53,73
1,00	375,23	434,84	384,15	481,97	647,22	-	552,60	417,00	411,63	189,89	55,74

PV	Br-Menge [mg]	Wf.-rate [%]									
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	MW	Stabw.	
0,05	39,27	20,40	11,84	47,64	25,14	6,59	28,20	38,21	27,16	14,13	3,68
0,10	84,11	62,97	54,68	117,08	62,42	25,07	89,18	93,25	73,60	28,24	9,97
0,20	218,99	186,21	183,55	275,32	189,99	120,66	223,32	262,50	207,57	49,11	28,11
0,30	305,57	296,07	334,10	404,64	322,24	258,65	340,40	396,52	332,27	49,25	44,99
0,40	374,40	381,98	436,14	508,16	411,07	386,78	433,66	506,19	429,80	52,90	58,20
0,50	434,75	445,65	513,59	570,45	493,22	508,55	503,70	575,50	505,68	50,62	68,47
0,60	472,76	497,58	561,10	617,22	554,36	577,45	557,72	616,69	556,86	51,07	75,40
1,00	557,22	583,76	637,25	690,31	696,67	703,16	670,63	688,52	653,44	55,55	88,48

PV	Br-Menge [mg]	Wf.-rate [%]								
	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	MW	Stabw.	
0,05	3,72	33,95	16,61	22,24	98,36	0,00	32,66	29,65	32,98	4,01
0,10	16,43	82,91	47,43	58,07	165,70	0,00	61,52	61,72	53,76	8,36
0,20	66,69	213,54	140,97	178,33	285,89	0,00	155,62	148,72	93,85	20,14
0,30	-	306,21	257,88	289,19	363,09	0,00	227,66	206,29	147,01	27,93
0,40	-	391,21	341,17	389,57	418,52	0,00	292,68	261,88	183,47	35,46
0,50	-	447,13	404,35	450,45	463,60	0,00	333,71	299,89	209,39	40,61
0,60	-	489,16	462,56	497,41	498,84	0,00	370,28	331,18	230,52	44,84
1,00	-	598,18	577,76	610,85	587,72	0,00	475,07	407,08	281,62	55,12

Zeit [min]	Br-Menge [mg]	Wf.-rate [%]									
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	MW	Stabw.	
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,15	0,00	3,14	8,89	0,43
30	11,95	9,16	0,00	26,17	26,16	9,50	98,91	8,35	23,78	31,66	3,22
40	27,63	23,61	57,27	71,87	58,12	25,79	162,87	29,11	57,03	46,54	7,72
80	114,61	100,66	145,50	187,52	265,83	100,58	317,42	109,03	167,64	82,97	22,70
120	198,58	187,63	200,79	317,92	400,44	159,65	398,17	163,78	253,37	102,58	34,31
160	256,51	256,53	243,33	384,43	480,50	211,23	446,99	244,86	315,55	105,08	42,73
200	300,86	311,53	279,78	420,89	530,55	256,26	478,53	317,08	361,94	101,21	49,01
360	402,76	430,26	395,15	487,13	643,14	392,73	555,49	445,55	469,03	89,32	63,51

Zeit [min]	Br-Menge [mg]	Wf.-rate [%]									
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	MW	Stabw.	
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,00	0,00	0,00	8,60	0,00	0,00	0,00	5,21	1,73	3,32	0,23
40	1,37	0,87	0,00	30,12	9,64	2,28	5,20	24,61	9,26	11,68	1,25
80	175,72	103,66	54,68	225,95	110,76	63,48	134,45	186,55	131,91	60,53	17,86
120	322,05	261,20	183,55	404,64	268,30	236,21	304,09	376,57	294,58	72,92	39,89
160	416,45	381,91	318,38	520,60	397,58	403,66	433,66	506,19	422,30	65,74	57,18
200	479,40	463,03	425,33	593,34	493,22	534,23	523,71	582,69	511,87	58,03	69,31
360	581,82	588,02	608,00	695,89	696,67	709,27	680,80	688,52	656,12	53,70	88,85

Zeit	Br-Menge	Wf.-rate									
[min]	[mg]	[%]									
	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	MW	Stabw.		
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,00	3,66	0,00	1,24	26,90	0,00	0,00	4,54	9,95	0,62	
40	0,00	21,04	4,36	13,41	74,17	0,00	0,00	16,14	26,83	2,19	
80	0,00	157,22	91,40	120,96	240,83	0,00	171,71	111,73	89,26	15,13	
120	0,00	292,48	226,45	272,46	343,95	0,00	272,48	201,12	141,70	27,23	
160	1,17	391,21	341,17	389,57	411,11	0,00	340,66	267,84	184,43	36,27	
200	3,72	462,43	436,28	467,66	463,60	0,00	382,12	316,54	216,96	42,86	
360	35,54	602,95	593,82	615,69	567,59	0,00	471,74	412,48	273,94	55,85	

Bei der **konventionell** bearbeiteten Variante trat wie bei der konservierenden nach 20 min noch kein Bromid aus. Nach 30 min waren es hier 0,6 %, nach 80 min 15,1 % und nach 360 min 55,9 % (vgl. Tab. 11). Die Wiederfindungsrate von Bromid betrug nach dem Austausch von 0,05 PV 4 %. Nach 0,3 PV waren es 27,9 % und nach 1 PV 55,1 % (vgl. Tab. 11).

Man erkennt, dass zu Beginn des Versuches (bis ca. 80 min bzw. 0,3 PV) in der Variante Direktsaat die größte Bromidmenge ausgetragen wurde. In der konservierenden bzw. konventionellen Variante wurde annähernd gleich viel Bromid ausgetragen. In Bezug auf die Variante Direktsaat nahmen die Bromidmengen mit zunehmender Dauer des Versuches bei der konservierenden Variante zu und bei der konventionellen Variante ab.

5.2.3 Gesamtdurchflussrate

Bei der Berechnung kam es bei drei Bodensäulen der Variante Direktsaat (D2, D4, D6) nach 120, 300 bzw. nach 70 min zu einem Überstau. Bei der konventionellen Variante wurden sogar sechs Bodensäulen überstaut (P2, P4, P5, P6, P7, P8). Der Überstau erfolgte hier nach 20, 280, 320, 90, 20 bzw. nach 30 min. Die Bodensäulen der konservierenden Variante wurden nicht überstaut. Aufgrund des Überstaus waren vor allem bei der konventionellen Variante die Gesamtdurchflussraten niedriger als bei den anderen beiden Varianten. In der Variante **Direktsaat** wurden in den 450 min der Versuchsdauer im Mittel 1,3 PV ausgetauscht. Die Standardabweichung betrug 0,27 PV, das Minimum 0,6 PV und das Maximum 1,5 PV (Vgl. Abb. 23).

In der **konservierend** bearbeiteten Variante betrug die Durchflussrate in 450 min 1,3 PV, bei einer Standardabweichung von 0,17 PV. Der Minimalwert betrug 1,0 PV und der Maximalwert 1,6 PV (vgl. Abb. 23).

Auf den Böden der **konventionell** bearbeiteten Variante wurden in den 450 min im Mittel lediglich 0,9 PV ausgetauscht. Die Standardabweichung betrug hier 0,6 PV, der Minimalwert 0 PV und der Maximalwert 1,3 PV (vgl. Abb. 23).

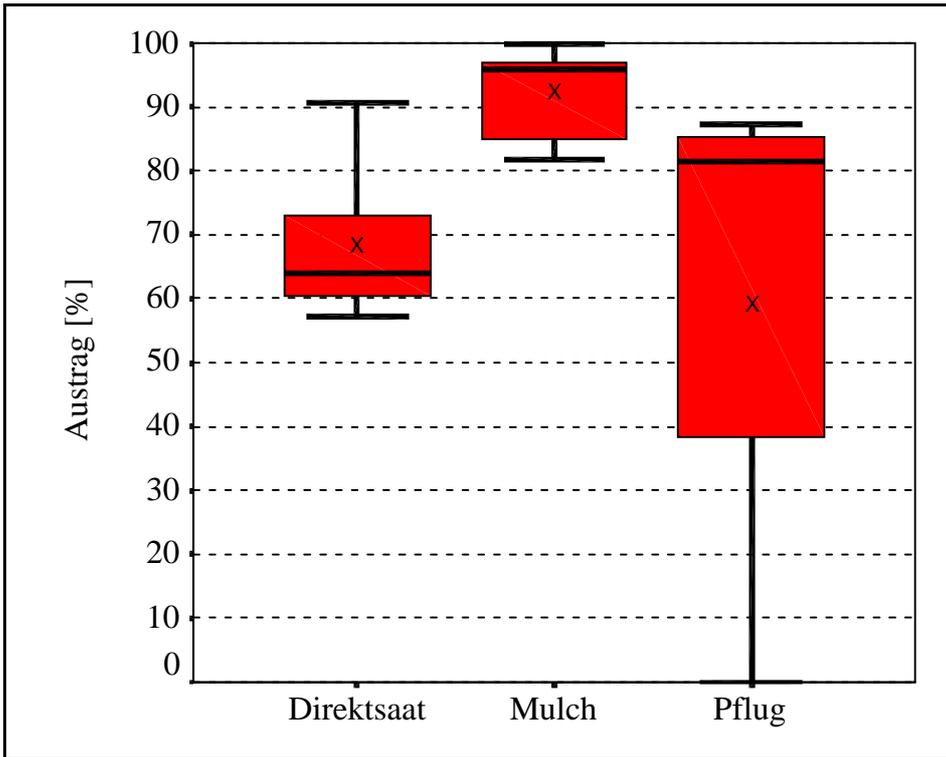


Abb. 22: Wiederfindungsraten von Bromid beim Beregnungsversuch

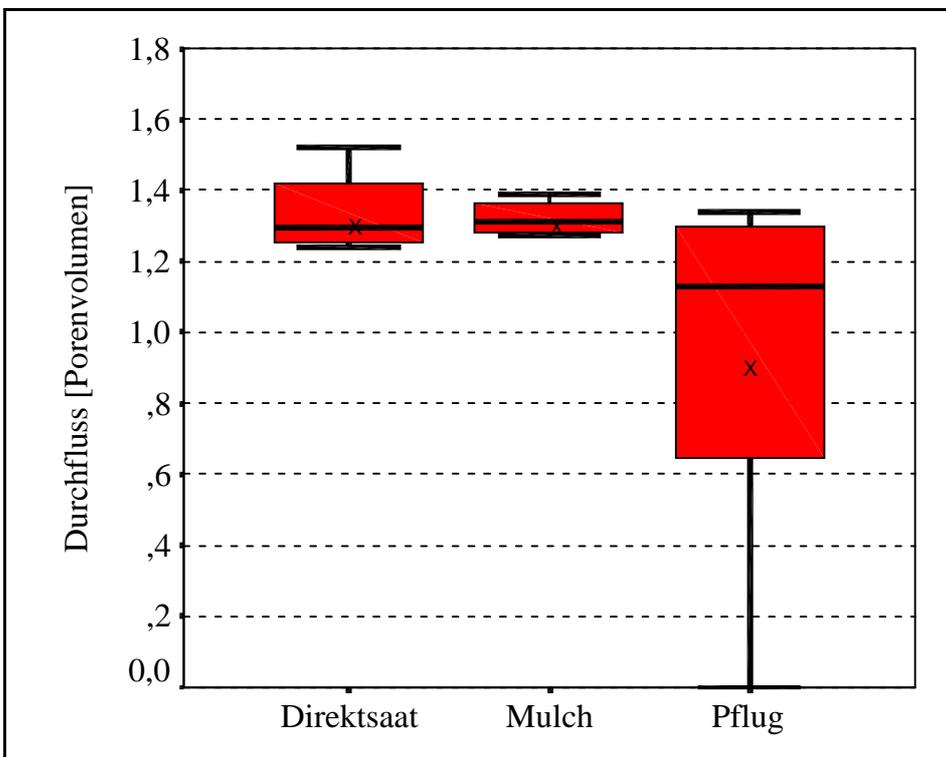


Abb. 23: Gesamtdurchflussraten beim Beregnungsversuch

5.3 DIE TRACERVERLAGERUNG BEIM ÜBERSTAUVERSUCH

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Stofftransportes (Chloridtracer) unter gesättigten Bedingungen (worst case) dargestellt.

In den ersten beiden entnommenen Perkolatproben konnte in keiner Bodensäule der verschiedenen Bodenbearbeitungsvarianten Chlorid nachgewiesen werden. Das heißt, dass in den Ausgangslösungen der Bodensäulen vor der Tracerzugabe kein Chlorid zu finden war (vgl. Kap. 4.2.2.2). Die ersten beiden Perkolate wurden als Blindproben betrachtet, da erst nach diesen beiden die Tracerlösung zugegeben wurde. Aber auch in der dritten Perkolatprobe war in keinem der Versuche Chlorid zu finden, da die Tracerlösung der Bodensäule nicht sofort zugeführt wurde, sondern erst das Schlauchsystem der Wasserzufuhr durchqueren musste (vgl. Kap. 4.2.2.1). Wie schnell die Tracerlösung auf die Probe gelangte, hing von der eingestellten Fließgeschwindigkeit ab. Diese wurde über die Druckhöhe gesteuert (vgl. Kap. 4.2.2.2). Es wurde versucht, bei allen Proben ähnliche Fließbedingungen zu schaffen.

Aufgrund der Zeitverzögerung bei der Tracerzugabe und der Beeinflussung des Fließverhaltens durch die verschiedenen Druckhöhen, wird bei der Auswertung der ausgetragenen Chloridkonzentration auf eine Korrelation mit der Zeit und dem Porenvolumen verzichtet. Die Ergebnisse beziehen sich demnach nur auf die ausgetragenen Chloridkonzentrationen. Wie im Kapitel 5.2 wurden die Chloridkonzentrationen mit Hilfe von Durchbruchkurven dargestellt (vgl. Abb. 24). Die auf der Ordinate abgebildete Chloridkonzentration wurde in allen Diagrammen mit einem Höchstwert von 220 mg/l festgelegt, um eine bessere visuelle Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

5.3.1 Beschreibung der Durchbruchkurven unter gesättigten Bedingungen

Die Durchbruchkurven zeigen unter gesättigten Bedingungen ein ähnliches Bild wie beim Beregnungsversuch (vgl. Kap. 5.2). 21 der 23 untersuchten Bodensäulen zeichnen sich durch eine ausgeprägte rechtsschiefe Gestalt (linksgipflige Verteilung) aus. Bei zwei Bodensäulen (P7, P8) wurde der Versuch vorzeitig abgebrochen. Grund dafür war die geringe Fließgeschwindigkeit, trotz eines Unterdruckes von über 100 cm. Der Versuch der Bodensäule P7 wurde nach 100 min abgebrochen. Hier floss so wenig Bodenlösung, dass kein Tracerdurchbruch stattfand. Bei der Bodensäule P8 kam es zu einem Tracerdurchbruch, jedoch wurde nach 570 min bzw. 0,89 Porenvolumen das Konzentrationsmaximum noch nicht erreicht (vgl. Abb. 24).

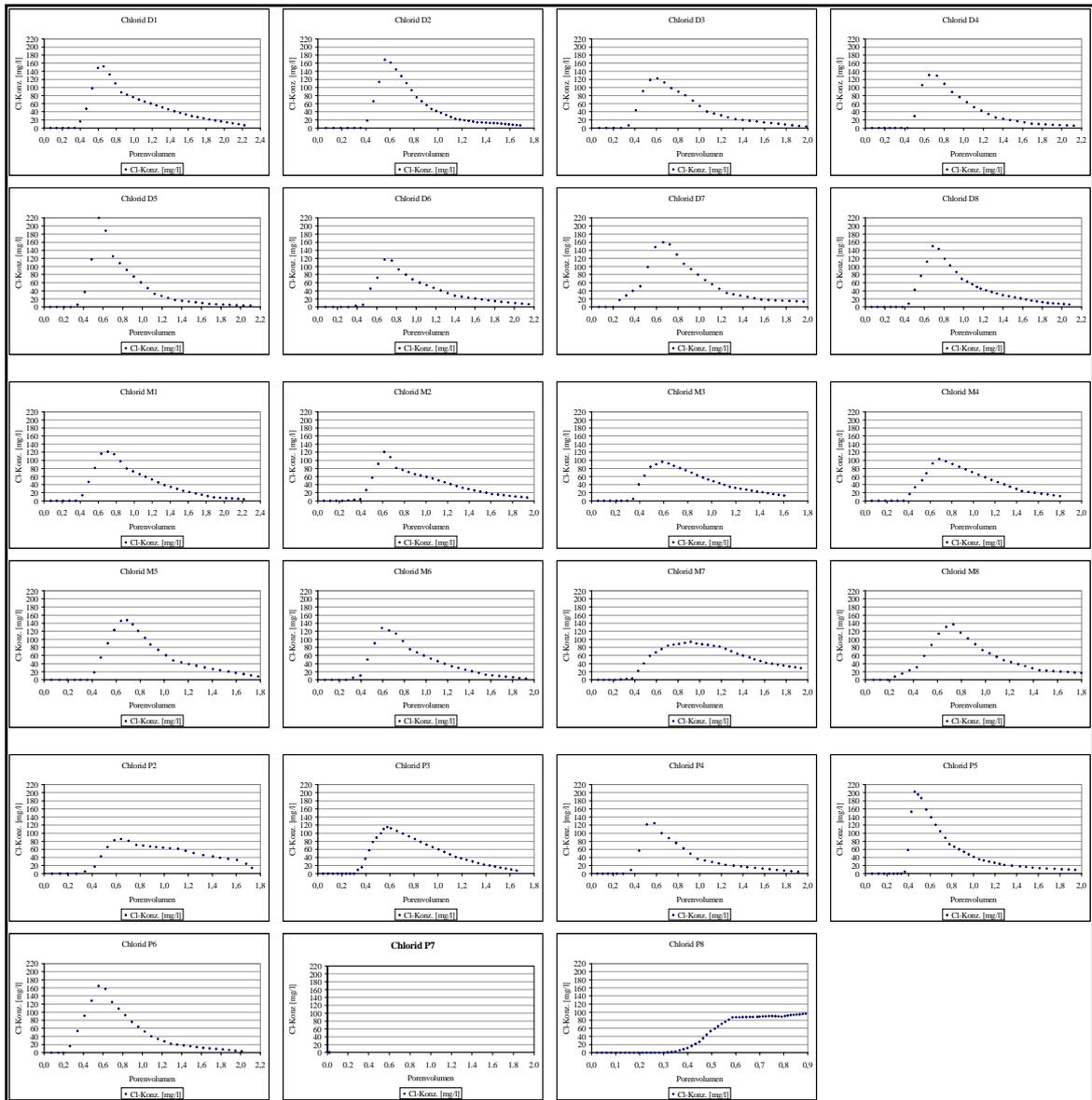


Abb. 24: Überstauversuch: Durchbruchkurven der Varianten Direktsaat (D1 – D8), Mulch (M1 – M8) und Pflug (P2 – P8)

Ein Vergleich der mittleren Durchbruchkurven zeigt, dass es aus den Bodensäulen der Variante Direktsaat zu einem deutlich höheren Chloridaustrag als bei den anderen beiden Varianten kam (vgl. Abb. 25). Das mittlere Konzentrationsmaximum der Variante **Direktsaat** lag bei ca. 134 mg/l (vgl. Abb. 25).

Große Unterschiede wurden aber auch zwischen der konservierenden und konventionellen Variante sichtbar. In den Bodensäulen der konservierenden Variante wurde wesentlich mehr Chlorid ausgetragen, als in der konventionell bearbeiteten Variante. Das mittlere Konzentrationsmaximum lag bei der **konservierend** bearbeiteten Variante bei ca. 110 mg/l (vgl. Abb. 25).

In der **konventionell** bearbeiteten Variante lag das Konzentrationsmaximum bei ca. 76 mg/l (vgl. Abb. 25).

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Varianten Direktsaat und konservierend durch einen "sehr starken" bzw. "starken" präferentiellen Stofftransport gekennzeichnet sind. Bei der konventionellen Variante kommt es ebenfalls zum Stofftransport auf bevorzugten Bahnen, jedoch mit deutlich geringeren Chloridkonzentrationen des Perkolats.

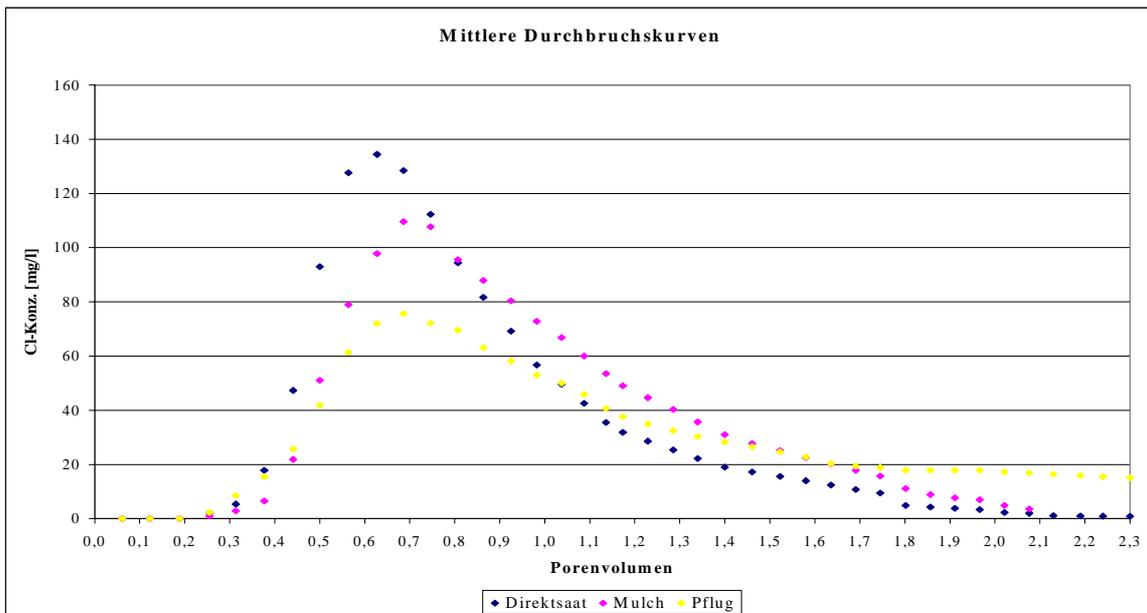


Abb. 25: Überstauversuch: Mittlere Durchbruchskurven

5.3.2 Wiederfindungsraten

Betrachtet man das mittlere Verhältnis von zugeführter und ausgetragener Chloridlösung, so zeigt sich, dass bei den Varianten Direktsaat und Konservierend die größten Chloridmengen ausgetragen wurden. Die Wiederfindungsrate war bei diesen beiden Varianten während des gesamten Versuches sehr ähnlich (vgl. Tab. 12). In der konventionell bearbeiteten Variante wurde im Perkolat dagegen weniger Chlorid wiedergefunden (vgl. Tab. 12).

Die Wiederfindungsrate von Chlorid betrug im Mittel in der Variante **Direktsaat** 71 %, bei einer Standardabweichung von 10 %. Der Minimalwert betrug 61 % und der Maximalwert 89 % (vgl. Abb. 26).

In der **konservierend** bearbeiteten Variante wurden 74 % der ausgetragenen Chloridmenge wiedergefunden. Die Standardabweichung betrug 9 %, das Minimum 64 % und das Maximum 89 % (vgl. Abb. 26)

Tabelle 12: Wiederfindungsraten (Wf.-rate) von Chlorid; ausgebrachte Chloridmenge (Cl-Menge): 117,5 mg Chlorid; PV = Porenvolumen, rote Werte = Minimum; blaue werte = Maximum

PV	Cl-Menge	Wf.-rate										
	[mg]	[%]										
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	MW	Stabw.		
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,91	0,00	0,36	1,03	0,31	
0,5	9,31	10,16	9,65	2,09	11,64	3,86	16,39	3,04	8,27	4,91	7,04	
0,7	33,86	38,50	33,26	29,72	50,53	17,11	48,65	23,80	34,43	11,43	29,30	
1,0	54,16	59,50	59,14	55,59	74,77	46,07	76,56	54,71	60,06	10,48	51,12	
1,3	71,48	67,12	69,64	66,97	85,08	58,31	92,38	69,42	72,55	10,91	61,74	

PV	Cl-Menge	Wf.-rate										
	[mg]	[%]										
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	MW	Stabw.		
0,3	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,40	0,19	1,58	0,28	0,54	0,24	
0,5	4,21	5,46	11,09	6,72	10,51	11,76	4,03	9,26	7,88	3,15	6,71	
0,7	26,42	29,42	32,28	23,08	35,41	38,93	21,19	40,77	30,94	7,19	26,33	
1,0	51,77	49,40	57,58	51,94	69,52	60,80	51,61	70,59	57,90	8,36	49,28	
1,3	67,21	63,07	68,78	69,59	81,24	75,35	74,67	85,18	73,14	7,43	62,24	

PV	Cl-Menge	Wf.-rate									
	[mg]	[%]									
	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	MW	Stabw.		
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	5,20	0,00	0,00	0,74	1,97	0,63	
0,5	7,59	9,49	14,16	19,41	21,07	0,00	4,65	10,91	7,72	9,29	
0,7	21,82	34,92	36,23	48,91	52,62	0,00	20,11	30,66	18,23	26,09	
1,0	40,90	59,34	51,75	68,49	79,23	0,00	37,64	48,19	25,82	41,02	
1,3	58,99	71,73	60,56	76,79	87,53	0,00	54,53	58,59	28,27	49,86	

Zeit	Cl-Menge	Wf.-rate										
[min]	[mg]	[%]										
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	MW	Stabw.		
15	0,00	0,00	0,44	0,00	0,39	0,00	2,91	0,00	0,47	1,00	0,40	
25	9,31	4,58	17,66	19,73	27,77	0,20	16,39	14,95	13,82	8,81	11,76	
35	40,11	32,80	45,58	50,87	65,01	3,86	57,50	45,43	42,65	18,56	36,29	
45	54,16	47,38	59,14	65,08	78,07	17,11	76,56	60,96	57,31	19,28	48,77	
60	71,48	59,50	69,64	73,10	86,15	37,32	92,38	72,96	70,32	16,73	59,84	

Zeit	Cl-Menge	Wf.-rate										
[min]	[mg]	[%]										
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	MW	Stabw.		
15	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,40	0,06	3,18	0,47	1,11	0,40	
25	9,87	2,05	2,59	3,00	4,62	11,76	1,66	22,75	7,29	7,29	6,20	
35	41,20	24,56	21,79	23,08	35,41	45,96	15,89	55,47	32,92	13,80	28,02	
45	56,54	38,23	37,06	42,00	55,43	60,80	30,83	74,38	49,41	14,73	42,05	
60	72,23	55,70	54,96	63,74	76,04	75,35	56,54	88,62	67,90	12,14	57,79	

Zeit	Cl-Menge	Wf.-rate									
[min]	[mg]	[%]									
	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	MW	Stabw.		
15	0,00	0,00	0,00	0,00	11,58	0,00	0,00	1,65	4,38	1,41	
25	0,00	0,00	5,12	0,15	52,62	0,00	0,00	8,27	19,65	7,04	
35	0,00	4,14	36,23	19,41	75,70	0,00	0,00	19,35	28,33	16,47	
45	0,41	13,54	49,24	32,60	86,07	0,00	0,00	25,98	32,54	22,11	
60	1,74	29,52	59,04	48,91	92,85	0,00	0,00	33,15	35,78	28,21	

Bei der **konventionell** bearbeiteten Variante wurden dagegen nur 54 % des Chlorids wieder ausgetragen. Die Standardabweichung für diesen Mittelwert betrug 28 %, der Minimalwert 0 % und der Maximalwert 82 % (vgl. Abb. 26).

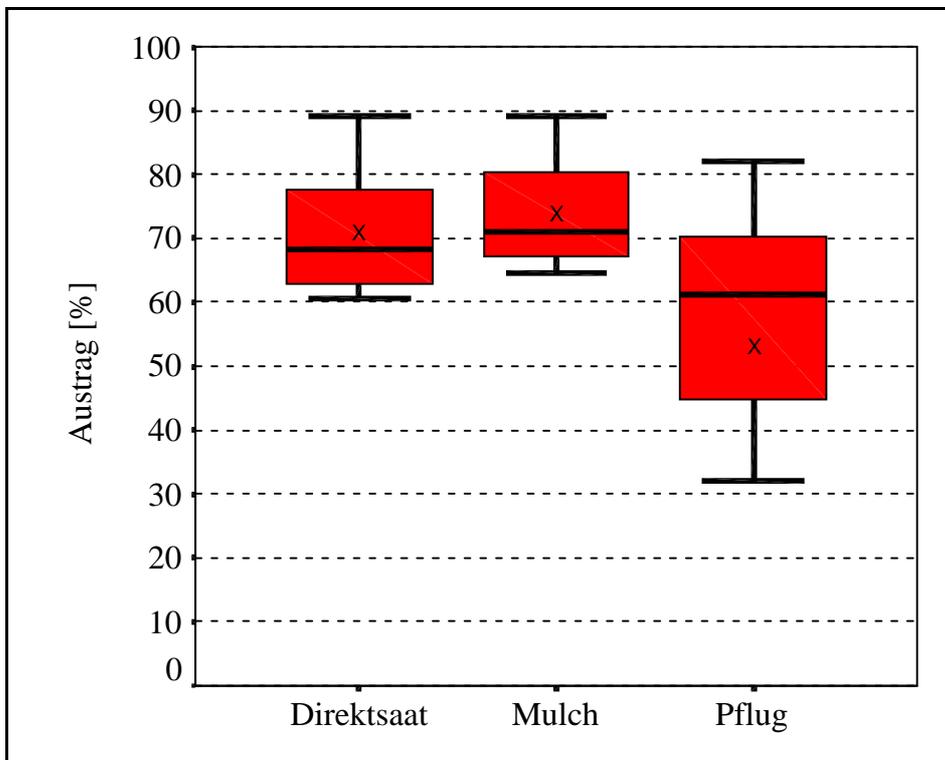


Abb. 26: Wiederfindungsraten von Chlorid beim Überstauversuch

5.4 DER FARBTRACERVERSUCH

Mit Hilfe des Farbtracerversuches wurden zum einen die bevorzugten Fließbahnen der Lösung durch die Bodensäule hindurch gekennzeichnet und zum anderen der Einfluss von eventuellen Randeffekten untersucht.

5.4.1 Untersuchung von Randeffekten

Es konnte nachgewiesen werden, dass während der Versuche keine Randeffekte auftraten (vgl. Abb. 27). An allen der neun untersuchten Bodensäulen befanden sich zwischen der Zylinderwand und der Bodensäule keine durchgängigen Farbspuren. Bodenstrukturbedingt konnte man in den oberen 3 bis 7 cm vor allem bei der konservierenden Variante Farbspuren am Rand beobachten, welche unterhalb jedoch abrissen (vgl. Abb. 29). Außerdem war der gesamte Boden in diesem Bereich mit Farbe durchsetzt. Auch von der Farbtracерlösung

durchflossene Makroporen, welche am Bodensäulenrand endeten, färbten den Randbereich; allerdings nur um die Pore herum (vgl. Abb. 28).

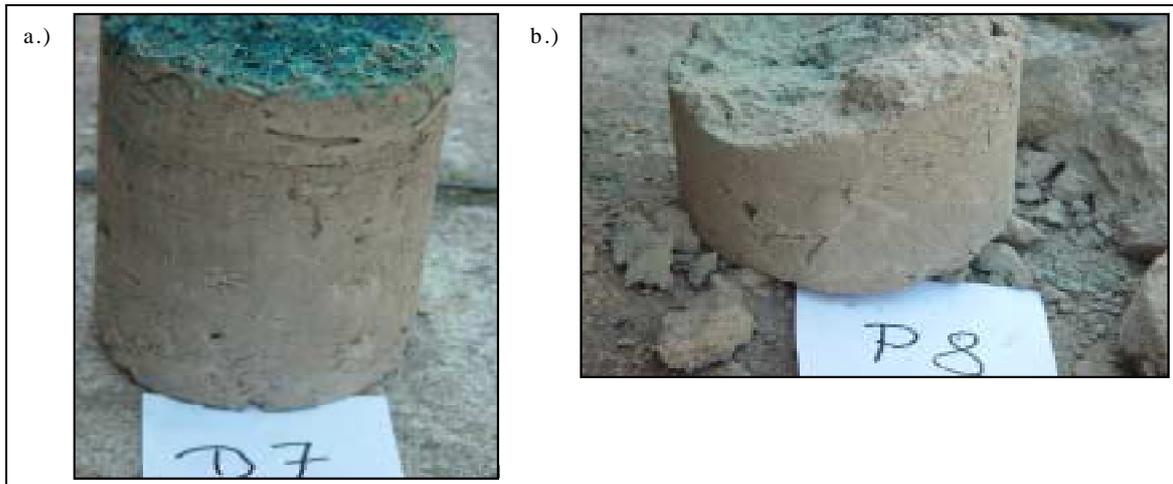


Abb. 27: Farbtracerversuch an Bodensäulen - keine Randeffekte nachweisbar (a) Direktsaat; (b) Pflug



Abb. 28: Einfärbung der Bodenmatrix im Bereich einiger Makroporen (Direktsaat)

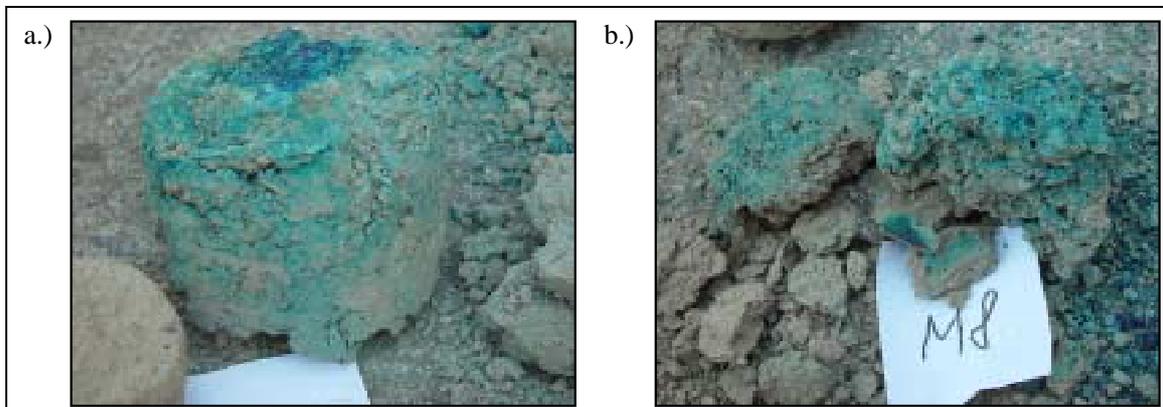


Abb. 29: Einfärbung der Bodenmatrix in der Lockerungsschicht der Variante Konservativ (a) eingefärbter Bodensäulenrand; (b) Die zerbrochene Lockerungsschicht zeigt auch im inneren der Bodensäule deutliche Farbspuren.

5.4.2 Fließwege und Stofftransportpfade

Bei einem Vergleich der drei Bearbeitungsvarianten lassen sich folgende Unterschiede in der Wasserbewegung und im Stofftransport erkennen:

1. Durch die relativ dichte Lagerung der obersten 3 cm der Variante **Direktsaat** konnte das Wasser nur sehr langsam in die Bodenmatrix eindringen, so dass es über die vielfältig vorhandenen Makroporen in die Tiefe verlagert wurde (vgl. Abb. 30). Dies ist daran zu erkennen, dass außer den obersten 1 bis 2 cm nur die Makroporen eingefärbt waren.
2. Bei der **konservierend** bearbeiteten Variante drang die Farbracerlösung gleichmäßig in die obersten 7 cm der Bodensäule (Bearbeitungszone) ein und verteilte sich in die Bodenmatrix (vgl. Abb. 31). Unterhalb floss diese aufgrund der dichteren Lagerung über die Makroporen ab, wie es auch bei der Variante Direktsaat zu beobachten war.
3. Die stark ausgeprägte Verschlammungsschicht der **konventionell** bearbeiteten Variante verhinderte ein schnelles Eindringen der Farbracerlösung in die Bodenmatrix der Bodensäule. War diese Schicht durchbrochen, floss die Farbracerlösung hauptsächlich durch die Bodenmatrix (vgl. Abb. 32). Befanden sich Makroporen in der Bodensäule, wurde in ihnen die Farbracerlösung transportiert.

Diese Aussagen unterstützen die in den Kapiteln 5.1, 5.2 und 5.3 erlangten Ergebnisse. Wie die Ergebnisse der Farbraceruntersuchung verdeutlichen, ist der festgestellte präferentielle Stofftransport offensichtlich in allen untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten auf Transportprozesse in Makroporen zurückzuführen. Im folgenden Kapitel sollen diese Ergebnisse diskutiert werden.



Abb. 30: Eingefärbte Makropore (Direktsaat)



Abb. 31: Farbtracerverlagerung Mulch

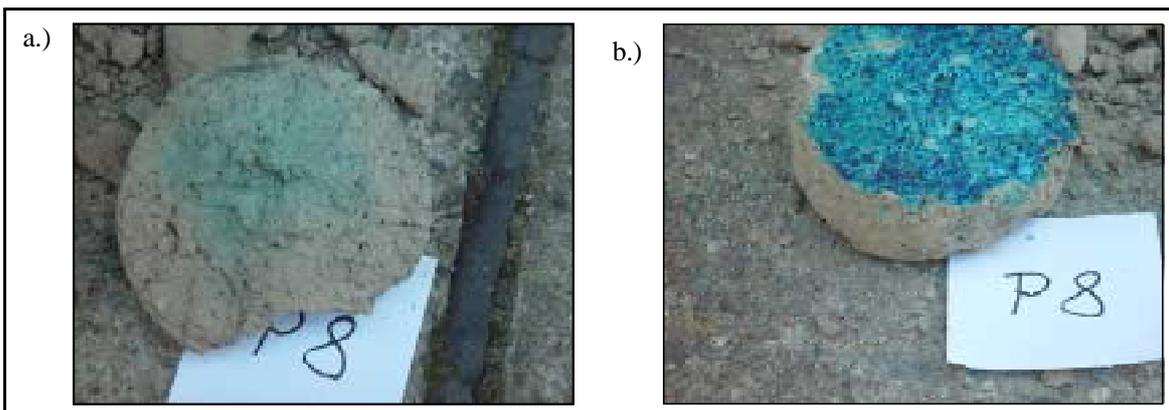


Abb. 32: Farbtracerverlagerung Pflug; (a) stark eingefärbte Verschlammungsschicht; (b) eingefärbte Bodenmatrix in den obersten 5 cm der Bodensäule

6 DISKUSSION

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse bodenphysikalischer Untersuchungen bewertet. Anschließend wird die Abhängigkeit des Wasser- und Stofftransportes von den Vorbedingungen und der Bodenbearbeitung beurteilt, um abschließend Folgerungen für das Stoffverlagerungsrisiko in tiefere Bodenschichten bzw. ins Grundwasser ableiten zu können. Außerdem wird die entwickelte Versuchsmethodik (Beregnungsversuch, Überstauversuch) hinsichtlich der Eignung zur Untersuchung des Stofftransports bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung diskutiert.

6.1 BODENPHYSIK

Bodenphysikalische Eigenschaften der unterschiedlich bearbeiteten Oberböden des Versuchsstandortes wurden sowohl an herkömmlichen Stechzylinderproben (vgl. Tab. 8 in Kap. 3.2) als auch an den Bodensäulen (vgl. Tab 10) bestimmt. Im Folgenden werden die Ergebnisse (Trockenrohdichte, Gesamtporenvolumen, mit Wasser gefülltes Porenvolumen bei pF 1,8, gesättigte Wasserleitfähigkeit) der Stechzylinderproben den Ergebnissen der Bodensäulen gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer Eignung zur näheren Charakterisierung des Stofftransports während der Tracerexperimente bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung diskutiert.

6.1.1 Trockenrohdichte

Fasst man die Einzelwerte der Tiefenstufen 0 bis 5 cm, 5 bis 10 cm und 10 bis 15 cm der Stechzylinderproben als Mittelwert zusammen, unterscheiden sich diese kaum von den mittleren Trockenrohdichten der Bodensäulen (vgl. Tab. 13). Die Mittelwerte der Stechzylinder sind in allen drei Bearbeitungsvarianten geringfügig höher, als die der Bodensäulen. In der Variante Direktsaat um $0,04 \text{ g/cm}^3$ und in den Varianten Konservierend und Konventionell um $0,03 \text{ g/cm}^3$. Unterschiede in der Stratifikation innerhalb dieser 15 cm können jedoch nur durch die schichtweise entnommenen Stechzylinder abgebildet werden (vgl. Tab. 13).

Tabelle 13: Trockenrohdichten [g/cm^3] der Stechzylinderproben (SZ) und der Bodensäulen (BS); MW = Mittelwert

	SZ 0-5 cm	SZ 5-10 cm	SZ 10-15 cm	SZ MW	BS MW
Direktsaat	1,42	1,49	1,51	1,47	1,43
Mulch	1,12	1,29	1,60	1,34	1,31
Pflug	1,41	1,46	1,38	1,42	1,39

Die Trockenrohdichte ist stark von der Art und Intensität der Bodenbearbeitung abhängig. Gelockerte Bodenschichten besitzen eine geringere Trockenrohdichte als ungelockerte. So weisen die Bodensäulen der Variante **Direktsaat** aufgrund der seit Jahren unterbliebenen Bodenbearbeitung die größten Trockenrohdichten auf (vgl. Kap. 5.1). Dies wird in zahlreichen anderen Untersuchungen bestätigt (BEISEKER 1994; UHLIG 2001; SCHMIDT et al. 2002). Die höhere Dichtlagerung ist vor allem auf die natürliche Sackung des Bodens durch sein Eigengewicht zurückzuführen (WILKENS 1994). Durch die fehlende Bodenbearbeitung sind auch die jahreszeitlichen Variabilitäten der Trockenrohdichte in dieser Variante gering.

Bei Betrachtung der mittleren Trockenrohdichte sowohl bei den Stechzylinderproben als auch bei den Bodensäulen zeigt sich, dass bei der **konservierend** bearbeiteten Variante die geringsten Werte aller untersuchten Bodenbearbeitungsvarianten gemessen wurden (vgl. Tab. 13). Die geringe Trockenrohdichte bei konservierender Bodenbearbeitung (vgl. Kap. 5.1) wird auf die einen Monat vor Probenahme durchgeführte Lockerung der 0 bis 10 cm Bodenschicht zurückgeführt (vgl. Kap. 3.2). Durch natürliche Sackung und Überfahung der Ackerfläche ist jedoch zu erwarten, dass die Trockenrohdichte im Verlauf des Jahres wieder ansteigen wird (EHLERS 1973). Aus den schichtweise entnommenen Stechzylindern geht hervor, dass die Trockenrohdichte in der 10 bis 15 cm Bodenschicht sprunghaft um ca. $0,3 \text{ g}/\text{cm}^3$ zunimmt, so dass in dieser Schicht die höchsten Werte der Trockenrohdichten aller Bearbeitungsvarianten nachgewiesen wurden (vgl. Tab. 13). Oberhalb dieses Bereiches befindet sich die Bearbeitungsgrenze. Unterhalb der gelockerten Bodenschicht kann neben natürlichen Setzungsprozessen auch bei konservierender Bodenbearbeitung die Auflast der Bearbeitungsmaschinen zur festgestellten Dichtlagerung geführt haben (Krumenbasisverdichtung) (HORN/ HARTGE 2001).

Die Trockenrohdichte der **konventionell** bearbeiteten Variante ist im Vergleich zur konservierenden Variante relativ hoch (vgl. Tab. 13). Grund hierfür ist offensichtlich, dass das Bodengefüge bei der letzten Grundbodenbearbeitung vor sechs Monaten (Herbstpflugfurche) überlockert wurde und der Oberboden aufgrund geringer Stabilitätseigenschaften des Gefüges (vgl. Tab. 7 und Kap. 3.2) sich in dieser Zeit wieder setzen konnte.

6.1.2 Gesamtporenvolumen

Auch bei einem Vergleich der an Stechzylindern und Bodensäulen gewonnenen Ergebnisse zum Gesamtporenvolumen liegen die Mittelwerte der beiden Untersuchungsmethoden für die Bodenschicht 0 bis 15 cm sehr eng zusammen (vgl. Tab. 14). Grund dafür ist die enge Korrelation von Trockenrohddichte und Gesamtporenvolumen. Wie bei den Werten der Trockenrohddichte, können nur die Stechzylinderwerte die genauen Unterschiede in den einzelnen Bodenschichten (0 bis 5 cm, 5 bis 10 cm, 10 bis 15 cm) abbilden.

Tabelle 14: Gesamtporenvolumen [Vol.-%] der Stechzylinderproben (SZ) und der Bodensäulen (BS); MW = Mittelwert

	SZ 0-5 cm	SZ 5-10 cm	SZ 10-15 cm	SZ MW	BS MW
Direktsaat	46,5	43,8	42,9	44,4	46,2
Mulch	57,9	51,1	39,8	49,6	50,6
Pflug	46,9	44,7	47,8	46,5	47,5

Die höhere Dichtlagerung in der Variante **Direktsaat** hat zu einer Abnahme des Gesamtporenvolumens im Oberboden geführt. Dabei kommt es zu einer Porenverteilung zugunsten der Mittel- und Feinporen (EHLERS 1973). Jedoch entwickelte sich durch die langjährige Bodenruhe eine hohe biologische Aktivität und tiefere Durchwurzelung, was insbesondere im Oberboden zu einem sehr dichten und kontinuierlichen Makroporensystem führt (JOSSI et al. 2001; UHLIG 2001). Dieses hat jedoch kaum Einfluss auf eine Erhöhung des Gesamtporenvolumen, da der Anteil an diesem nur 1-2 Vol.-% beträgt (LIERMANN 1999).

In der **konservierend** bearbeiteten Variante ist das Gesamtporenvolumen aufgrund der geringen Trockenrohddichte am größten (vgl. Tab. 14). Hier ist der Anteil an Grobporen durch die kurz zuvor durchgeführte Lockerung des Bodens am höchsten. Als Folge kann der Boden bis zu 10 cm Tiefe über 50 mm Wasser aufnehmen. Durch die höhere Dichtlagerung in der Bodenschicht 10 bis 15 cm verringert sich der Grobporenanteil, so dass sich das Gesamtporenvolumen in dieser Bodenschicht um mehr als 25 % verringert (vgl. Tab. 14). Aufgrund der hohen biologischen Aktivität und der Bodenruhe ist jedoch auch bei konservierender Bearbeitung von einem ausgeprägten kontinuierlichen Makroporensystem auszugehen (vgl. Kap. 2.3) (UHLIG 2001).

In der **konventionell** bearbeiteten Variante ist das Gesamtporenvolumen durch die Sackungsverdichtung relativ gering (vgl. Tab. 14). Durch die intensive Bodenbearbeitung ist das Makroporensystem in dieser Variante weniger gut ausgeprägt (vgl. Kap. 2.3.).

6.1.3 Wassergehalte bei pF 1,8

Die Mittelwerte der Stechzylinderproben für die gesamte Bodenschicht (0 bis 15 cm) sind geringfügig höher als die der Bodensäulen (vgl. Tab. 15). Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass mit der verwendeten Methode die Bodensäulen annähernd auf pF 1,8 entwässert wurden und somit in allen Bodensäulen vor dem Beregnungsversuch vergleichbare Ausgangsbedingungen vorherrschten.

Tabelle 15: Wassergehalte bei pF 1,8 [Vol.-%] der Stechzylinderproben (SZ) und der Bodensäulen (BS); MW = Mittelwert

	SZ 0-5 cm	SZ 5-10 cm	SZ 10-15 cm	SZ MW	BS MW
Direktsaat	39,8	37,3	34,3	37,1	32,4
Mulch	29,2	30,7	31,4	30,5	28,9
Pflug	34,7	33,8	32,5	33,7	29,2

Die größere Dichtlagerung der Variante **Direktsaat** hat zu einer Porenverteilung zugunsten der Mittel- und Feinporen geführt. Dies wird durch die höchsten Wassergehalte bei pF 1,8 gegenüber den anderen Bearbeitungsvarianten belegt (vgl. Tab. 15). Die Ergebnisse werden in Untersuchungen von BEISECKER (1994) bestätigt.

Der Wassergehalt bei pF 1,8 ist in der **konservierend** bearbeiteten Variante am geringsten. Der größere Anteil an Grobporen verhindert offensichtlich das Zurückhalten des Wassers im Boden, so dass dieser geringere Bodenwassergehalte gegenüber der Variante Direktsaat aufweist (vgl. Tab. 15). Dies kann bei einem Starkregenereignis zunächst eine höhere Wasseraufnahmekapazität der Bodenmatrix (BENECKE 1996) und einen verzögerten Beginn des Makroporenflusses hervorrufen, ohne dass ein Überstau an der Bodenoberfläche entsteht.

In den Böden der **konventionell** bearbeiteten Variante ist der Wassergehalt bei pF 1,8 aufgrund der größeren Dichtlagerung höher als bei der konservierend bearbeiteten Variante (vgl. Tab. 15). Dies ist, wie schon bei der Variante Direktsaat, auf den größeren Anteil von Mittel- und Feinporen zurückzuführen, da sie wegen ihres geringeren Porendurchmessers das Wasser gegen die Schwerkraft im Boden halten (SCHEFFER/ SCHACHTSCHABEL 1992). Bei der Betrachtung der Stechzylinderwerte in den einzelnen Bodenschichten der drei Bodenbearbeitungsvarianten, ist der Zusammenhang zwischen Trockenrohdichte und dem Wassergehalt bei pF 1,8 nicht eindeutig erkennbar. Hier wirkt sich aufgrund der Heterogenität des Bodens die geringe Probengröße der Stechzylinder aus. Die Unterbrechung des Porensystems und der Ausschluss von Grob- und Makroporen bei der Probenahme macht

sich auf die hydraulischen Eigenschaften bei den Stechzylindern deutlicher bemerkbar als bei den Bodensäulen.

6.1.4 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Vergleicht man die Werte der gesättigten Leitfähigkeiten der Stechzylinderproben und die der Bodensäulen, stellt man vor allem bei der konventionell bearbeiteten Variante beachtliche Unterschiede zwischen beiden Methoden fest (vgl. Tab. 16). Die k_F -Werte der Stechzylinderproben sind bei konventioneller Bearbeitung deutlich höher als die der Bodensäulen. In der konventionell bearbeiteten Variante unterscheidet sich die Schicht mit der geringsten gesättigten Leitfähigkeit der Stechzylinderproben (0 bis 5 cm) und die der Bodensäulen um das ca. 14fache (vgl. Tab. 16). In der konservierend bearbeiteten Variante und in der Variante Direktsaat unterscheidet sich die Schicht der geringsten gesättigten Leitfähigkeit der Stechzylinder von denen der Bodensäulen kaum (vgl. Tab. 16).

Grund hierfür ist zum einen, dass die Heterogenität der drei verschiedenen bearbeiteten Böden (vgl. Kap. 2.3 und 2.4.1) durch das geringe Probenvolumen der Stechzylinder nicht ausreichend repräsentiert wird. Dies führt dazu, dass die Werte vor allem bei den Stechzylinderproben extrem stark streuen. Ein anderer Grund ist, dass bei der Messung an Stechzylindern Einflüsse der Bodenoberfläche nicht berücksichtigt werden können. Bei der Beprobung der Bodensäulen bleibt die Bodenoberfläche jedoch erhalten. Die stark verschlammte Bodenoberfläche der konventionell bearbeiteten Variante führte bei den Bodensäulen zu einer deutlichen Verringerung der gesättigten Wasserleitfähigkeit gegenüber den Stechzylinderproben.

Leitfähigkeitsmessungen an Stechzylindern sind aufgrund dieser Ergebnisse zur näheren Charakterisierung des Stofftransportvorganges bei den Tracereexperimenten nur bedingt aussagekräftig. Die Messung der gesättigten Leitfähigkeit an Bodensäulen ist wegen des um ein vielfach größeren Probenvolumens und der Erhaltung der Bodenoberfläche gegenüber den Stechzylinderproben zu bevorzugen.

Tabelle 16: Gesättigte Wasserleitfähigkeit [cm/d] der Stechzylinderproben (SZ) und der Bodensäulen (BS); GeoMW = Geometrischer Mittelwert

	SZ 0-5 cm	SZ 5-10 cm	SZ 10-15 cm	BS GeoMW
Direktsaat	623	110	578	112
Mulch	1682	550	292	185
Pflug	278	434	811	20

Die Böden der Variante **Direktsaat** weisen trotz des geringen Porenvolumens eine relativ hohe gesättigte Wasserleitfähigkeit auf (vgl. Kap. 5.1 und Tab. 16). Dies ist wahrscheinlich auf das dichte und kontinuierliche Makroporensystem zurückzuführen (vgl. Kap. 2.3). Die relativ große Streuung der Werte (vgl. Kap. 5.1) beweist jedoch, dass nicht in jeder Bodensäule kontinuierliche Makroporen vorhanden waren.

In den Böden der **konservierend** bearbeiteten Variante wurden die höchsten gesättigten Wasserleitfähigkeiten aller Bearbeitungsvarianten gemessen (vgl. Kap. 5.1 und Tab. 16). Offensichtlich ist dies einerseits auf das hohe Gesamtporenvolumen in der Bodenschicht 0 bis 10 cm und andererseits auf das hydraulisch wirksame Makroporensystem zurückzuführen, welches trotz der Lockerung (nicht wendend) weitgehend erhalten bleibt (HEISLER et al. 1998; HORN et al. 2001; JOSSI et al. 2001; ZIMMERLING/ SCHMIDT 2002). Die relativ geringe Streuung der Werte (vgl. Kap. 5.1) lässt auf ein stabiles Bodengefüge und ein intaktes Porensystem schließen.

Die im Vergleich zu den beiden anderen Bearbeitungsvarianten an den Bodensäulen gemessenen sehr geringen gesättigten Wasserleitfähigkeiten in der **konventionell** bearbeiteten Variante können einerseits auf die stark verschlammte Oberfläche und andererseits auf die geringe Anzahl und Kontinuität an Makroporen im Oberboden zurückgeführt werden. Die wendende Lockerung des Pfluges kann die Zerstörung der stabilen Bodenaggregate und des kontinuierlichen Makroporensystems hervorrufen (SHIPITALO et al. 2000; BENS et al. 2001; HORN/ HARTGE 2001).

In einer Literaturübersicht zu Untersuchungen von gesättigten Wasserleitfähigkeiten der Oberböden bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung von ZIMMERLING/ SCHMIDT (2002) werden diese Ergebnisse sowohl bestätigt als auch negiert. Die Differenzen zwischen den erzielten Ergebnissen hängen hauptsächlich von den Standort- und Bodenbedingungen sowie vom Zeitpunkt der Probenahme und der verwendeten Methode ab. So müssen die jeweils herrschenden Bedingungen bei einer Interpretation der Werte berücksichtigt werden. Beispielsweise können höhere k_F -Werte in der konventionell bearbeiteten Variante, gegenüber den Varianten Direktsaat bzw. Konservierend, auf das Fehlen der Verschlämmungsschicht oder auf eine geringere Dichtlagerung zurückgeführt werden.

6.2 ABHÄNGIGKEIT DES STOFFTRANSPORTES VON DEN VORBEDINGUNGEN UND DER BODENBEARBEITUNG

Die unterschiedlichen Vorbedingungen beim Beregnungs- und Überstauversuch (vgl. Kap. 4.2.1 und 4.2.2) wirken sich auf den Stofftransport im Boden aus.

Durch den ungesättigten, instationären Fluss beim Beregnungsversuch werden durch den Anteil an luftgefüllten Poren zahlreiche Fließwege verschlossen, was zu einer Vergrößerung des diffusiven Anteils der Fließbewegung führt, und somit die Wasser- und Stoffverlagerung verzögert (ZACHARIAS 1999).

Unter gesättigten Bedingungen des Überstauversuches sind nahezu alle Poren der Bodensäule mit Wasser gefüllt. Die Wasser- und Stoffverlagerung wird daher kaum behindert (BEISECKER 1994; KNOBLAUCH 1996; ZACHARIAS 1999).

Während des gesättigten Versuches kann es dennoch zu einer Beeinflussung der Wasser- und Stoffverlagerung kommen. Gesättigte Bodenproben besitzen oft eine geringere Stabilität als ungesättigte. Die geringere Stabilität und die andauernd hohe Fließgeschwindigkeit kann infolge "innerer Erosion" zu einer Veränderung des Porensystems führen (HARTGE/BERKENHAGEN 1996; ZACHARIAS 1999). Dabei können einerseits Poren freigespült werden, was eine Erhöhung des Durchflusses zur Folge hätte. Andererseits können durch die Verfrachtung von Bodenpartikeln Poren zugeschlammte werden, was eine Abnahme des Durchflusses bewirken würde. Bei den eigenen Versuchen trat offensichtlich eine teilweise Zuschlammung der Poren auf, da bei den meisten Bodensäulen die größten Durchflüsse am Anfang gemessen wurden, die im Laufe des Versuches jedoch leicht abfielen. Die zu Beginn des Versuches gemessenen Durchflüsse lassen somit Rückschlüsse auf eine intakte Bodenstruktur zu.

Im Unterschied zu Arbeiten von SHIPITALO et al. (1990), der in Abhängigkeit von der Lage des Tracers (Tracer auf der Bodenoberfläche und Tracer in der Bodenmatrix) deutliche Unterschiede im Stofftransport nachweisen konnte, zeigte sich bei den eigenen Untersuchungen in allen Bodenbearbeitungsvarianten selbst im Beregnungsversuch (Tracer in Bodenmatrix) ein Tracerpeak deutlich vor dem Austausch eines Porenvolumens. Folglich trat der Stofftransport vorrangig auf präferentiellen Bahnen auf. Wie durch die Farbtraceranwendung gezeigt werden konnte, fand dieser präferentielle Transport vorrangig in Makroporen bzw. deren Randbereichen statt.

Da bei den Beregnungs- bzw. Überstauversuchen in allen Bodensäulen annähernd gleiche Vorbedingungen gegeben waren, sind die Unterschiede in der Stoffverlagerung auf die differenzierte Bodenbearbeitung zurückzuführen.

6.2.1 Direktsaat

Die **Direktsaat** zeigte beim “worst case“-Szenario (Überstauversuch) im Mittel den frühesten und steilsten Anstieg, das höchste Konzentrationsmaximum und den sich anschließenden steilsten Abfall der Durchbruchskurve weit vor dem Bodenwasseraustausch entsprechend eines Porenvolumens (vgl. Kap. 5.3). Das heißt, es muss zu einem der Hauptinfiltrationsfront der Bodenmatrix vorausseilenden schnellen Fluss gekommen sein (vgl. Kap. 2.1.2). Offensichtlich spielt in der Direktsaat unter diesen Bedingungen der Stoffaustrag auf präferentiellen Bahnen die entscheidende Rolle. Wie die Farbtraceranwendung zeigte, findet dieser präferentielle Stofftransport in den Makroporen statt (vgl. Kap. 5.4).

Beim Beregnungsversuch trat bei der Direktsaat nach einsetzender Beregnung relativ schnell Perkolat aus der Bodensäule aus (vgl. Kap. 5.2). Das geringere Gesamtporenvolumen und die höheren Wassergehalte bei pF 1,8 waren in der Variante Direktsaat offensichtlich dafür verantwortlich, dass es zu einer schnellen Sättigung der Bodenmatrix in der oberen Bodenschicht kam. Unter Umgehung eines Teils der Bodenmatrix ist dann ein Großteil der infiltrierten Wassermenge über das kontinuierliche Makroporensystem durch die Bodensäule geflossen. Dabei wurde im Beregnungsversuch ein erheblicher Teil des Tracers aus der Bodensäule ausgetragen. Des Weiteren kann es bei einer Überschreitung der Infiltrationsrate der Bodenmatrix laut BEVEN/ GERMANN (1981); TROJAN/ LINDEN (1992) sowie NORDMEYER/ ADERHOLD (1995) zu einem direkten Abfluss in bis an die Bodenoberfläche reichende Makroporen kommen. Dabei ist auch das Mikrorelief der Bodenoberfläche von Bedeutung (TROJAN/ LINDEN 1992).

Wie im Kapitel 5.2 beschrieben, kam es in zwei Bodensäulen der Variante Direktsaat beim Beregnungsversuch zu einem Überstau der Bodenoberfläche. Dieser könnte einerseits durch eine hohe Dichtlagerung des Bodens verursacht worden sein, so dass die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität der Bodenmatrix überstieg. Andererseits konnte das Überschusswasser auf der Bodenoberfläche nicht schnell genug in den Bodenkörper abgeleitet werden, da in diesen Proben keine bis an die Oberfläche offenen Makroporen vorhanden waren.

Die gegenüber der konservierend bearbeiteten Variante geringeren Wiederfindungsraten des Tracers im Perkolat der Variante Direktsaat, deuten auf einen Verbleib eines Teils des Tracers in der Bodenmatrix hin (vgl. Kap. 5.2). Dieser wird aufgrund der dichteren Bodenmatrix langsamer ausgetragen.

6.2.2 Konservierende Bodenbearbeitung

In der **konservierend** bearbeiteten Variante zeigte sich beim „worst case“-Szenario (Überstauversuch) ein ähnliches Bild wie bei der Direktsaat. Die mittlere Durchbruchskurve verzeichnet ebenfalls einen steilen Anstieg. Das Konzentrationsmaximum liegt etwas tiefer, und der Abfall der Kurve ist etwas flacher. Dieser etwas flachere Verlauf der Durchbruchskurve könnte durch einen geringeren Makroporenanteil erklärt werden. UHLIG (2001) konnte für diesen Standort eine geringere Anzahl an Makroporen gegenüber der Variante Direktsaat in den obersten 10 cm des Bodens nachweisen.

Beim Beregnungsexperiment konnten bei der Variante Konservierend im Vergleich zur Direktsaat zunächst größere Wassermengen (2 mm) aufgenommen werden, bis das Perkolat aus der Säulenbasis austrat. Der Grund hierfür liegt wahrscheinlich im größeren Porenvolumen der 0 bis 10 cm Bodenschicht begründet. Die zunehmende Aufsättigung dieser Bodenschicht führte dann zum Austritt von Bodenlösung aus der Säule.

Unmittelbar nach Beginn des Perkolataustritts, sowie weit vor dem Austausch eines Porenvolumens, war der Tracerpeak nachweisbar. Dies führt zu dem Schluss, dass auch bei konservierender Bodenbearbeitung Stoffaustag auf präferentiellen Bahnen (Makroporen) stattfindet.

Da während des Beregnungsversuchs in keiner Bodensäule ein Überstau auftrat, kann davon ausgegangen werden, dass die Infiltrationskapazität der Bodenoberfläche nicht überschritten wurde.

Die hohen Wiederfindungsraten von Bromid bei der konservierend bearbeiteten Variante gegenüber der Direktsaat sind durch den höheren Anteil an Grobporen in der Bodenmatrix zu erklären (vgl. Kap. 6.1). Der sich in der Bodenmatrix befindliche Tracer wird aufgrund der in den Grobporen geringeren Kapillarkräfte und dadurch höheren Porenwassergeschwindigkeit schneller ausgetragen (BEISECKER 1994).

6.2.3 Konventionelle Bodenbearbeitung

Im „worst case“-Szenario (Überstau) wurde in der **konventionell** bearbeiteten Variante die Wasserbewegung und damit auch der Stofftransport durch die stark verschlammte Bodenoberfläche und die geringe Anzahl an kontinuierlichen Makroporen erheblich behindert. Der flache Verlauf der Durchbruchskurve und die geringe Wiederfindungsrate des Tracers im Perkolat belegen dies (vgl. Kap. 5.3). Waren jedoch Makroporen in der Bodensäule

vorhanden, wurde die Tracerlösung über diese ebenfalls sehr schnell ausgetragen (vgl. Kap. 5.4).

Im Beregnungsversuch wurden in den Bodensäulen der konventionell bearbeiteten Variante geringere Tracermengen als bei den anderen Bearbeitungsvarianten ausgetragen. Hauptsächlich dürfte dies auf die Verzögerung der Wasserinfiltration in die Bodensäule aufgrund der stark verschlammten Bodenoberfläche zurückzuführen sein. Dadurch wurde die Reaktionszeit für Wechselwirkungen des Bromids mit der Bodenmatrix deutlich erhöht, so dass der Tracer tiefer in die Bodenmatrix eindringen konnte. BEISECKER (1994) nennt als Grund für eine Behinderung der Tracerverlagerung, die wegen der Oberflächenverschlämmung verlangsamte Fließgeschwindigkeit und die dadurch begünstigte Diffusion des Tracers in die immobile Wasserphase. Ein weiteres Argument für die verlangsamte Bromidverlagerung in der konventionell bearbeiteten Variante sind die wenig vorhandenen bzw. fehlenden kontinuierlichen Makroporen in der konventionell bearbeiteten Variante. Wie die Tracerpeaks zeigen, findet aber auch bei der konventionell bearbeiteten Variante der Stofftransport auf präferentiellen Pfaden (Makroporen) statt.

In 6 der 8 Bodensäulen der konventionell bearbeiteten Variante kam es zu einer Überschreitung der Infiltrationskapazität und somit zu einer Überstauung der Bodenoberfläche (vgl. Kap. 5.2). Anders als bei den Bodensäulen der Variante Direktsaat, ist hier die stark verschlammte Bodenoberfläche die Hauptursache des Überstaues, welche das Infiltrieren des Niederschlagswassers in den Bodenkörper behindert.

6.2.4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass es bei den drei Bearbeitungsvarianten nicht nur im „worst case“ Szenario (Überstau), sondern auch unter den simulierten „natürlichen Bedingungen“ zu sehr frühen Tracerdurchbrüchen kommt. Dies wird in den Untersuchungen von NORDMEYER/ ADERHOLD (1995); GÄTH et al. (1996); LENNARTZ et al. (1999) und KUNG et al. (2000) bestätigt.

Besonders bei Direktsaat und konservierender Bodenbearbeitung besteht ein erhöhtes Stoffverlagerungspotential durch Makroporen. Hierbei scheint jedoch, dass - im Vergleich zur Direktsaat - bei konservierender Bodenbearbeitung zunächst in der Lockerungsschicht erheblich mehr Niederschlagswasser gespeichert werden kann, bevor überhaupt eine vertikale Wasserbewegung einsetzt. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass der mit der Oberflächenverschlämmung bei konventioneller Bodenbearbeitung verbundene Wasse-

raufstau unter natürlichen Bedingungen bereits zu einem Stoffaustrag über den Oberflächenabflusspfad geführt hätte.

6.3 VERSUCHSMETHODIK

Die Bodensäulenuntersuchung erfolgte mit dem Ziel, das Stoffverlagerungsvermögen von verschiedenen bearbeiteten Böden abzuschätzen. Mit der entwickelten Versuchsanlage wurden Ergebnisse erzielt, die eine Risikoabschätzung, für die zum Zeitpunkt der Probenahme herrschenden Bodenbedingungen, zulassen.

Jedoch können Laboruntersuchungen an Bodensäulen mit einigen Fehlern behaftet sein. Zudem kann man die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf die Feldskala übertragen. Ursache hierfür können folgende Gründe sein:

- ungleichmäßige Ausbringung des Tracer auf die Bodenoberfläche
- Unterschiede im Mikorelief (Pfützenbildung) der Bodenoberflächen
- aufgrund des starren Regnerkopfes homogenes Tropfenbild
- leichte Schwankung der Niederschlagsintensität
- bewirtschaftungsbedingte Heterogenitäten (durch Überfahrung)
- natürliche Heterogenität der Bodenkörper

Diese Gründe verdeutlichen, dass neben der Heterogenität des Bodenkörpers auch die Ausbringung des Tracers sowie die Beregnung des Bodens einen Einfluss auf die Variabilität der gemessenen Stoffkonzentrationen haben können (BEISECKER 1994).

Trotz der genannten Fehlerquellen konnte die Wasser- und Stoffdynamik durch die Experimente an den Bodensäulen quantitativ und in zeitlich kurzen Perioden gut erfasst werden. Dies bestätigen auch Arbeiten von KNAPPE/ KEESE (1996). Insbesondere durch die Schaffung einheitlicher Vorbedingungen war es möglich, die Ergebnisse von verschiedenen bearbeiteten Böden miteinander zu vergleichen. Um Aussagen zum Stoffaustrag auf Feldskala treffen zu können, sollten neben den Bodensäulenversuchen auch makromorphologische Strukturmerkmale der Böden und deren räumliche Variabilität erfasst werden (DEMUTH/ HILTPOLD 1993).

Während der Versuchsdurchführung und Auswertung der Ergebnisse wurden folgende Nachteile der Versuchsanlage deutlich, die bei künftigen Arbeiten verbessert werden sollten.

6.3.1 Der Beregnungsversuch

Mögliche Ursachen dafür, dass selbst im **Beregnungsversuch** erhöhter präferentieller Stofftransport nachgewiesen wurde, könnten darin liegen, dass die mit der Anlage zu realisierende minimale Niederschlagsintensität mit 15 mm/h immer noch einem sehr intensiven Niederschlag entspricht. Laut ROTH (1995) befindet sich die Grenze für nichterosive Niederschläge auf Löß-Böden bei einer Intensität von 5 mm/h.

Ein weiterer möglicher Grund könnte darin liegen, dass der Tracer nicht vollständig in die Bodenmatrix eingedrungen war. Deshalb ist es möglich, dass der Tracer durch Infiltrationsüberschuss im Beregnungsversuch von der Bodenoberfläche zu den Makroporen transportiert werden konnte.

Um bei künftigen Untersuchungen mit der verwendeten Beregnungsanlage einen Infiltrationsüberschuss möglichst zu vermeiden, sollte die Niederschlagsintensität deutlich verringert werden (< 5 mm/h). Dies wäre nur durch den Einsatz einer Schlauchpumpe zu realisieren (Ersatz für Druckhöhensteuerung).

Eine geringere Niederschlagsintensität bedingt eine deutlich längere Beregnungszeit (bisher ca. 7,5 h), um das Porenvolumen der Bodensäulen mindestens einmal auszutauschen. Eine verlängerte Beregnungszeit ist jedoch nur dann realistisch, wenn die bisher praktizierte manuelle Probennahme des Perkolats durch einen automatischen Probennehmer ersetzt wird.

Außerdem sollte die Dauer zwischen Tracerapplikation und dem Beginn des Beregnungsversuches deutlich gesteigert werden, um ein vollständiges Einziehen des Tracers in die Bodenmatrix zu ermöglichen.

6.3.2 Der Überstauversuch

Beim **Überstauversuch** zeigte sich, dass nicht in allen Bodensäulen eine annähernd konstant hohe Fließgeschwindigkeit eingeregelt werden konnte (insbesondere bei Bodensäulen mit verschlammten Oberflächen), so dass sich zum Teil eine unterschiedlich lange Dauer bis zum Eintreffen der Tracerlösung aus dem Schlauchsystem in den Überstau oberhalb der Bodenoberfläche ergab (vgl. Kap. 4.2.2). Von Vorteil wäre deshalb, die Anlage so weiter zu entwickeln, dass die Tracerlösung direkt in den Überstau injiziert werden kann, um den Umweg über das Schlauchsystem zu vermeiden. Eine andere Lösung würde darin bestehen, den maximal einzustellenden Druckhöhengradienten deutlich zu erhöhen (bisher

bis maximal 100 cm), um auch bei extrem verschlammten Böden eine ausreichend hohe Fließgeschwindigkeit während des Überstauversuches zu gewährleisten.

7 FAZIT

Die Untersuchungen zeigen, dass langjährig unterschiedliche Bodenbearbeitung zu differenzierten Bodeneigenschaften im Oberboden führt.

In den Varianten Direktsaat und Konservierend entwickelt sich aufgrund der fehlenden bzw. nicht wendenden Bodenbearbeitung ein sehr stabiles Bodengefüge. Die Anreicherung der organischen Substanz an der Bodenoberfläche (Mulchauflage) und das stabile Bodengefüge vermindern die Oberflächenverschlammungsanfälligkeit. Gleichzeitig fördert sie die biologische Aktivität. Dies gilt besonders für den Regenwurm, welcher ein weit verzweigtes und kontinuierliches Makroporensystem schafft (HEISLER et al. 1998; NITSCHKE et al. 2000; JOSSI et al. 2001; KRÜCK et al. 2001).

Die intensive Bodenbearbeitung der gepflügten Fläche führt zu einem wenig stabilen Bodengefüge und zerstört das kontinuierliche Makroporensystem. Die Folge ist, dass die Oberflächen stark verschlammungsanfällig sind. Dadurch kann bei Intensivniederschlägen auftretendes Überschusswasser nicht in ausreichendem Maße in den Bodenkörper infiltrieren.

Für die Beurteilung des Verlagerungsrisikos von Stoffen in tiefere Bodenschichten bzw. ins Grundwasser sind neben den Bodeneigenschaften vor allem die drei Faktoren Niederschlagsintensität, Position des zu verlagernden Stoffes und Ausgangswassergehalt von Bedeutung.

Übersteigt die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität der Bodenmatrix, können bei den Varianten Direktsaat und Konservierend Stoffe über Makroporen in tiefere Bodenschichten bzw. ins Grundwasser ausgetragen werden. In der konventionell bearbeiteten Variante kann es aufgrund der stark verschlammten Bodenoberfläche zum Oberflächen- bzw. Zwischenabfluss kommen. Ist die Niederschlagsintensität geringer als die Infiltrationskapazität, kann das gesamte Wasser von der Bodenmatrix aufgenommen werden und dort entsprechend dem hydraulischen Gradienten versickern.

Vom Anfangswassergehalt ist abhängig, wieviel Wasser von der Bodenmatrix aufgenommen werden kann. Je höher der Anfangswassergehalt ist, um so schneller kommt es zu einer Sättigung der Bodenmatrix und damit zum Makroporenfluss. Ist der Anfangswassergehalt jedoch sehr gering und die Niederschlagsintensität höher als die Infiltrationskapazität des Bodens, so nimmt die Bodenmatrix einen Teil des Niederschlagswassers auf. Das überschüssige Wasser fließt über die an der Bodenoberfläche hin offenen Makroporen (vor allem bei Direktsaat und konservierend bearbeiteter Variante) oder als Oberflächenabfluss

(hauptsächlich bei konventionell bearbeiteter Variante) ab. Dadurch vermindert sich gleichzeitig die Vorrücktiefe der Infiltrationsfront (BEISECKER 1994; GÄTH et al. 1996), so dass die Stoffverlagerung in der Bodenmatrix verzögert wird.

Entscheidend für die Beurteilung des Stoffverlagerungsrisikos ist die Position des Stoffes im Boden. Befindet sich der zu verlagernde Stoff auf der Bodenoberfläche oder ist im Niederschlagswasser gelöst und die Niederschlagsintensität übersteigt die Infiltrationskapazität der Bodenmatrix, dann ist das Stoffverlagerungsrisiko über Makroporen sehr hoch. Diese Aussagen werden u.a. von BEISECKER (1994); NORDMEYER/ ADERHOLD (1995); KNOBLAUCH (1996) und JAYNES et al. (2001) bestätigt. Unter diesen Bedingungen sind die Stoffausträge in der Variante Direktsaat, aber auch in der konservierend bearbeiteten Variante deutlich höher als in der konventionell bearbeiteten Variante. Es muss jedoch beachtet werden, dass in der konventionell bearbeiteten Variante, aufgrund des instabilen Bodengefüges und der dadurch erhöhten Verschlammungsanfälligkeit der Bodenoberfläche, eine horizontale Stoffverlagerung mit dem Oberflächenwasser stattfindet (NITZSCHE et al. 2000).

Befindet sich der zu verlagernde Stoff in der Bodenmatrix, verringert sich das Stoffausstragsrisiko über die Makroporen (EDWARDS et al. 1989; SHIPITALO et al. 1990), da das Niederschlagswasser an der Bodenmatrix vorbei in die tieferen Schichten des Bodens bzw. ins Grundwasser fließt. Unter diesen Bedingungen ist kein erhöhtes Stoffverlagerungsrisiko aus den Böden der Varianten Direktsaat und konservierend zu erwarten.

Die erzielten Ergebnisse wurden in Arbeiten von BEISECKER 1994 sowie NORDMEYER/ ADERHOLD 1995 bestätigt.

Unter den am Versuchsstandort vorherrschenden Witterungsbedingungen (vgl. Kap. 3.1) und bei einem standortspezifisch durchgeführten Stoffmanagement (WURBS et al. 2000; WEISSKOPF et al. 2001) kann das Stoffverlagerungsrisiko in tiefere Bodenschichten bzw. ins Grundwasser über das kontinuierliche Makroporensystem der Varianten Direktsaat und Konservierend gegenüber der konventionell bearbeiteten Variante eingeschränkt bzw. völlig verhindert werden. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass durch Regenwürmer geschaffene Makroporen nur bis ca. 2 m Tiefe reichen (EHLERS 1975) und deshalb der Stofftransport auf präferentiellen Bahnen in Makroporen nicht zwingend zu einem Austrag in das Grundwasser führen muss.

Die Ergebnisse der Untersuchungen leisten einen Beitrag zur Abschätzung des Stoffverlagerungsrisikos auf verschiedenen bearbeiteten Ackerflächen. Speziell für die Oberböden wurden Unterschiede im Wasser- und Stofftransport herausgearbeitet. Diese detaillierte Untersuchung der Oberböden ist deshalb von besonderem Interesse, da genau in diesem

Bodenbereich die Bodenbearbeitung unmittelbar eingreift und Bodeneigenschaften verändert. Somit wird bereits im Oberboden der wassergebundene Stofftransport in größere Tiefen vorgeprägt.

Um die vorliegenden Ergebnisse zu festigen und weiterführende Aussagen, z.B. für nicht konservative Stoffe wie Herbizide, zu treffen, können mit der entwickelten Versuchsmethodik weitere Untersuchungen, bei vorgeschlagener Optimierung, durchgeführt werden. Eine vollständige Abschätzung des Stoffverlagerungsrisikos in tiefere Schichten ist jedoch nur unter Einbeziehung von Untersuchungen tieferer Bodenschichten sowie durch die Anwendung geeigneter Feldmethoden möglich.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Auflage. Stuttgart, Hannover: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
- BAUMGARTNER, A.; LIEBSCHER, H.-J. (1996): Lehrbuch der Hydrologie. Band 1, Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntraeger Verlag
- BECKER, K.-W.; BÄNSCH, N. (2001): Die Aggregatdichte als Strukturparameter von Ackerkrumen. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 2 (96), 585-586.
- BEISECKER, R. (1994): Einfluß langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge, die Wasserinfiltration und die Stoffverlagerung eines Löß- und eines Sandbodens. In: Bork, H.-R. et al. (Hrsg.), Bodenökologie und Bodengene. Heft 12, TU Berlin: Selbstverlag.
- BENECKE, P. (1996): Versickerung und Bodenfeuchte. In: Baumgartner, A.; Liebscher, H.-J. (Hrsg.), Lehrbuch der Hydrologie, Band 1, Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntraeger.
- BENS, O.; WAHL, N.A BUCZKO, U.; HÜTTL, R.F. (2001): Makroporosität und Infiltrationseigenschaften von Ackerböden unter differenzierter Bewirtschaftung. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 96, 59-60.
- BERNHARDT, A.; HAASE, G.; MANNSFELD, K.; RICHTER, H.; SCHMIDT, R. (1986): Naturräume der sächsischen Bezirke. In: Sächsische Heimatblätter, 4, 145-192.
- BEVEN, K.; GERMANN, P. (1981): Water flow in soil macropores. II. A combined flow model. In: Journal of Soil Science, 32, 15-29.
- BEVEN, K.; GERMANN, P. (1982): Macropores and water flow in soils. In: Water Resources Research. 18 (5), 1311-1325.
- BOHNE, K. (1996): Möglichkeiten und Grenzen der Simulation des Wasser- und Stofftransports in mineralischen Substraten mit Hilfe von Modellen. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, 1 (37), 40-47.
- BRUNOTTE, J.; SOMMER, C. (2001): Mulchsaatverfahren zu Zuckerrüben. In: Zuckerrübe, 4, 226-231.
- BUNDESBODENSCHUTZGESETZ (1998): Gesetz zum Schutz des Bodens. Bundesgesetzblatt Teil I, Nr.16, Bonn, 24.März 1998.
- BUNDT, M.; WIDMER, F.; PESARO, M.; ZEYER, J.; BLASER, P. (2001): Preferential flow paths: biological "hot spots" in soils. In: Soil Biology & Biochemistry, 33, 729-738.

- CHILDS, E.C. (1969): An introduction to the physical basis of soil water phenomena. New York-London: J. Wiley and Sons Inc.
- DEMUTH, N.; HILTPOLD, A. (1993): Preferential flow: Eine Übersicht über den Kenntnisstand. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 156, 479-484.
- DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e.V. (Hrsg.) (2000): Handbuch der Bodenuntersuchungen: Terminologie, Verfahrensvorschriften und Datenblätter; physikalische, chemische, biologische Untersuchungsverfahren, gesetzliche Regelwerke. Berlin, Wien, Zürich: Beuth.
- EDWARDS, W. M.; SHIPITALO, M.J.; OWENS, L.B.; NORTON, L.D. (1989): Water and nitrate movement in earthworm borrows within long-term no-till cornfields. In: J. Soil Water Cons., 44, 240-243.
- EHLERS, W. (1973): Gesamtporenvolumen und Porengrößenverteilung in unbearbeiteten und bearbeiteten Lößböden. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 134, 193-207.
- EHLERS, W. (1975): Observation on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soils. In: Soil Science, 3, 242-249.
- EHLERS, W. (1996): Wasser in Boden und Pflanze. Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag. Stuttgart: Ulmer-Verlag.
- FLURY, M.; FLÜHLER, H. (1994): Brilliant Blue FCF as a Dry Tracer for Solute Transport Studies - A Toxicological Overview. In: J. Environ. Qual., 23, 1108-1112
- FLURY, M.; FLÜHLER, H. (1995): Tracer Characteristics of Brilliant Blue FCF. In: Soil Sci. Soc. Am. J., 59, 22-27.
- FRANZLUEBBERS, A.J. (2002): Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. In: Soil & Tillage Research, 66, 197-205.
- GÄTH, S.; LÜTKEMÖLLER, D.; NÖHLES, I.; FREDE, H.-G. (1996): Transportverhalten von Bromid in Löß-Säulen mit und ohne Makropore. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, 1 (37), 19-23.
- GERKE, H.H.; VAN GENUCHTEN, M.T. (1993): A Dual-Porosity Model for Simulating the Preferential Movement of Water and Solutes in Structured Porous Media. In: Water Resources Research, 29 (2), 305-319.
- GERMAN, P.; BÜRGI, T. (1996): Kinematischer Ansatz zur in-situ-Erfassung des Makroporenflusses in Böden während Infiltrationen. In: Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung, 37, 221-226.
- GISI, U. (1990): Bodenökologie. Stuttgart, New York: Thieme Verlag.

- GÖBEL, B. (2000): Stickstoff - Austragsverhalten einer gedrähten Fläche in Schleswig-Holstein. In: *Wasser & Boden*, 52 (10), 33-36.
- HARTGE, K.H.; HORN, R. (1991): Einführung in die Bodenphysik. 2. Aufl., Stuttgart: Enke-Verlag.
- HARTGE, K.H.; BERKENHAGEN, J. (1996): Erosion und Akkumulation als Faktoren der Persistenz künstlicher röhrenförmiger Vertikalporen in einer Löß-Parabraunerde. In: *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung*, 1 (37), 14-18.
- HEILMANN, H.; JOISTEN, H.; WÜNSCHE, M.; WEISE, A.; ABO-RADY, M.; BRÄUNIG, A. (1995): Bergbaufolgelandschaft südlich Leipzig: Natürliche und anthropogene Böden der Bergbaufolgelandschaft im Raum Leipzig. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 77, 279-310.
- HEISLER, C.; ROGASIK, H.; BRUNOTTE, J.; JOSCHKO, M. (1998): Konservierende Bodenbearbeitung und biologische Aktivität. In: *Landbauforschung Völkenrode*, 4, 199-212.
- HORN, R.; HARTGE, K.H. (2001): Das Befahren von Ackerflächen als Eingriff in den Bodenwasserhaushalt. In: *Wasser & Boden*, 9, 13-19.
- HORN, R.; SCHRADER, St.; ROSTEK, J. (2001): Optimierung von Überfahrungen und Bearbeitung zur Vermeidung von Verdichtung und Erosion. In: *Zuckerrübe*, 50 (3), 160-162.
- JAYNES, D.B.; AHMED, S.I.; KUNG, K.-J.S.; KANWAR, R.S. (2001): Temporal Dynamics of Preferential Flow to a Subsurface Drain. In: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, 1368-1376.
- JOSSI, W.; VALENTA,.; ZIHLMANN, U.; DUBOIS, D. (2001): Burgrain: Einfluss unterschiedlicher Anbausysteme auf Regenwurmfauna. In: *Agrar Forschung*, 2, 60-65,
- KÄSS, W. (1992): *Geohydrologische Markierungstechnik*, 9, Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntraeger Verlag.
- KASTEEL, R.; VOGEL, H-J.; ROTH, K. (2002): Effect of non-linear adsorption on the transport behaviour of Brilliant Blue in a field soil. In: *European Journal of Soil Science*, 53, 231-240.
- KÄTTERER, T.; SCHMIED, B.; A.; ABBASPOUR, K.C.; SCHULIN, R. (2001): Single- and dual-porosity modelling of multiple tracer transport through soil columns: effects of initial moisture and mode of application. In: *European Journal of Soil Science*, 52, 25-36.
- KEESE, U.; KNAPPE, S.; MATTHIES, H.; MORITZ, Ch.; PENNDORF, O. (1995): Leipziger Land: Lysimeterstation Brandis, Lehr- und Versuchsstation Seehausen, Bodeninanspruchnahme und Bodenschutz. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 77, 391-406.

- KEESE, U.; KNAPPE, S. (1996): Problemstellung und allgemeine Angaben zu vergleichenden Untersuchungen zwischen Lysimetern und ihren Herkunftsflächen am Beispiel von drei typischen Böden Mitteldeutschlands unter landwirtschaftlicher Nutzung. In: Arch. Acker - Pfl. Boden., 40, 409-429.
- KNAPPE, S.; MORITZ, CH.; KEESE, U. (1994): Grundwasserneubildung und N-Austrag über Sickerwasser bei intensiver Landnutzung: Lysimeteruntersuchungen an acht Bodenformen in der Anlage Brandis. Arch. Acker-Pfl. Boden, 38, 393-403
- KNAPPE, S.; KEESE, U.: (1996): Untersuchungen zu ausgewählten chemischen Eigenschaften langjährig landwirtschaftlich genutzter Böden von Lysimetern im Vergleich zu Profilen auf deren Herkunftsflächen. In: Arch. Acker - Pfl. Boden., 40, 431-451.
- KNAPPE, S.; KEESE, U.: (1997): Untersuchungen zum Einfluss von N-Bilanzen auf den N-Austrag und den Nitratgehalt im Sickerwasser bei ackerbaulicher Nutzung und Flächenstilllegung - Lysimeteruntersuchung an vier Bodenformen. VDLUFA-Schriftenreihe, 46, Kongreßband, 587-590.
- KNAPPE, S.; RUSSOW, R.; RUPP, H.; RICHTER, W.; MEIBNER, R. (2002): Untersuchungen des Wasser- und Nitrattransportes in agrarisch genutzten, rekultivierten Kippenböden mittels Multitracer-Einsatz in Lysimetern. GSF-Berichte, 122-128.
- KNOBLAUCH, S. (1996): Wasser- und Stofftransport über präferentielle Fließbahnen in Böden. Eine Literaturübersicht. In: Wasserwirtschaft., 86, 598-602.
- KÖHNE, M. (1999): Analyse präferentiellen Wasserflusses und Stofftransport in strukturierten Böden mit Hilfe des Dual-Porositätsmodells. Dissertation, Universität Kiel.
- KÖLLER, K.; LINKE, C. (2001): Erfolgreicher Ackerbau ohne Pflug. 2. Aufl., Frankfurt am Main: DLG-Verlag.
- KRÜCK, ST.; NITZSCHE, O.; SCHMIDT, W.; UHLIG, U. (2001): Einfluss der Bodenbearbeitung auf Bodenleben und Bodenstruktur. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 2 (96), 747-748.
- KTBL (Hrsg.) (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschutz. Schlußfolgerungen für gute fachliche Praxis. Arbeitspapier 266. Münster-Hiltrup.
- KUGLER, H.; VILLWOCK, G. (1995): Geomorphologie des mitteldeutschen Raumes. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 77, 23-26.
- KUNG, K.-J.S.; STEENHUIS, T.S.; KLADIVKO, E.J.; GISH, T.J.; BUBENZER, G.; HELLING, C.S. (2000): Impact of Preferential Flow on the Transport of Adsorbing and Non-Adsorbing Tracers. In: Soil Sci. Soc. Am. J., 64, 1290-1296.

- LENNARTZ, B.; MICHAELSEN, J.; WICHTMANN, W.; WIDMOSER, P. (1999): Time Variance Analysis of Preferential Solute Movement at a Tile-Drained Field Site. In: Soil Sci. Soc. Am. J., 63, 39-47.
- LIERMANN, R. (1999): Makroporenkartierung und Freilandtracerstudien als methodisches Konzept zum qualitativen Nachweis potentieller Transportpfade. In: Leipziger Geowissenschaften, Band 11, 113-122.
- MURER, E.J.; BAUMGARTEN, A.; EDER, E.; GERZABEK, M.H.; KANDELER, E.; RAMPAZZO, N. (1993): An improved sieving machine for estimation of soil aggregate stability (SAS), Geoderma, 56, 539-547.
- NITZSCHE, O.; SCHMIDT, W.; RICHTER, W. (2000): Minderung des P-Abtrags von Ackerflächen durch konservierende Bodenbearbeitung. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 92, 178-181.
- NORDMEYER, H.; ADERHOLD, D. (1995): Verlagerung von Pflanzenschutzmitteln in Bodenmakroporen als mögliche Ursache für Grund- und Oberflächenwasserbelastungen. In: Nachrichtenblatt Deutscher Pflanzenschutzdienst, 47 (6), 137-143.
- Roth, C.H.; Helmig, K.; Fohrer, N. (1995): Oberflächenverschlammung und Abflussbildung auf Böden aus Löß und pleistozänen Sedimenten. In: Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 158, 43-53.
- RUSSOW, R.; SEGSCHEIDER, H.-J.; FÖRSTEL, H. (1996): Vergleich der Wasser- und Anionenbewegung in agrarisch genutzten Sandlöß- und Löß-Schwarzerde-Böden anhand von Multitracer-Untersuchungen. In: Arch. Acker - Pfl. Boden., 40, 453-471.
- RUSSOW, R.; KNAPPE, S. (1999): Bromid als Tracer zur Untersuchung der Wasserbewegung und der Nitratverlagerung im Boden: vergleich mit stabilisotopen Tracern, GSF-Berichte, 79-83.
- SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2002): Entwicklung von dauerhaft umweltgerechten Landbewirtschaftungsverfahren im sächsischen Einzugsgebiet der Elbe. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 0339588, unveröffentlicht.
- SÄCHSISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2002): unveröffentlichtes Material.
- SCHAEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P.(1992): Lehrbuch der Bodenkunde. 13. Aufl. Stuttgart: Enke.
- SCHLICHTING, E.; BLUME, H.-P.; STAHR, K. (1995): Bodenkundliches Praktikum - eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte und für Geowissenschaftler. 2. Aufl.. Berlin, Oxford, et al.: Blackwell Wissenschaftsverlag.

- SCHMIDT, W.; NITZSCHE, O.; ZIMMERLING, B.; KRÜCK, St. (2000): Soil erosion control in saxony. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 93, 157-160.
- SCHMIDT, W.; STAHL, W.; NITZSCHE, O.; ZIMMERLING, B.; KRÜCK, St.; Zimmermann, M.; Richter, W. (2001): Konservierende Bodenbearbeitung - die zentrale Maßnahme eines vorsorgenden und nachhaltigen Bodenschutzes. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 2 (96), 771-772.
- SCHUMANN, A.; MÜLLER, J. (1995): Klimatologische Kennzeichnung des mitteldeutschen Trockengebietes. In: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 77, 43-48.
- SCHWARZ, A.; KAUPENJOHANN, M. (2001): Vorhersagbarkeit des Stofftransportes in Böden unter Berücksichtigung des schnellen Flusses (preferential flow). In: KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, 48 (1), 48-53.
- SHIPITALO, M.J.; EDWARDS, W.M.; DICK, W.A.; OWENS, L.B. (1990): Initial Storm Effects on Macropore Transport of Surface-Applied Chemicals in No-Till Soil. In: Soil Sci. Soc. Am. J., 54, 1530-1536.
- SHIPITALO, M.J.; DICK, W.A.; EDWARDS, W.M. (2000): Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. In: Soil & Tillage Research, 53, 167-183.
- SOMMER, C. (1998): Konservierende Bodenbearbeitung - ein Konzept zur Lösung agrarrelevanter Bodenschutzprobleme. In: Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 191.
- STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT (Hrsg.) (1999): Sächsischer Agrarbericht, 111.
- TEBRÜGGE, F.; DÜRING, R.-A. (1999): Reducing tillage intensity - a review of results from a long-term study in Germany. In: Soil Tillage Res., 53, 15-28.
- TEIWES, K. (1998): Bodenkundliche Bestandsaufnahme auf der Fläche des Bodenbearbeitungsversuches Zschortau der Südzucker AG. Unveröffentlichter Bericht.
- TROJAN, M.D.; LINDEN, D.R. (1992): Microrelief and rainfall effects on water and solute movement in earthworm burrows. In: Soil Sci. Soc. Am. J., 56, 727-733.
- UHLIG, U. (2001): Erfassung der Makroporenzahl und -verteilung langjährig differenziert bearbeiteter Ackerflächen unter besonderer Berücksichtigung der Bodenerosion. Dipl. Arbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Fachbereich Landbau/ Landespflege, Dresden.
- VDLUFA- METHODENBUCH (1991): Die Untersuchung von Böden. In: Bassler, R. (Hrsg.), 4. Auflage, Band 1, Darmstadt: VDLUFA-Verlag.

- WEISSKOPF, P.; ZIHLMANN, U.; WALTHER, U. (2001): Einfluss der Bewirtschaftung auf die Stickstoffdynamik im Bodenwasser. In: *Agrar Forschung*, 9, 348-353.
- WILKENS, K. (1994): Einfluss langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf das Makrogefüge des Bodens. In: TEBRÜGGE, F.; DREIER, M. (Hrsg.): *Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristigen Auswirkungen auf den Boden*, Wiss. Fachverlag Dr. Fleck, Niederkleen, 117-128.
- WINNIGE, B.; CORZELIUS, U.; FREILINGHAUS, M. (1998): Indikation der aktuellen Erosionsgefährdung mit Hilfe der Bodenbedeckung. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 88, 569-572.
- WURBS, A.; KERSEBAUM, K.C.; WERNER, A. (2000): Stickstoffaustrag bei integrierter und ökologischer Bewirtschaftung – Szenariorechnung zur Abschätzung standörtlicher Risiken. In: *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung*, 6, 241-246, Berlin.
- ZACHARIAS, St. (1999): *Bodenphysikalische Untersuchungen als ein Beitrag zur Klärung der Umweltwirkung von Miscanthus x giganteus*. Dissertation, Uni Rostock.
- ZIHLMANN, U.; WEISSKOPF, P.; WALTHER, U.; BRACK, E.; DUBOIS, D. (2001): Stickstoffdynamik im Boden bei verschiedenen Kartoffel-anbautechniken. In: *Agrar Forschung*, 5, 223-228.
- ZIMMERLING, B.; NITZSCHE, O.; SCHMIDT, W.; KRÜCK, St.; ZIMMERMANN, M. (2001): Wasserinfiltration auf konventionell und konservierend bearbeiteten Ackerböden bei Simulation von Intensivniederschlägen. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 2 (96), 791-792.
- ZIMMERLING, B.; SCHMIDT, W. (2002): Beitrag der konservierenden Bodenbearbeitung zum vorbeugenden Hochwasserschutz. In: *Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft*, 11, 23-51.

9 ANHANG

Anlage 1	Beschreibung der verwendeten Methoden	A
Anlage 2	Foto Beregnungsanlage	B
Anlage 3	Foto Überstauanlage	B
Anlage 4	Tropfenbild bei der Beregnung einer Bodensäule	C

Anlage 1 Beschreibung der verwendeten Methoden

Textur: bestimmt nach dem Sieb- und Pipettverfahren nach Köhn (DIN 19683, Teil 2) (AG BODEN, 1994)

Bodenfeuchte: bestimmt nach DIN ISO 11465 (DIN, 2000)

Trockenrohddichte: ermittelt nach DIN 19683 Blatt 12 (AG BODEN, 1994)

Porenvolumen: errechnet entsprechend DIN 19683 Blatt 13 aus der ermittelten Trockenrohddichte und der Dichte der festen Bodensubstanz (AG BODEN, 1994)

kF-Wert Messung: Die Stechzylinderproben wurden von unten aufgesättigt. Anschließend wurde bei konstantem Druckhöhengradienten die Wasserleitfähigkeit nach dem Heberprinzip ermittelt. Die gemessenen Einzelwerte wurden zum geometrischen Mittel zusammengefasst.

pF-Wert Messung: Die Stechzylinder wurden mit einem definierten Unterdruck (bis pF 1,8) bzw. einem Überdruck (> pF 1,8) entwässert und so auf Wassergehalte eingestellt, die einem pF-Wert von 1,8; 2,5; 3,0 und 4,2 entsprechen. Aus den gemessenen Einzelwerten wurde der Mittelwert gebildet.

pH-Wert (CaCl₂): bestimmt nach VDLUFA Methodenbuch 1 A 5.1.1 (VDLUFA-Methodenvorschriften 1991)

Organische Bodensubstanz: Organischer Kohlenstoff (C_{org}) und Gesamtstickstoff (n_t) wurden durch trockene Verbrennung im reinen Sauerstoff bei 950 °C aus dem Boden freigesetzt (Elementaranalyse) DIN ISO 10694 (DIN, 2000). Als Analysegerät diente der Elementaranalysator CHN-1000 von der Firma LECO. Da die untersuchten Böden kein Carbonat enthielten, wurde auf eine Carbonatentfernung vor der Analyse verzichtet. Der ermittelte Kohlenstoff gilt als organischer Kohlenstoff (SCHMIDT et al., 2002).

Aggregatstabilität: ermittelt im Nasssiebverfahren nach MURER et al. (1993). Die Proben wurden lufttrocken gesiebt. Zur Analyse wurden Aggregate mit einer Größe von 1 bis 2 mm verwendet.

Makroporendichte: Mittels Bohrsonde (Durchmesser: 8,5 cm) wurden in 5 Schritten a 10 cm Bohrkern entnommen und die an der Bruchstelle des Bohrkernes sichtbaren Makroporen auf Folien übertragen. Die folgenden Tiefenstufen wurden dem selben Bohrloch entnommen. An der Bodenoberfläche auslaufende Makroporen wurden ebenfalls auf Folien übertragen. Pro Bearbeitungsvariante wurden 10 Bohrungen a 5 Tiefenstufen durchgeführt. Die Makroporen wurden hinsichtlich ihres Durchmessers und ihrer Anzahl ausgewertet (UHLIG, 2001).

Messung der Bromid- und Chloridgehalte: Zur Bestimmung der Stoffkonzentrationen von Bromid und Chlorid in den einzelnen Perkolaten wurde ein Ionenchromatograph (HPLC-Gerät) verwendet. Die Perkolate wurden in den Chromatographen eingespritzt und über eine Trennsäule aus Ionenaustauscherharz geleitet. Durch einen UV aktiven Eluenten (Kaliumhydrogenphthalat) wurden die Anionen Bromid und Chlorid getrennt und mit einem UV Detektor quantifiziert. Die Kalibrierung erfolgt mit einer Lösung bekannter Bromid- bzw. Chloridgehalte.



Anlage 2 Foto Beregnungsanlage



Anlage 3 Foto Überstauanlage



Anlage 4 Tropfenbild bei der Beregnung einer Bodensäule (Direktsaat)