**Transport von Wasser, Soluten und Dispersionen
in wasserungesättigtem Sand**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Agrarwissenschaften
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von
Peter Gernandt
geboren in Göttingen

Göttingen, Mai 2003

1. Referent: Prof. Dr. B. Meyer
2. Referent: Prof. Dr. W. Römer

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Mai 2003

Verzeichnisse

A Kapitelverzeichnis	I
B Tabellenverzeichnis	IV
C Abbildungsverzeichnis	V

A Kapitelverzeichnis

1 Fragestellung	1
2 Wissensstand	3
2.1 Lufteinschlüsse.....	3
2.2 Lamellenform.....	3
2.3 Fließvorgänge.....	3
2.4 Vertikale Fließbahnen.....	3
2.5 Bevorzugtes Fließen.....	4
2.6 Veröffentlichungen.....	5
2.7 Methodik.....	6
3 Orientierende Versuche	7
3.1 Sinn und Zweck.....	7
3.2 Gerät und Material.....	8
3.3 Befüllung der Lysimeter.....	11
3.4 Beregnung.....	11
3.5 Visuelle Auswertung.....	11
3.6 Versuche.....	12
3.6.1 Versuch 1: Infiltration in horizontal geschichtetem Sand, Korngröße < 355 µm.....	12
3.6.1.1 Abfluss.....	12
3.6.1.2 Wasserspeicherung.....	14
3.6.1.3 Visuelle Befunde.....	14
3.6.2 Versuch 2: Infiltration in horizontal geschichtetem Sand, Korngröße 355 – 630 µm.....	15
3.6.2.1 Zeitlicher Ablauf des Fließgeschehens.....	15
3.6.2.2 Zeitlicher Ablauf der Wasserspeicherung.....	16
3.6.2.3 Visuelle Befunde.....	17
3.6.2.4 Fortsetzung des Versuches nach Farbstoffauswaschung.....	18
3.6.2.5 Interpretation der Versuche 1 und 2.....	20
3.6.3 Modell A: Vorstellung zur Struktur der Wasserlamellen.....	21
3.6.4 Versuch 3: Transport des Tracers Amaranth.....	22
3.6.4.1 Zeitlicher Ablauf.....	22
3.6.4.2 Wasserspeicherung.....	23
3.6.4.3 Amaranthtransport.....	24
3.6.5 Versuche 4 und 5: Wassertransport in vertikal geschichtetem Sand.....	25
3.6.5.1 Versuch 4: Sand < 355 µm.....	26
3.6.5.2 Versuch 5: Sand 630 – 355 µm.....	27
3.6.6 Versuch 6: Kreuz- oder Diagonalschichtung.....	28
3.6.7 Versuche 7, 8 und 9: Einseitige Beregnung, laterale Ausbreitung.....	29
3.6.8 Versuch 10: Grober Mittelsand 630 – 355 µm.....	31
3.6.9 Versuche 11, 12, 13 und 14: Ausbreitung von Wasserlamellen.....	33
3.6.10 Versuche 15 und 16: Wasserfluss durch Sandpakete unterschiedlicher Sortierung.....	35
3.6.11 Versuch 17: Lateraler Fluss durch horizontale Lamellen.....	37
3.6.12 Versuch 18: Wasserfluss in Grobsand und Feinkies.....	39
3.6.13 Modell B.....	40

4 Hauptversuche: Quantitäten des Wasser- und Stofftransportes in 1 m³-Glaslysimetern	42
4.1 Fragestellung und Übersicht	42
4.2 Messvorrichtungen, Füllmaterial und Analytik	42
4.2.1 Lysimeter	43
4.2.1.1 Ausmaße und Material	43
4.2.1.2 Sicherung gegen Ausfließen	45
4.2.1.3 Vorrichtung zur Beregnung	45
4.2.1.4 Vorrichtung zur Befüllung mit Sand	47
4.2.1.5 Befüllung des Lysimeters	47
4.2.1.6 Beregnung	48
4.2.1.7 Verdunstung	49
4.2.1.8 Lysimeterentleerung	49
4.2.2 Füllmaterial Sand	50
4.2.3 Tracer	51
4.2.3.1 Chlorid (Cl ⁻)	51
4.2.3.2 Nitrat (NO ₃ ⁻)	52
4.2.3.3 Amaranth (acid red 27)	52
4.2.3.4 Ton	52
4.2.4 Analytik	52
4.2.4.1 Wasser	52
4.2.4.2 Chlorid	53
4.2.4.3 Nitrat	53
4.2.4.4 Amaranth	53
4.2.4.5 Ton	53
4.2.5 Luftdruckmessung	54
4.2.6 Bildverarbeitung	54
4.2.7 EDV	54
4.3 Versuch I (Grober Mittelsand) - Dauer 287 Tage	55
4.3.1 Zeitlicher Ablauf	55
4.3.2 Wasserfluss	57
4.3.3 Wasserspeicherung	62
4.3.3.1 Dynamische Speicherung	62
4.3.3.2 Statische Speicherung	63
4.3.3.2.1 Ψ - Θ -Beziehungen	63
4.3.3.2.2 Stechzylinderproben	63
4.3.3.2.3 Sand-Trockendichte am Ende des Perkulationsversuches	65
4.3.3.2.4 Statischer Wassergehalt am Ende des Perkulationsversuches	67
4.3.4 Visuelle Befunde	70
4.3.5 Tracer	72
4.3.5.1 Chlorid	72
4.3.5.2 Nitrat	74
4.3.5.3 Amaranth	76
4.3.5.4 Ton	79
4.3.6 Luftdruck	79
4.4 Versuch II (Grober Mittelsand) - Dauer 38 Tage	81
4.4.1 Zeitlicher Ablauf	81
4.4.2 Wasserfluss	81
4.4.3 Wasserspeicherung, Dichte- und Wasserverteilung	85
4.4.4 Visuelle Beobachtungen	90
4.4.5 Tracer	91
4.4.5.1 Chlorid	91
4.4.5.2 Ton	95
4.4.6 Luftdruck	96

Verzeichnisse	A - B
4.5 Versuch III (Sand < 355 µm Ø inkl. Schluff und Ton) - Dauer 120 Tage.....	97
4.5.1 Zeitlicher Ablauf.....	97
4.5.2 Wasserfluss.....	97
4.5.3 Wasserspeicherung, Verteilung von Dichte und statisch gebundenem Wasser.....	101
4.5.4 Visuelle Beobachtungen.....	106
4.5.5 Tonlamellen.....	107
4.5.6 Interpretation.....	112
5 Ergebnisse – Deutung – Kritik - Schlussfolgerungen.....	113
5.1 Wasserlamellen.....	113
5.2 Fließen von Wasser, Lösungen und Suspensionen.....	114
5.3 Statische und dynamische Wasserkapazität.....	114
5.4 Stofftransport.....	115
6 Zusammenfassung.....	117
7 Literatur.....	118
Lebenslauf.....	120

B Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Übersicht über die durchgeführten orientierenden Versuche (Der Index a – e zeigt gleiche Versuchsanordnungen an unterschiedlichen Sandmaterialien; * weist auf Sonderversuche bzw. solche mit modifiziertem Versuchsaufbau hin).....	7
Tab. 3.2: Wasserspeicherung in % des Sandgesamtvolumens.....	17
Tab. 3.3: Versuch 7, 8 und 9: Übersicht.....	29
Tab. 3.4: Versuch 11 bis 14: Übersicht.....	33
Tab. 4.1: Umrechnung der Beregnungsrate von l zu mm.....	49
Tab. 4.2: Durchschnittliche Korngrößenverteilung in Prozent des Feinboden-Materials < 2 m.....	50
Tab. 4.3: Korngrößenverteilung der beiden durch Trockensiebung gewonnenen Versuchssande.....	51
Tab. 4.4: Abflussmengen, -anteile, -ereignisse und -raten der Abflusszellen und –stutzen.....	58
Tab. 4.5: Zeitgang der Regen- und Ablauf-Tagesraten und der Tageswasser-Speichermenge.....	62
Tab. 4.6: Dichte, Porenvolumen und saugspannungsspezifische Wassergehalte (Vol.-%); PP: poröse Platte im Drucktopf, ZE: Zentrifuge.....	63
Tab. 4.7: Gemessene Drücke während der Starkregen-Simulation am Versuchstag 270 (Die rote Linie markiert das deutliche Einsetzen des Abfließens).....	80
Tab. 4.8: Vergleich der dynamisch und statisch gebundenen Wassermengen während der drei Hauptversuche Angaben in Liter (l) bezogen auf 100 cm Sandsäule.....	102
Tab. 4.9: Durchschnittliche Dichten und Tongehalte der Sandsäule in den Schichten I – IX.....	108

C Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Kaskadenfluss (nach MEYER und BECKER 2001).....	5
Abb. 3.1: Lysimeter A und B (Seitenansichten).....	8
Abb. 3.2: Lysimeter C (Seitenansichten); links: bei Befüllung, Mitte und rechts: während der Beregnung.....	9
Abb. 3.3: Lysimeter D (Seitenansichten).....	10
Abb. 3.4: Zeitgang der Beregnungs- und Abflussraten im Versuch 1.....	13
Abb. 3.5: Versuch 1: Wasserinhalt des Lysimeters im Zeitablauf.....	13
Abb. 3.6: Versuch 1: Fließmuster nach x mm Wasseraufbringung (10 mm = 1 d); a,b,c s. Text.....	15
Abb. 3.7: Versuch 2: Zeitgang der Beregnungs- und Abflussraten (Ausgangszustand: trockener Sand).....	16
Abb. 3.8: Versuch 2, Abschnitt 1: Wasserinhalt des Lysimeters im Zeitablauf.....	16
Abb. 3.9: Im Verlauf des Versuches 2, im ersten Versuchsabschnitt entstandene Fließmuster (10 mm = 1 d).....	18
Abb. 3.10: Versuch 2: Zeitgang der Beregnungs- und Abflussraten (Ausgangszustand: feuchter Sand).....	19
Abb. 3.11: Versuch 2, Abschnitt 2: Wasserinhalt des Lysimeters im Zeitablauf.....	20
Abb. 3.12 Versuch 2, Abschnitt 2: Fließmuster (10 mm = 1 d).....	20
Abb. 3.13: Modell A.....	21
Abb. 3.14: Versuch 3: Zeitgang der Beregnungs- und Abflussraten.....	23
Abb. 3.15: Versuch 3: Ein- und Austragsraten des Farbstoffes Amaranth.....	24
Abb. 3.16: Versuch 3: Amaranthkonzentration der Beregnungs- und Abflusslösung im Zeitgang.....	25
Abb. 3.17: Versuch 4: Fließmuster (10 mm = 1 d).....	26
Abb. 3.18: Versuch 4: Amaranthverteilung innerhalb der Sandsäule fünf Tage nach dem letzten Abflussereignis.....	27
Abb. 3.19: Versuch 5: Fließmuster (10 mm = 1 d).....	28
Abb. 3.20: Versuch 6: Fließmuster (10 mm = 1 d).....	29
Abb. 3.21: Versuch 7: Fließmuster (10 mm = 1 d).....	30
Abb. 3.22: Versuch 8: Fließmuster (10 mm = 1 d).....	30
Abb. 3.23: Versuch 9: Fließmuster (10 mm = 1 d).....	31
Abb. 3.24: Versuch 10: Frontseitenfließmuster (10 mm = 1 d).....	32
Abb. 3.25: Versuch 10: Verteilung von Wasser und mit Amaranth gefärbtem Wasser entlang der Lysimeterrückseite im hydrostatischen Zustand ab Tag 40.....	33
Abb. 3.26: Versuch 11: Fließmuster (10 mm = 1 d).....	34
Abb. 3.27: Versuch 12: Fließmuster (10 mm = 1 d).....	34
Abb. 3.28: Versuch 13: Fließmuster (10 mm = 1 d).....	35
Abb. 3.29: Versuch 14: Fließmuster (10 mm = 1 d).....	35
Abb. 3.30: Versuch 15: Fließmuster, zwei Schichten grober Mittelsand (630 – 355 µm Ø), 4 cm stark, in Sand < 355 µm Ø; 10 mm Regenhöhe entsprechen einem Tag.....	36
Abb. 3.31: Versuch 15: Fließmuster, zwei Schichten Sand (< 355 µm Ø), 4 cm stark, in grobem Mittelsand 630 -355 µm Ø; 10 mm Regenhöhe entsprechen einem Tag.....	36
Abb. 3.32: Versuch 17: Fließmuster (10 mm = 1 d).....	38
Abb. 3.33: Versuch 17: Tonanreicherungen in Wasserlamellen.....	39
Abb. 3.34: Versuch 18: Fließmuster (10 mm = 1 d).....	39
Abb. 3.35: Modell B.....	41
Abb. 4.1: Glaslysimeter (Seitenansichten).....	44
Abb. 4.2: Glaslysimeter mit aufgesetzter Beregnungsanlage.....	44
Abb. 4.3: Anordnung der Abflusszellen über den Abflusslöchern.....	45
Abb. 4.4: Beregnungseinrichtung.....	46
Abb. 4.5: Antrieb des Beregnungswagens.....	46
Abb. 4.6: Selbstentladewagen zur Lysimeterbefüllung.....	47
Abb. 4.7: Lysimeterbefüllung mit Selbstentladewagen.....	48

Verzeichnisse	C
Abb. 4.8: Füllungsbedingte Strukturen im trockenen Sand.....	48
Abb. 4.9: Stechwürfel.....	49
Abb. 4.10: Herkunftsgebiet des für die Versuche verwendeten Sandes (vergrößerter Ausschnitt aus der TK L3524 Hannover Nord und der TK L3526 Burgdorf).....	50
Abb. 4.11: Versuchsablauf.....	56
Abb. 4.12: Tagesraten des Wasserein- und austrags während des Versuches I (verdunstungskorrigierte Werte der Eintragsraten).....	57
Abb. 4.13: Lage der am Abflussgeschehen beteiligten Zellen und Abflusstutzen im Lysimeterboden und ihr Anteil an der Summe des gesamten Abflusses.....	57
Abb. 4.14: Anteile des randlichen und des zentralen Abflussgeschehens am Gesamt-Abflussgeschehen.....	58
Abb. 4.15: Zeitgang der Abflussraten an den Ausflüssen 7, 70 und 162.....	59
Abb. 4.16: Zeitgang der Raten in l/d und mm/d: Gesamtabfluss-Tagesraten (1 – 171; blau) und Raten der Abfluss-Zylinder-Gruppen (1 - 85, violett) und (86 - 171; rot) Niederschlagsrate (grün).....	59
Abb. 4.17: Zeitgang der täglichen Abflussraten der Abflüsse 161, 162, 163, 164, 166 und 167.....	60
Abb. 4.18: Wasserinhalt des Lysimeters im Zeitablauf, variiert durch die Raten der Berechnung.....	61
Abb. 4.19: Zeitgang der Abflussraten des Lysimeters und der Zahl „aktiver“ Abflüsse.....	61
Abb. 4.20: Rechnerische Tiefenverteilung des statisch gespeicherten Wassers im Lysimeter im kapillaren Gleichgewichtszustand bei Annahme gleicher Dichte der Sandfüllung.....	64
Abb. 4.21: Tiefenabhängigkeit der Sand-Trockendichte im statischen Zustand am Versuchsende. Luft- (LPV) und Wasserporen-Anteile (WPV) am Gesamtporenanteil (GPV) bei insgesamt 47,27 l Speicherwasser.....	64
Abb. 4.22: Verteilung der Trockendichte in der Sandfüllung des Lysimeters, 900 Einheiten zu je 1 dm ³	66
Abb. 4.23: Verteilung der Gesamtporen-Volumina der 1 dm ³ -Sandblöcke in den Schichten I bis X.....	67
Abb. 4.24: Wassergehalte in Vol.-% in den kubischen 1 dm ³ -Blöcken der Sandfüllung nach Abfluss-Ende.....	68
Abb. 4.25: Verteilung der Wasserporen-Volumina der 1 dm ³ -Sandblöcke in den Schichten I bis X.....	69
Abb. 4.26: Fließmuster während des Eindringens von Lösung in den lufttrockenen Sand (Versuchstag 1 bis 10).....	70
Abb. 4.27: Fließmuster während des Eindringens von Amaranthlösung in den feuchten Sand (Versuchstag 125 bis 155).....	71
Abb. 4.28: Fließmuster-Bilder während der Amaranth-Auswaschphase (Versuchstag 186, 200 und 270).....	72
Abb. 4.29: Ausgetragenes Chlorid in % der eingetragenen Chloridmenge.....	73
Abb. 4.30: Differenz der Tagesraten von Ein- und Austrag an Cl ⁻ bezogen auf das Lysimeter; positiv: Eintragüberschuss, negativ: Austragüberschuss.....	73
Abb. 4.31: Cl ⁻ -Konzentration in den Ablauflösungen aller fördernden Ablaufstutzen.....	74
Abb. 4.32: Ausgetragenes Nitrat in % der eingetragenen Nitratmenge.....	75
Abb. 4.33: Differenz der Tagesraten von Ein- und Austrag an NO ₃ ⁻ bezogen auf das Lysimeter; positiv: Eintragüberschuss, negativ: Austragüberschuss.....	75
Abb. 4.34: Nitratkonzentration in der Ablauflösung der Einzelabflüsse.....	76
Abb. 4.35: Ausgetragenes Amaranth in % der eingetragenen Amaranthmenge.....	77
Abb. 4.36: Differenz der Tagesraten von Ein- und Austrag an Amaranth bezogen auf das Lysimeter; positiv: Eintragüberschuss, negativ: Austragüberschuss.....	78
Abb. 4.37: Amaranthkonzentration summarisch in der Ablauflösung aller Ablaufstutzen.....	78
Abb. 4.38: Lysimeternaufsicht und Lage der Luftdruckmesssonden.....	79
Abb. 4.39: Versuch II: Abfluss-Tagesraten.....	82
Abb. 4.40: Lage der am Abfluss beteiligten Zellen und Abflusstutzen im Lysimeterboden und ihr Anteil an der Summe des gesamten Abflusses während des Versuches II.....	82
Abb. 4.41: Anteile des randlichen und des zentralen Abflusses am Gesamtabfluss (G).....	83
Abb. 4.42: Zeitgang der Tages-Abflussraten der Abflusszylinder-Gruppen 1 – 85 (blau) und 86 – 171 (rot).....	84
Abb. 4.43: Zeitgang der Tagessumme der Abflussraten der Ablaufstutzen-Gruppen (1 – 85 blau und 86 – 171 rot).....	84
Abb. 4.44: Abflussraten und die Zahl „aktiver“ Ablaufstutzen im Versuchsablauf.....	85
Abb. 4.45: Wasserinhalt des Lysimeters im Zeitablauf.....	86
Abb. 4.46: Tiefenabhängigkeit der Sand-Trockendichte im statischen Zustand am Versuchsende. Luft- (LPV) und Wasser- (WPV) – Porenanteile am Gesamt-Porenanteil (GPV) bei insgesamt 43,42 l Speicherwasser.....	86

Verzeichnisse	C
Abb. 4.47: Verteilung der Trockendichte in der Sandfüllung des Lysimeters, 900 Einheiten zu je 1 dm ³	87
Abb. 4.48: Häufigkeitsverteilung der Porenvolumina in den dm ³ -Sandwürfeln in den zehn Schichten des Lysimeters..	88
Abb. 4.49: Wassergehalte (statisch) in Vol.-% in den kubischen 1 dm ³ -Blöcken der Sandfüllung nach Ende des Abfließens.....	89
Abb. 4.50: Verteilung der mit Wasser gefüllten Porenvolumenanteile der 1 dm ³ -Sandblöcke in den Schichten I bis X.	90
Abb. 4.51: Fließmuster während des Eindringens von Lösung in den lufttrockenen Sand (Versuchstage 1 bis 8).....	91
Abb. 4.52: Zeitgang der Cl ⁻ - Tagesein- und -Austragsraten.....	92
Abb. 4.53: Cl ⁻ - Inhalt des Lysimeters im Zeitablauf.....	93
Abb. 4.54: Elektrische Leitfähigkeit in mS/cm in der Sandsuspension aus den vorher getrockneten 1 dm ³ -Blöcken der Sandfüllung nach Beendigung des Abflusses.....	94
Abb. 4.55: Lysimeternaufsicht und Lage der Druckmesssonden.....	96
Abb. 4.56: Abfluss-Tagesraten.....	98
Abb. 4.57: Lage der am Abfluss beteiligten Zellen und Abflussstutzen im Lysimeterboden und ihr Anteil an der Summe des gesamten Abflusses während des Versuches III.....	98
Abb. 4.58: Anteile des randlichen und des zentralen Abflusses am Gesamtabfluss.....	99
Abb. 4.59: Zeitgang der Tages-Abflussraten der Abflusszylinder-Gruppen 1 - 85 (blau) und 86 - 171 (rot).....	100
Abb. 4.60: Zeitgang der Tagessumme der Abflussraten der Abflusszylinder-Gruppen 1 - 85 (blau) und 86 - 171 (rot).	100
Abb. 4.61: Zeitgang der Abflussraten und der Zahl "aktiver" Abflüsse.....	101
Abb. 4.62: Wasserinhalt des Lysimeters im Zeitablauf.....	101
Abb. 4.63: Tiefenabhängigkeit der Sand-Trockendichte im statischen Zustand am Versuchsende Luft- (LPV) und Wasser-Porenanteile (WPV) am Gesamt-Porenanteil (GPV) bei insgesamt 57,58 l Speicherwasser.....	102
Abb. 4.64: Verteilung der Trockendichte und der Porenvolumina in der Sandfüllung des Lysimeters, 900 Einheiten zu je 1 dm ³	103
Abb. 4.65: Verteilung der Gesamt-Porenvolumina der dm ³ -Sandblöcke in den Schichten I bis IX.....	104
Abb. 4.66: Wassergehalte in Vol.-% in den kubischen 1 dm ³ -Blöcken der Sandfüllung nach Abflussende.....	105
Abb. 4.67: Verteilung der Wasserporen-Volumina der 1 dm ³ -Sandblöcke in den Schichten I bis IX.....	106
Abb. 4.68: Fließmuster während des Eindringens von Lösung in den lufttrockenen Sand (Versuchstag 1 bis 11, vor dem Einsetzen des Abfließens).....	107
Abb. 4.69: Tonbänder (Aufsicht auf Schicht IX in 80 cm Tiefe).....	109
Abb. 4.70: Tonbänder: Entstandene Strukturen in 70 bis 80 cm Tiefe (Größenvergleich: 1 DM-Münze Ø 23 mm).....	110
Abb. 4.71: Tongehalte der Tonsuspensionen ausgewählter 1 dm ³ -Sandblöcke der 0,9 m ³ -Sandsäule (gewonnen durch Zugabe von 1l H ₂ O demin. zu den vorher getrockneten Sandblöcken).....	111

1 Fragestellung

Mit der vorliegenden Arbeit wird über Versuche berichtet, die zur Erklärung von Phänomenen angesetzt worden sind, welche seit über fünfzig Jahren bekannt, bislang aber nur sehr unbefriedigend gedeutet und in Modellierungsansätzen und bei Lysimeterversuchen kaum berücksichtigt worden sind.

Es handelt sich dabei um die Zusammenführung zweier Erscheinungen, die offensichtlich bei der Bodenbildung aus sandigen und z.T. schluffigen Lockersedimenten in einem kausalen Zusammenhang stehen:

Das ist erstens die Feststellung, dass die Versickerung von Wasser und Soluten in der Dränzone, d.h. der nicht wassergesättigten Zone von Böden, zwischen der Evapotranspirations- und der Grundwasserzone gelegen, nicht im Sinne der von vielen Modellieransätzen angenommenen frontalen Abwärtsverdrängung – mit oder ohne kleinräumig bevorzugtem Fließen – erfolgt, sondern zum Teil großräumig lateral differenziert irregulär. Das gilt in erster Linie für schluff- und tonarme grob- und mittelkörnige Sande und Sandböden, findet sich aber im feuchteren Mitteldeutschland auch in den Dränzonen der tonarmen primären Löss. Dieser Transportprozess gibt sich äußerlich im Bodenprofil im Wesentlichen durch das Auftreten ortsfester mehr oder weniger horizontaler Wasserlamellen zu erkennen.

Das zweite Phänomen ist das Auftreten von ebenfalls meist horizontalen Lamellen aus verlagertem Ton. Ihre Entstehung ist an die erfolgte Abfuhr von CaCO_3 gebunden und die Absenkung der Kationenbelegung des Tons auf Werte, die einer Dispergierung förderlich sind und die Migration des Tons auslösen. Der mit dem Sickerwasser wandernde Ton scheidet sich an Stellen ab, an denen das Wasser zur Ruhe kommt. Das ist - und dazu greife man auf das Modellbild 3.13 in Kapitel 3.6.3 (Modell A) vor – in Lamellen gegeben, wo das Wasser über lange Zeiten hinweg statisch verharren kann, wenn es nicht durch Evapotranspiration aufgezehrt wird. MOSCHREFI (1967) konnte im Experiment mit Lössbodenmaterial zeigen, dass sich der vom Wasser mitgeführte dispergierte Ton an der Oberseite der Einstauzonen (E) abscheidet. Ähnlich wie sich bei einem sich spreitenden Tropfen Tonsuspension auf dem mikroskopischen Objektträger der Ton ringförmig in der Zone reduzierter Wärmebewegung der Wassermoleküle bei Annäherung von Adhäsions- und Kohäsionsschicht anordnet, wird dies auch für die Bildung zwiebel förmiger Tonabscheidungen an den Kornberührungsstellen im oberen Grenzsau der Wasserlamelleneinstauzone angenommen.

Die Bildung von Tonlamellen, die schon mehrfach (u.a. von DIJKERMAN et al., 1967) im Ansatz beobachtet wurde, soll aber in der vorliegenden Arbeit nur nachrangig und als Begleitphänomen unter Einsatz von Ton als Tracer betrachtet werden. Der Grund dafür liegt darin, dass Beobachtungen im Gelände immer wieder gezeigt haben - so besonders bei der Beobachtung von „Verheilungen“ vertikaler Bodenstörungen durch Tonlamellen wie an vertikalen Wurzelkanälen, Hamsterbauen, anthropogenen Einfüllungen, Senkrechtstellungen von Schüttungen an Abbrüchen etc. – dass Tonlamellen eine Eigendynamik entfalten können.

Zuerst - wie beschrieben angelegt in Zusammenhang mit Wasserlamellen - können sie bei dem lateralen Wachstum solcher Wasserlamellen offenbar dahin führen, dass sie bei einem nach Austrocknung erfolgenden Wiederaufbau der Wasserlamellen deren Lage nicht nur fixieren, sondern auch deren lateral-horizontale Ausdehnung in Zonen des Sandes hinein und durch diese hindurch veranlassen, in denen aufgrund einer vertikalen Sandschichtung keine Bildung von Wasserlamellen erwartet werden kann. Die Beziehung „Wasserlamelle → Tonlamelle“ wird dadurch in „Tonlamelle → Wasserlamelle“ umgekehrt.

Die Untersuchungen sollen daher im Wesentlichen folgende Fragen zu beantworten versuchen:

- Wie, wo und warum entstehen in Sanden bei deren Befeuchtung durch eindringendes Niederschlagswasser Wasserlamellen?
- Welchen Einfluss haben diese Wasserlamellen auf das Fließen des Wassers bei der Versickerung, als da sind: Vertikaler Durchbruch durch die interlamellaren lufthaltigen Sandlagen oder die laterale Ableitung des Wassers zu schnell leitenden vertikalen Sickerbahnen hin?
- In welchem Zusammenhang stehen statische und dynamische Wasserhaltefähigkeit von Sanden mit der Ausbildung von Wasserlamellen?
- Welchen Einfluss haben Körnung und Struktur des Sandes auf die Ausbildung des Netzsystems der Lamellen-Fließbahnen?
- Ist die räumliche Anordnung von Wasserlamellen und mit diesen vernetzten vertikalen kapillaren Fließbahnen ortsfest und zwar nicht nur im Hinblick auf einen einzelnen Beregnungsgang, sondern auch dann, wenn die Lamellen austrocknen und eine neue Befeuchtungsfront von oben her erfolgt?
- Welche Funktionen hat die Herausbildung eines Netzwerkes von horizontalen Wasserlamellen und vertikalen Fließbahnen für den Transport von molekular- und kolloidaldispersen Soluten und feindispersen Suspensionen?

2 Wissensstand

2.1 Lufteinschlüsse

Füllt man einen Sandzylinder mit trockenem Sand und bewässert diesen von oben her mit einem größeren Schub an Wasser, so wird dieses wenige Zentimeter tief kapillar in den Sand hineingesogen. Dabei steigt der Druck der eingeschlossenen Luft. Dieser kann sich als durchbrechende Blase entladen. Entweicht die Luft nicht, trägt der trockene Sand die Wassersäule monatelang ohne Veränderung: „Druckluftkissen-Phänomen“.

Versieht man den Sandzylinder an seiner Basis mit einem Loch, so dass die Luft von der eindringenden Wassersäule herausgepresst werden kann, findet trotzdem keine völlige Sättigung des Sandes mit Wasser statt. Das kapillar schnell eingesogene Wasser umzingelt Lufteinschlüsse und ordnet sich zu Wasserlamellen. Dass dabei eingeschlossene Luft unter Druck gerät, ist daran zu erkennen, dass sie sich zum Teil zu Luftblasen sammelt. Dies ist die wesentliche Ursache der Bildung von sogenannten „Schaumböden“ in desertischen Gebieten mit gelegentlichem Starkregen und auch für die strukturelle Regeneration verklumpter Lössboden-Aggregate.

2.2 Lamellenform

Wasserlamellen zeigen im Hinblick auf ihre Dicke und ihre vertikalen Abstände eine deutliche Abhängigkeit von der Körnung des Sandes. Je gröber dieser ist, desto dünner sind die Lamellen und desto größer die Abstände.

2.3 Fließvorgänge

Im Gegensatz zum sogenannten „downward displacement“ = „vertikale Abwärtsverdrängung“ = „piston flow“, wie er z.B. in Feinsanden und Lössen beobachtet wird, zeigt sich in den meisten Sanden ein wellenförmiges Abfließen.

In einem im kapillaren Saugspannungs-Gleichgewicht mit einem Grundwasser-Spiegel befindlichen Lösspaket führt das Aufbringen einer geringen Wassermenge auf die Bodenoberfläche zu einem fast sofortigen Austritt dieser Wassermenge im Niveau des Grundwasserspiegels, selbst wenn dieser mehrere Meter tiefer liegt, vgl. MOSCHREFI 1967. In Sedimenten mit statischer Wasserbindung in Lamellenform wird dagegen bei gleicher Versuchsanordnung ein sich von oben nach unten fortsetzendes zum Teil viel Zeit beanspruchendes Anschwellen und Abschwollen der Wasserlamellen, also wellenförmiger Abfluss, beobachtet.

Dieser Vorgang ist bislang so gedeutet worden, dass während des Anschwellens einer Lamelle der erforderliche hydrostatische Druck aufgebaut werden muss, der erforderlich ist, um das Lamellenwasser die darunter liegende lufthaltige Zwischenlamelle an einigen Stellen durchbrechen zu lassen (s. Kap. 3.6.3, Abb. 3.13) und damit die Verbindung zur nächstfolgenden Lamelle herzustellen.

2.4 Vertikale Fließbahnen

Die Versickerung von Wasser in Böden mit Wasserlamellen-Bildung erfolgt zum einen in der vorbeschriebenen Weise, zum anderen aber – und dies wahrscheinlich in sehr viel stärkerem Maße – in Form von vertikalen Fließbahnen (Leitbahnen, Dochte), die direkt von der Oberfläche her oder aber innerhalb des Bodens durch laterale Wassereinspeisung von den Lamellen her das Wasser sehr schnell – quasi in Form eines Kurzschlusses – ohne wesentlichen Austausch mit der statischen Bodenlösung zum Grundwasser ableiten.

Dazu gibt es eine Reihe von Beobachtungen und Mitteilungen. SIEBNER 1995 und SIEBNER et al. 1997 berichten über ein 300 m²- Großlysimeter von 2 – 2,5 m Tiefe in der Colbitz-Letzlinger Heide, das homogen mit Sand der Umgebung aufgefüllt ist und unter Kiefernjungwuchs liegt. Das in den Wasserlamellen gespeicherte Wasser war stark salzhaltig durch anhaltenden Staubeintrag aus einer benachbarten Kali-Abraumhalde. Nachdem einige Jahre lang kein Sickerwasser gespendet worden war, lieferten Gewittergüsse 1995 plötzlich Sickerwasser, das fast salzfrei war, offenbar keinen Austausch mit dem Lamellenwasser des Sandes erfahren hatte und dieses auch nicht verdrängt hatte, sondern auf kurzem Wege direkt vertikal durchgebrochen war.

MUCH 1996 und BECKER et al. 1997 haben eine 10 • 10 m große Ackerfläche auf drenthezeitlichen Vorschüttsanden im Raum Celle gleichmäßig mit Chloridlösung bewässert und dann in einer 2 • 2 m Kernzone je 10 cm Tiefenabschnitt 400 Bodenblöcke à 1 dm³ auf ihren Chloridgehalt analysiert. Schon in 40 cm Tiefe konzentrierte sich die Chloridverteilung auf zwei randlich angeordnete vertikale – schluffreichere – „Dochte“ hin, durch welche die Chloridlösung vertikal abgeströmt war.

Dies erklärt, warum die von der landwirtschaftlichen Praxis zur N-Düngerbemessung angewendete Nmin-Bestimmung auf den meisten Sandböden in Hinblick auf Bilanzrechnungen meist unbrauchbar ist, und warum die landschaftsökologische Beurteilung des Wasser- und Stoffhaushaltes von Sandgebieten bislang kaum direkt von Messungen am Boden selbst ausgehen kann. So hat MÜSSEMEIER 1996 bei der Ausbringung von Chloridlösung als Tracer in die Ackerkrumen verschiedenen gekörnter Sandböden westlich von Hannover feststellen müssen, dass in den Böden aus schluff- und tonarmen Sanden der Tracer aus den Krumen langsam verschwand, ohne dass er sich im Boden darunter wiederfinden ließ. Die Versickerung muss demnach auf kurzem Weg über vertikale Fließbahnen erfolgt sein. Mit wachsenden Schluff- und Tongehalten dagegen zeichnete sich eine zunehmende Abwärtsverdrängung ab.

2.5 Bevorzugtes Fließen

Über „Bevorzugtes Fließen“ in dem Sinne, dass in bestimmten vertikal gedachten Bereichen von Sedimentkörpern ein rascher Fluss mit Massentransport abläuft und in angrenzenden Bereichen Bewegungsruhe bzw. geringer Flux mit vorwiegend diffusivem Stofftransport herrschen, wird in großem Umfang berichtet.

Als allgemein begriffbildendes Werk ist hier das von KUTÍLEK und NIELSEN 1994 zu nennen. MYAZAKI 1993 stellt umfangreiches Beobachtungsmaterial aus Sandmodellen zur Verfügung, wobei jedoch die Kleinmaßstäblichkeit und unbefriedigende kausale Deutungen wenig Anwendbarkeit für die hier gestellten Fragen bieten.

Die jüngst von DEURER 2000 und WEILER 2001 gelieferten Arbeiten mit ihren umfassenden Überblicken über die Simulation und Modellierung des ungesättigten Fließens bei präferentiellem Fluss unter Kiefernforst auf Sanden bei Hannover, bzw. über die den Makroporenfluss bestimmenden Mechanismen während der Infiltration geben den Stand der Kenntnisse zur Behandlung des landschaftsökologischen Problems wieder, stellen aber zum Schluss gewissermaßen gerade die Fragen, die in der hier vorliegenden Arbeit behandelt werden sollen. Neue Aspekte zum Wasserfluss in Sanden bzw. dessen Erfassung werden auch in den Arbeiten von RITSEMA (1998) und SCHMALZ (1999) gebracht.

2.6 Veröffentlichungen

Aus dieser Arbeit abgeleitete bzw. auch darüber hinaus gehende Interpretationen und Modellvorstellungen sind bereits unter GERNANDT 1998, GERNANDT u. MEYER a) 2001, b) 2001, MEYER u. BECKER 2001 veröffentlicht. Bezüge dazu sind im Text angemerkt.

Von besonderer Bedeutung ist dabei die zuletzt aufgeführte Arbeit, in der das Modell des „Kaskadenfließens“ „cascade flow“, vorgestellt wird. Da auf dieses in dieser Arbeit immer wieder verwiesen wird, soll es hier mit Hilfe der Abbildung 2.1 kurz vorgestellt werden.

Abb. 2.1: Kaskadenfluss (nach MEYER und BECKER 2001)

A „Kaskaden sind in der Betrachtung des horizontalen Flussverlaufs Gefällestrecken, in denen kurze Potentialsprünge (Wasserfall) mit längeren Strecken geringerer Gradienten (Becken) wechseln. Die Becken speichern Wasser und erhöhen dessen Verweildauer“

B „Der vertikale Flussverlauf in einem abgewandelten Kaskadensystem zeigt ebenfalls Strecken mit großem Gradient (Fallstrecke), die mit wassergefüllten Schalen geringerer Gradienten abwechseln. Bodenhydrologisch entspricht das Beckenwasser „Stauwasser“.

Der räumliche Fließverlauf wird entscheidend von der Gestalt der Becken oder Schalen geprägt. Sind sie lang und nach der Seite gedreht, können sie den Strom aus der horizontalen oder der vertikalen Richtung lateral ableiten. Damit bewirken sie eine großräumige Dispersion des Wasser- und Stofftransportes.

Kaskadenfluss ist bei grobkörnigen Sanden wie auch bei feinkörnigen Pelosolen, d.h. bei allen Böden mit geringer Kohärenz der kapillaren Wasserleitbahnen die in der Natur häufigste Alternative zum sog. Piston-Flow-Modell, der Grundlage der meisten Wasserfluss-Modelle für Böden.“

C „... Versuche mit Unterfanglysimetern in verschiedenen Tiefen zeigen: Die verschiedenen Abflusswege ufern zu den Seiten zu großen Distanzen zwischen Eintrittspunkt des Wassers an der Oberfläche und Austrittspunkt an der Unterseite aus.

Nach erfolgtem Ablauf bleibt wie bei einer abgestellten Kaskade in den horizontalen Fließstrecken ein erheblicher Teil des Leitporenvolumens wassergefüllt („Stauwasser“), das der Versorgung von Pflanzen dienen kann.“ MEYER und BECKER 2001

2.7 Methodik

Die Ausführungen des vorhergehenden Absatzes machen klar, dass Lysimeter als Mittel der Erkundung des Wasserhaushaltes von Sanden und damit auch als Grundlagen für Rechenmodelle, sich sehr weit von den natürlichen Bedingungen entfernen. Das liegt in erster Linie daran, dass die vertikalen Fließbahnen (Leitbahnen, Dachte), denen das Sickerwasser auf dem Wege des lateralen Lamellenflusses zuströmt, in Abhängigkeit von der Körnung und der Struktur der Sandpakete sehr unterschiedliche Abstände in der Horizontalen aufweisen, die von wenigen Dezimetern bis zu Dekametern reichen können. Jede Ummantelung von Lysimetern schafft hier zwangsläufig Artefakte, indem sie die Ausbildung naturferner Fließstrukturen erzwingt, die nicht mehr ins Gelände übertragbar sind (SIEBNER 1995).

Trotzdem erscheint die Verwendung von Lysimetern mit durchsichtigen Wänden einer der gangbaren methodischen Wege zu sein, um unter Verzicht auf geländeverwertbare Wasserhaushalts-Rechenmodelle die in der „Fragestellung“ aufgelisteten Probleme anzugehen und wenigstens Modellvorstellungen zu entwickeln.

Da der heterogene dispersive Wassertransport, differenziert durch statische und aktive Wasserlamellen, „präferentielle“ (bevorzugte) Lamellen-Durchbruchszonen und andere vertikale Fließzonen, auch einen sehr differenzierten Stofftransport mit konvektiver und diffusiver Verteilung verspricht, die allein anhand der Verteilung von Wasser und Luft in den Sandpaketen nicht zu erkennen sind, erscheint es zweckmäßig, statt des reinen Beregnungswassers mit ionaren und kolloidalen Tracern versetzte Solute zu verwenden, die eine örtliche Identifizierung gestatten (vgl. WALTHER et al. 2002).

Da es ein weiteres Ziel der Untersuchung ist, Abhängigkeiten des aus Wasserlamellen und vertikalen Fließbahnen gebildeten Netzwerkes von der Körnung und Struktur des Sandes zu erkunden, sollen die Untersuchungen zunächst an künstlichen Lysimeterfüllungen mit definierten Sandkorn-Größenfraktionen durchgeführt werden, wobei später strukturelle Variationen vorgenommen werden können.

3 Orientierende Versuche

3.1 Sinn und Zweck

Dieser Abschnitt befasst sich mit einer Reihe von Versuchen in kleinen Glaslysometern, die im Vorfeld der Großlysimeter-Messungen und begleitend dazu der phänomenologischen Erkundung des Fließgeschehens von Wasser und Farblösungen in Sanden gedient haben. Die daraus hergeleiteten Folgerungen sind von Bedeutung für die Anlage der in Kapitel 4 dargestellten 1 m³-Lysimeter-Messversuche und für deren Interpretation.

Die hier behandelten Vor- und Begleitversuche gehen auf ein von SIEBNER (1997) durchgeführtes Experiment mit Sand in seiner natürlichen Korngrößenzusammensetzung zurück. Abweichend hiervon wird aber im folgenden im Wesentlichen nur von Untersuchungen an den beiden durch Siebtrennung aus Siebners Sand gewonnenen Korngrößenfraktionen 630 – 355 µm Ø und < 355 µm Ø berichtet, d.h. den beiden Fraktionen, die auch später in dem großen Lysimeter verwendet wurden. Darüber hinaus werden Wechsellagerungen mit definierten gröberen Sanden und Kiesen betrachtet.

Bei den im folgenden beschriebenen Versuchen ging es um die Fragen:

1. Art der Wasserbewegung in Abhängigkeit von der Korngröße
2. Abhängigkeit der Wasserbewegung von der Lagerungsstruktur des Füllmaterials, d.h. der Ausrichtung der Schichtung und Mächtigkeit einzelner Sandschichten
3. Verhalten und Anwendbarkeit des Farbtracers Amaranth (C₂₀H₁₁N₂Na₃O₁₀S₃)
4. Tauglichkeit der Beregnungs-Tagesrate von 10 mm

In Tabelle 3.1 werden die dazu durchgeführten Versuche aufgelistet.

Tab. 3.1: Übersicht über die durchgeführten orientierenden Versuche (Der Index a – e zeigt gleiche Versuchsanordnungen an unterschiedlichen Sandmaterialien; * weist auf Sonderversuche bzw. solche mit modifiziertem Versuchsaufbau hin)

Versuch Nr.	Index	Lysimeter	Füllmaterial Korngröße (µm)	Sandschichtung bzw. Lagerung	Beregnung (mm/d)
1	a	B	< 355	horizontal	10
2	a	A	630 - 355	horizontal	10
3	*a	A	630 - 355	horizontal	10
4	b	C	< 355	vertikal	10
5	b	C	630 - 355	vertikal	10
6		A	630 - 355	alternierende Schrägschichtung (± 28°)	10
7	c	C	< 355	horizontal	halbseitig 10
8	c	C	630 - 355	horizontal	halbseitig 10
9	c	C	630 - 355	horizontal	halbseitig 10
10	*c	D	630 - 355	horizontal	halbseitig 10
11	d	C	< 355	je eine Seite horizontal und vertikal	horizontaler Bereich 10
12	d	C	630 - 355	je eine Seite horizontal und vertikal	horizontaler Bereich 10
13	e	C	< 355	je eine Seite horizontal und vertikal	vertikaler Bereich 10
14	e	C	630 - 355	je eine Seite horizontal und vertikal	vertikaler Bereich 10
15	f	D	Matrix < 355 Zwischenlagen 630 - 355	horizontal	10
16	f	D	Matrix 630 - 355 Zwischenlagen < 355	horizontal	10
17	a	A	1000 - 630	horizontal	10
18	(a)	D	linke Hälfte 2000 - 1000 rechte Hälfte 4000 - 2000	horizontal	10

3.2 Gerät und Material

Die unterschiedliche Zielsetzung der orientierenden Versuche erforderte Versuchsgefäße mit verschiedenen Eigenschaften. Insgesamt wurden vier Lysimeter Typen eingesetzt. Für die Versuche mit *horizontal* geschichtetem Sand dienten die Lysimeter A und B. Für die Mehrzahl der durchgeführten orientierenden Versuche genügten einfache, unten offene Glaslysimeter, deren Sickerwasser in Auffanggefäßen gesammelt wurde.

Die Schaffung gleichmäßiger *vertikaler* Schichtungsstrukturen ließ sich in den Lysimetern A und B nicht verwirklichen. Es musste ein Gefäß verwendet werden, das nach dem „normalen“ Befüllungsvorgang mit resultierender gleichmäßiger, horizontaler Schichtstruktur um 90° gedreht werden konnte. Bei Lysimeter C handelte es sich um solch ein Lysimeter. Seine Seitenteile waren im Gegensatz zu allen anderen Lysimetern nicht miteinander verklebt, sondern verschraubt. Dies ermöglichte nach dem Befüllungsvorgang eine Drehung des Lysimeters um 90° und somit die Untersuchung des Wasserflusses in Sanden mit vertikal ausgerichteter Schichtung.

Bei Lysimeter D handelte es sich um eine kleinere Version der Lysimeter A und B. Seine Höhe von 50 cm reichte für einfache Wasserfluss-Versuche in Grobsand sowie in wechsellagernden Sanden unterschiedlicher Korngrößen völlig aus.

Abb. 3.1: Lysimeter A und B (Seitenansichten)

Lysimeter A:	Form:	Quader (oben und unten offen)
	Grundfläche:	291 mm • 103 mm
	Höhe:	982 mm
	Füllhöhe:	3 cm Kies, darüber 92 cm Sand
	Sandinhalt:	≈ 29 l
	Seitenwände:	Glas 12 mm; Seiten sind miteinander verklebt

Lysimeter B:	Form:	Quader (oben und unten offen)
	Grundfläche:	300 mm • 105 mm
	Höhe:	1010 mm
	Füllhöhe:	4 cm Kies, darüber 95 cm Sand
	Sandinhalt:	≈ 32 l
	Seitenwände:	Glas 12 mm; Seiten sind miteinander verklebt

Unterbau: Die mit Sand gefüllten Lysimeter A und B standen in Kunststoffwannen in einem Kiesbett (Mächtigkeit ca. 3 bis 5 cm). Die Kunststoffwannen hatten als Unterlage einen Spanplatten-Sockel.

Abfluss: Das versickernde Wasser lief an der Basis des Sandkörpers ungestört in das Kiesbett und sammelte sich dort. Es wurde in 12- bzw. 24 h-Intervallen über einen Ablaufstutzen abgelassen, in einem Auffangbehälter aufgefangen und die Abflussrate (gegebenenfalls auch die Amaranth-Konzentration) der Abflusslösung bestimmt (Beschreibung der Wasser- und Tracerbestimmung folgt in Kapitel 4.2.4).

Verdunstungsschutz: Zur Verringerung der Verdunstung waren die Lysimeter sowie die seitlich hervorragende Oberfläche des Kiesbettes mit Kunststoffplanen zugedeckt.

Abb. 3.2: Lysimeter C (Seitenansichten); links: bei Befüllung, Mitte und rechts: während der Beregnung

Lysimeter C:	Form:	Quader (oben offen)
	Grundfläche:	300 mm • 100 mm bzw. 400 mm • 100 mm
	Höhe:	300 bzw. 400 mm
	Füllhöhe:	ca. 300 – 400 mm
	Sandinhalt:	<p>≈ 12 l</p> <p>zwischen dem Abflusstutzen und dem Sandkörper befand sich eine 2 cm mächtige Lage Kies, welche ein Auslaufen des Sandes verhindern sollte. Diese Kiesslage wurde während des Befüllungsvorgangs durch eine Hartfaserplatte vom Sand abgetrennt in das Gefäß gefüllt.</p>
	Seitenwände:	12 mm Plexiglas; die Seiten waren miteinander verschraubt; die Abdichtung des Gefäßes erfolgte nach der Befüllung des Lysimeters von außen mit Silikon-dichtmittel. Zur Stabilisierung des Gefäßes konnten an den Rändern Aluminium-Profilleisten mit den Plexiglasplatten verschraubt werden.
	Unterbau:	Im Gegensatz zu den Lysimetern A und B waren die Lysimeter C und D nach unten hin durch eine Bodenplatte verschlossen, und sie standen ebenfalls auf einem Sockel aus Spanplatten, um das Auffangen austretenden Wassers zu erleichtern.
	Abfluss:	Der Wasserabfluss erfolgte über einen ständig offenen Abflusstutzen. Das ausgetretene Wasser wurde jeweils 12 oder 24 h lang in einem Auffangbehälter gesammelt und danach der Analytik zugeführt.
	Verdunstungsschutz:	wie bei den Lysimetern A und B

Lysimeter D:	Form:	Quader (oben offen)
	Grundfläche:	300 • 100 mm
	Höhe:	500 mm
	Füllhöhe:	ca. 480 mm; 460 mm Sand über einer Kiesschicht

Abb. 3.3: Lysimeter D (Seitenansichten)

Sandinhalt:	≈ 15 l
Seitenwände:	2,5 mm Glas
Bodenplatte:	10 mm PVC
Unterbau:	wie bei Lysimeter C
Abfluss:	wie bei Lysimeter C

Verdunstungsschutz: wie bei den Lysimetern A und B

3.3 Befüllung der Lysimeter

Lysimeter A, B und D: Das *lufttrockene* Füllmaterial wurde gleichmäßig raten- und schichtweise in die Gefäße gefüllt. Dazu wurden für alle Versuche - mit Ausnahme der Versuche 17 und 18 - nur geringe Mengen Sand über ein dicht über der Sandoberfläche befindliches Sieb geschüttet. Dabei entstanden dünne horizontal übereinander lagernde Sandschichten mit Mächtigkeiten von bis zu 2 mm. Die anfängliche Verwendung eines Siebes beim Befüllungsvorgang des Lysimeters mit Grobsand oder Kies in den Versuchen 17 und 18 führte nicht zu der erhofften Bildung gleichmäßig texturierter und strukturierter Sedimentlagen. Deshalb wurde im Weiteren auf die Benutzung eines Siebes verzichtet. Das Füllmaterial wurde in diesen beiden Fällen einfach in das Lysimeter geschüttet, wobei dennoch auf eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Füllmaterials geachtet wurde. Mit und ohne Sieb entstanden beim Befüllen visuell erkennbare dünne Lagen mit annähernd horizontaler Ausrichtung.

Lysimeter C: Auch hier wurde der Sand gleichmäßig schichtweise in die Gefäße gefüllt. Dazu wurden auch hier fortgesetzt geringe Mengen Sand auf ein kurz über der Sandoberfläche befindliches Sieb geschüttet. Um den Sandkörper von der Kiesschicht abzutrennen, welche den Sand während des Beregnungs-Versuches am Auslaufen hindern sollte, wurden Hartfaserplatten verwendet, die nach dem Befüllungsvorgang wieder entnommen wurden. Solche Hartfaserplatten wurden auch eingesetzt, um während des Befüllungsvorganges Sandpakete unterschiedlicher Schichtausrichtung voneinander zu trennen.

3.4 Beregnung

Die Beregnung der Lysimeter mit H₂O demin. bzw. einer wässrigen Amaranthlösung (0,25 g/l) erfolgte zweimal täglich durch Aufpipettieren von 5 mm-Raten im Abstand von jeweils 12 Stunden bzw. einmal täglich durch das Aufbringen einer 10 mm-Rate. Bei einer zu beregnenden Fläche von etwa 300 cm² waren das täglich 300 ml Flüssigkeit. Die Gleichmäßigkeit der Wasserverteilung wurde dadurch erzielt, dass mit der Pipette manuell Tropfen an Tropfen gesetzt wurde.

3.5 Visuelle Auswertung

Die verwendeten Aufnahmegeräte sowie die Aufbereitung der Aufnahmen werden in Kapitel 4.2.6 beschrieben.

Während aller Versuche wurden die Frontseiten - z.T. auch alle vier Seiten der Lysimeter - in 24 h-Intervallen fotografiert. Aus den Fotografien wurden nach einer Bearbeitung am PC Fließmusterbilder erstellt. An dieser Stelle sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die dargestellten Bilder immer nur das Fließgeschehen an einer der Lysimeterwände wiedergeben. Die Bilder sind nicht auf das ganze Lysimeter zu übertragen, d.h. auf den gegenüberliegenden Seiten traten niemals exakt spiegelbildliche Fließmuster auf. Die Fließmuster auf den gegenüberliegenden Seiten waren aber denen der dargestellten Seiten zumeist sehr ähnlich, d.h. Muster die sich auf der einen Seite des

Lysimeters ausbildeten, zeigten sich meist auch auf der gegenüberliegenden Seite, nur dass sie dort räumlich leicht verschoben oder etwas anders dimensioniert waren. Eine gewundene, schlauchförmige räumliche Verbindung der an den beiden Lysimeterwänden zu beobachtenden Befeuchtungsstrukturen ist in solchen Fällen also mehr als wahrscheinlich, in einigen Fällen war sie bei Betrachtung aller vier Lysimeterseiten sogar direkt zu verfolgen.

3.6 Versuche

Im Folgenden werden die orientierenden Versuche und ihre Ergebnisse beschrieben. Dies geschieht vorwiegend durch die Darstellung des Wassertransportes in Form von Fließmusterbildern bzw. Fließmusterskizzen. Um eine deutliche Darstellung zu ermöglichen, wurden die täglich aufgenommenen Fotos der Lysimeterseiten in Skizzen umgewandelt. Bestimmungen der Wasser- und Tracermengen und gegebenenfalls Konzentrationen wurden nicht in allen Versuchen durchgeführt. Soweit sie vorhanden sind, werden Ergebnisse aufgeführt. Die Versuche sollten hauptsächlich zur visuellen Orientierung nicht aber zur genauen Erfassung der Transportwege und der Transportweise dienen. Aus diesem Grund wurde auch auf eine Erfassung der Verdunstung verzichtet, wodurch die im Folgenden beschriebenen Wassereinhalte der Sandsäulen größer erscheinen als sie tatsächlich waren, da der verdunstungsbedingte Wasserverlust dem Lysimeterinhalt zugeschlagen wurde.

3.6.1 Versuch 1: Infiltration in horizontal geschichtetem Sand, Korngröße < 355 μm

Versuch 1 betrachtet das Fließverhalten des Wassers in dem feinen Sandmaterial. Dazu wurde Lysimeter B, wie in 3.3 beschrieben, mit trockenem Sand < 355 μm + U + T befüllt und mit amaranthgefärbtem Wasser beregnet. Der Versuch lief über 70 Tage. Am Tag 65 wurde die Beregnung beendet. Das letzte Abflussereignis fand an Tag 70 statt. Die tägliche Beregnungsrate wurde dem Lysimeter in zwei Teilbeträgen zu je 5 mm mit einer Pipette zugeführt.

3.6.1.1 Abfluss

Die halbtäglichen Abflussraten waren, wie Abb. 3.4 zu entnehmen ist, durch starke Schwankungen gekennzeichnet, d.h., es müssen immer wieder kleine Wasservorräte angelegt worden sein, die sich – etwa wie in einem mit Hebevorrichtung ausgestatteten Durchfluss-System (z.B. Soxhlet-Apparatur – schubweise entleerten.

Abb. 3.4: Zeitgang der Beregnungs- und Abflussraten im Versuch 1

Abb. 3.5: Versuch 1: Wasserinhalt des Lysimeters im Zeitablauf

3.6.1.2 Wasserspeicherung

Der erste Abfluss erfolgte am 16. Tag der Beregnung als in der Sandsäule des Lysimeters 4,78 l Wasser gespeichert waren. Danach begann mit dem 20. Tag eine Phase, die man – allerdings nur mit Einschränkung – als Quasi-Fließgleichgewichtsphase bezeichnen könnte, mit Tagesschwankungen des Wasservorrates, die den oben genannten Abfluss-Raten entsprachen. Jedoch stieg in dieser Zeit der „dynamische“ Wasservorrat noch auf 5,77 l an. Nach Beendigung der Beregnung am Tag 66 und dem Ende des Abfließens am Tag 71 stellte sich als „statischer“ Wassergehalt ein Betrag von 4,88 l ein. Setzt man für die Sandfüllung des Lysimeters eine maximale (Sättigungs-) Wasserkapazität $WK_{\max}$ von 10 – 11 l an, ist im Ablauf des Versuches höchstens eine Sättigung von 60 % erreicht worden, im statischen Zustand nur 50 %.

3.6.1.3 Visuelle Befunde

Die Beregnung erfolgte zur besseren Sichtbarmachung der Fließwege mit einer wässrigen Amaranthlösung (0,25 g/l). Folgende Bereiche ließen sich an der Sichtfläche des Lysimeters unterscheiden:

- a. hell: nicht bzw. nur schwach befeuchteter Sand
- b. mittelhell: an der Wasserinfiltration und dem Wasserfluss teilnehmende Zonen
- c. dunkel (rötlich): bevorzugte Fließbereiche

Das Eindringen des Wassers in den trockenen Sand eilte infolge sorptiv-filtrativer Retention der Farbstoffmoleküle der Farbstoff-Verlagerung voraus. In dieser ersten Phase vollzog sich das Vordringen des Wassers, Zone b in Zone a, ohne sichtbare vertikale Fließfinger frontal auf breiter Basis – scheinbar als „piston flow“. In Wirklichkeit war dieses Vordringen durch die Anlage einer großen Zahl dünner horizontaler Wasserlamellen gekennzeichnet. Sie folgten der beim Einfüllen entstandenen Feinschichtung des Sandes. Der Befund, dass die Befeuchtungsfront mit einer so scharfen unteren Begrenzung vorrückte, ist dem Umstand zuzuschreiben, dass sich das eindringende Wasser auf diesen horizontalen Lamellen seitlich ausbreitete. Wie das Weiterfließen in vertikaler Richtung erfolgte, kann zunächst auf visueller Basis nicht beantwortet werden.

Die nachfolgende Infiltration des mit Amaranth angefärbten Wassers bewies, dass ein solcher lateraler Lamellenfluss stattfand. Die gefärbte Lösung drang in einem breiten Keil präferentiellen Fließens in den Sand ein und „zerfaserte“ in einer Vielzahl lateraler Protuberanzen zu einem „tannenbaumähnlichen“ Gebilde. Hierbei folgte das Eindringen der Farbstoff-Lösung den vorher gebildeten horizontalen Wasserlamellen. Das Hineinwandern des Farbstoffes in die Lamellen war – wie später Versuch 10 zeigt – nicht durch Diffusion, sondern durch Konvektion, also Durchfluss, verursacht worden. Es müssen also neben den Lamellen noch eine Vielzahl von vertikalen Anastomosen (Fließverbindungen) bestanden haben oder beim Eindringen des Wassers aufgebaut worden sein, die das Wasser gewissermaßen „kaskadenförmig“ von der einen Lamelle in die nächst darunter liegende oder liegenden Lamellen abgeleitet haben.

Weitere Beobachtungen zu dieser Frage sollte Versuch 2 liefern, der in ähnlicher Weise wie Versuch 1 durchgeführt wurde, jedoch mit der gröberen Sandfraktion 630 - 355 µm.

Abb. 3.6: Versuch 1: Fließmuster nach x mm Wasseraufbringung (10 mm = 1 d); a,b,c s. Text

3.6.2 Versuch 2: Infiltration in horizontal geschichtetem Sand, Korngröße 630 - 355 μm

3.6.2.1 Zeitlicher Ablauf des Fließgeschehens

Phase 1: Am 10. Tag nach Beginn der Beregnung mit 10 ml wässriger Amaranthlösung je Tag begann der Austritt von Wasser an der Basis des Lysimeters.

Phase 2: Etwa von Tag 14 an bis zum Ende der Beregnung am Versuchstag 65 schwankten wie in Versuch 1 die Abflussraten um einen Mittelwert, der jedoch bei dem gröberen Sand deutlich unterhalb der Beregnungs-Tagesrate lag. Es muss also in dieser Zeit eine noch beträchtlichere Aufstockung des Wasservorrates in der Sandfüllung abgelaufen sein. Die Schwankungen der Abflüsse zeigten die Schwankungen dieses Speichervorganges an.

Phase 3: Von Tag 65, dem Ende der Beregnung, bis zum Tag 71, dem Ende des Abfließens wurden sechs Tage bis zum Erreichen des statischen Zustandes benötigt.

Abb. 3.7: Versuch 2: Zeitgang der Beregnungs- und Abflussraten (Ausgangszustand: trockener Sand)

3.6.2.2 Zeitlicher Ablauf der Wasserspeicherung

Abb. 3.8: Versuch 2, Abschnitt 1: Wasserinhalt des Lysimeters im Zeitablauf

Phase 1: Am Ende dieser Phase, beim Beginn des Wasser-Austrittes am Abflusstutzen hatte die Sandsäule 3,15 l Wasser gespeichert.

Phase 2: Die Sandsäule baute unter täglichen Schwankungen linear einen dynamischen Wasservorrat auf, der sich gegenüber dem Ausgangszustand um 1,23 l auf 4,38 l erhöhte. Ein Ende der Zunahme der dynamischen Speicherung wie in Versuch 1 wurde jedoch nicht erreicht.

Phase 3: Nach Ende der Beregnung sank der Wasserinhalt der Säule durch freien Abfluss auf den statischen Vorrat von 3,54 l ab, der erwartungsgemäß etwas über dem Ausgangswert am Ende der Phase 1 lag.

Im Zustand der noch nicht vollständig ausgeschöpften „dynamischen“ Wasserspeicherung waren nur 40 %, im Zustand der „statischen“ Speicherung nur etwa 35 % des Porenraumes mit Wasser gefüllt. Entsprechend gering war die Beteiligung des Porenraumes an der Wasserleitung. Das heißt wiederum, dass der mit Luft gefüllt gebliebene Porenraum etwas eingengt wurde und sich dann wieder ausdehnte, wobei möglicherweise geringe Überdrücke entstanden, die dann wieder abklangen.

Da die zum Vergleich verwendeten Lysimeter unterschiedliche Formate hatten, gibt Tabelle 3.2 die Speicherdaten mit Bezug auf die Volumeneinheit (100%) an.

Tab. 3.2: Wasserspeicherung in % des Sandgesamtvolumens

Sand	< 355 μm	355 – 630 μm
Speicherung (dynamisch) beim Einsetzen des Abflusses	16,3	9,2
Speicherung (dynamisch) bei Ende der Beregnung	19,6	13,8
Speicherung (statisch) nach Ende des gravitativen Abflusses	16,6	11,1

Bei all diesen Daten ist noch einmal der Hinweis angebracht, dass es sich um aus Differenzen zwischen Beregnungs- und Abflussraten berechnete Werte handelt, bei denen die Verdunstung, mit der trotz Vorbeuge zu rechnen ist, nicht berücksichtigt werden konnte. Es handelt sich um rechnerische Maximalwerte!

3.6.2.3 Visuelle Befunde

Auch bei dem hier verwendeten gröberen Sand wurde der Farbstoff zunächst nahe der Oberfläche sorptiv-filtrativ zurückgehalten. Das farbstoffarme Wasser infiltrierte schnell in zwei breiten vertikalen Zonen (b) rechts und links bis zum Lysimeterboden hinunter und sparte zunächst dazwischen eine nicht benetzte Zone (a) aus, die erst zwischen 200 und 250 mm von seitlich infiltrierendem Wasser geschlossen wurde. Schon nach fünf Tagen (das entspricht 50 mm Beregnungshöhe) folgte der Farbstoff und zeichnete die beiden Zonen, in denen rechts und links der Transport des Wassers hauptsächlich erfolgte, nach.

Dabei gab sich, wie in Versuch 1 zu erkennen, dass die Farbstofflösung seitlich in die vom farbstofffreien Wasser bei der Infiltration in den trockenen Sand vorgebildeten horizontalen Wasser-Lamellen hineinströmte. Diese waren hier als Folge der gröberen Körnung des Sandes sowohl dicker, als auch mit größerem vertikalem Abstand angelegt. Auch hier war wieder die Anlehnung dieser Lamellen an die Feinschichtung des Sandes zu beobachten, wie sie beim Befüllen des Lysimeters entstanden war.

Der laterale Fluss der Farbstofflösung in den vorgebildeten Wasserlamellen ist gut auf den Fließbildern 150 (s. Pfeil) bis 350 mm zu erkennen. Aus der rechten bevorzugten Abflussbahn heraus „wuchs“ hier eine dickere dunkle (rote) Lamelle nach links heraus.

Von 350 mm an breitete sich die von Amaranth gefärbte Fläche in den oberen zwei Dritteln des Gefäßes kaum noch weiter aus. Die präferentiellen vertikalen Abflussbahnen, die nur in einem Teil des Porensystems des Sandes angelegt waren, waren offenbar festgelegt. Die vom Fluss ausgesparten Bereiche waren entweder noch mit Luft gefüllt oder mit statischem Wasser, das zwar bei

der Infiltration des trockenen Sandes eingedrungen, aber vom späteren Durchfließen abgeriegelt worden war. In diese Bereiche konnte Amaranth nur noch durch Diffusion eindringen, die aber wegen ihrer geringen Rate innerhalb der kurzen Beobachtungszeit nicht sichtbar werden konnte.

Abb. 3.9: Im Verlauf des Versuches 2, im ersten Versuchsabschnitt entstandene Fließmuster (10 mm = 1 d)

Im Vergleich mit der feineren Sandfraktion $< 355 \mu\text{m}$ bildeten sich bei der gröberen Sandfraktion neben einer horizontal weniger geschlossenen Wasserlamellierung, die gröber strukturiert war, starke präferentielle Fließkeilzonen heraus.

Der oben dargestellte Aufbau eines „dynamischen“ Wasservorrates während des Fließvorganges scheint, nach den Fließbildern zu urteilen, darin bestanden zu haben, dass sich an der Grenze zwischen der Sandfüllung des Lysimeters und dem Kiesbett eine Front tragender Menisken gebildet hatte, über der sich Wasser staut. Es scheint, dass der Aufstau noch nicht die Höhe erreicht hatte, die erforderlich gewesen wäre, um die Abflussrate gleich der Zufuhr rate an Wasser werden zu lassen.

3.6.2.4 Fortsetzung des Versuches nach Farbstoffauswaschung

Nach Ende des vorstehenden Versuches wurde aus dem Lysimeter mittels Durchspülung mit 300 l Wasser innerhalb von 15 Tagen und anschließendem Ablaufenlassen bis zu einem neuen statischen Speicherzustand das Amaranth ausgewaschen. Danach erfolgte wieder eine Beregnung mit durch Amaranth gefärbtem Wasser in Höhe von $2 \cdot 5 = 10 \text{ mm/d}$. Danach wurde wieder bis zum Ende des Abfließens fünf Tage gewartet.

Abb. 3.10: Versuch 2: Zeitgang der Beregnungs- und Abflussraten (Ausgangszustand: feuchter Sand)

Abb. 3.10 zeigt: Der Abfluss setzte hier bereits am dritten Tag und nicht erst am elften Tag ein, weil hier bereits ein statischer Wasservorrat vorlag, der nicht erst aufzubauen war. Das Verhalten der täglichen Abflussraten glich weitgehend dem im ersten Teil des Versuches.

Der statische Ausgangs-Wasservorrat des Sandkörpers ist nicht bekannt und muss aus dem statischen Wassergehalt nach dem finalen Abfluss zurück berechnet werden. Er betrug 2,5 bis 3 l, stieg bis zum Beginn des Wasseraustritts um 0,6 l und dann bis zum Ende der Beregnung um weitere 0,8 l auf ca. 4,4 l dynamischen Wasservorrat an, um nach Ende des Abfließens wieder auf 3,5 l abzusinken – beides Zahlen, wie sie auch für den vorausgegangenen Versuch mit der Befeuchtung des trockenen Sandes gelten.

Man hätte erwarten können, dass die zwischenzeitliche Passage von 300 l Wasser in Tagesgaben von 3 – 4 Litern (ca. 670 mm/d) die Wasserleitstrukturen im Sand stark verändern würde. Das galt zwar für die oberen 10 – 20 cm der Sandsäule, was sich aber wegen der geringen Akkumulation des Farbstoffes in diesem Tiefenabschnitt in den Fließmuster-Bildern nicht demonstrieren lässt, aber bei Nahbetrachtung klar zu erkennen war. Bis zur Tiefe von 10 cm waren bei der Lysimeterbefüllung entstandene Schichtungen des Sandes total, und bis 20 cm Tiefe weitgehend zerstört worden. Auffällig waren hier zwei neu entstandene horizontale Amaranthstreifen, welche möglicherweise Strukturen nachzeichneten, die beim Durchspülen entstanden waren (Abb. 3.12).

Unterhalb der Tiefe von 20 cm war so gut wie keine Veränderung der alten Fließwege mehr zu beobachten.

Abb. 3.11: Versuch 2, Abschnitt 2: Wasserinhalt des Lysimeters im Zeitablauf

Abb. 3.12 Versuch 2, Abschnitt 2: Fließmuster (10 mm = 1 d)

3.6.2.5 Interpretation der Versuche 1 und 2

Das Fazit aus den Versuchen 1 und 2 ist Folgendes: Beim Eindringen von Wasser in trockenen Sand werden – unterschiedlich in Abhängigkeit von der Körnung des Sandes – Infiltrationsstrukturen des Wassers herausgebildet, die aus Lamellen auf horizontalen Schichtstrukturen des Sandes und vertikalen Zungen oder Keilen mit stark bevorzugtem Fließen bestehen, die aber auch eine vorausgegangene lamelläre Präformation überdecken.

Die gebildeten horizontalen Lamellen entstehen einmalig beim Vorgang der Wasserinfiltration. Ein Teil von ihnen wird später nicht mehr durchflossen. Er nimmt bestenfalls noch an einem langsamen

diffusiven Stoffaustausch mit dem durchflossenen Leitsystem teil. Andere Lamellen leiten Wasser und seine Inhaltsstoffe horizontal und geben das Wasser durch vertikale Anastomosen kaskadenförmig an die darunter liegenden Lamellen weiter oder verlängern sich seitlich bis sie einen neuen ableitenden „Docht“ finden.

Lässt man den Sand nicht austrocknen, so erhält der statische Wassergehalt das geschaffene Fließsystem. Offenbar ist dies auch noch der Fall, wenn der Wassergehalt durch Verdunstung auf 66 % des statischen Wassergehaltes erniedrigt wird. Es ist aber zu erwarten, dass nach einer völligen Austrocknung des Sandes bei erneuter Infiltration von Wasser auch gänzlich neue Fließstrukturen entstehen können.

3.6.3 Modell A: Vorstellung zur Struktur der Wasserlamellen

Abb. 3.13: Modell A

Nach den Beobachtungen der Versuche 1 und 2 lässt sich die in Abb. 3.13 skizzierte Modellvorstellung über die strukturelle Anordnung und Funktion der Wasser-Lamellen in Sandböden entwerfen. Als primäre Ursache ist die, in unserem Fall bei der schichtweisen Befüllung des Lysimeters mit trockenem Sand entstehende, Bildung dünner Sedimentlagen anzusehen. Innerhalb solch einer Sedimentlage kann es zu einer Entmischung der sedimentierenden Korngrößen kommen und zwar in der Weise, dass unten die größeren Körner abgesetzt werden und der Feinheitsgrad nach oben hin zunimmt. Auch ohne diese Entmischung ist an der Oberfläche einer solchen Sandlage mit einer pflasterartigen Einordnung der Körner zu rechnen, zwischen denen sich feinere Poren ausbilden.

Diese unter der Obergrenze liegende *Saumzone* der Sedimentlage entfaltet deswegen einen kapillaren Sog, weswegen sie hier im hydraulischen Sinne auch als *Dochtzone* (D) bezeichnet werden soll. Sie kann sich entweder aus einer vertikal durchwandernden Wasserzunge her voll saugen oder – wenn Wasser durch die Sedimentlagen sickert – dieses Wasser kapillar binden.

An ihrer Unterseite bilden sich tragende Menisken aus, welche die gröberkörnige *Kernzone* nach oben „versiegeln“. Die Dochtzone wirkt dann als ein für Luft undurchlässiger Verschluss, der aber von Wasser passiert werden kann, wenn der hydrostatische Druck in der sich darüber folgenden nächsten Sedimentlage aufbauenden *Einstauzone* (E) groß genug wird.

Die Kernzone der Sedimentlage ist hier hydrologisch als „*Ablaufzone*“ bezeichnet. Sie enthält, nachdem vorübergehend ein- oder durchgetretenes Wasser abgelaufen ist, nur Wasserreste, die in Form verstreuter Kornberührungs-Menisken statisch gebunden sind. Der übrige Porenraum ist mit Luft erfüllt, die in ihrem eingeschlossenen Zustand (confined air) Atmosphärendruck aufweist, oder – je nach hydrodynamischer Situation – unter höherem Druck steht.

An der Basis der Sedimentlage, die hier als *Basiszone* bezeichnet ist, kann sich durch vertikale oder horizontale Einspeisung über der Dochtzone der darunter folgenden Sedimentlage innerhalb der Grobkornlage eine Einstauzone (E) für ungespanntes Wasser ausbilden, das von der Dochtzone getragen wird. Die Dicke dieser Stauzone kann während des hydrodynamischen Geschehens im Sandkörper zunehmen. Dies führt dazu, dass irgendwann ein Zeitpunkt erreicht wird, an dem der hydrostatische Druck an irgendeiner Stelle groß genug wird, um die Spannung der tragenden Menisken zu überwinden.

Es kommt dann zu dem, was in Abb. 3.13 als vertikaler „Durchbruch“ bezeichnet ist. Dieses wird makroskopisch erkennbar, wenn man einen Wasserpuls durch eine wasserlamellierte Sandsäule schickt, die vorher durch freien Wasser-Ablauf auf ihren statischen Wasservorrat eingestellt war. Der Verlauf der perkolierenden Welle wird dadurch sichtbar, dass die Lamellen vorübergehend deutlich anschwellen und dann wieder abschwellen.

Nach Abb. 3.13 bestehen die Wasserlamellen also aus dem Verbund von Dochtzone D und Einstauzone E, wobei die Dochtzone beim Austrocknen des Sandes wegen ihrer Kapillarspannung länger erhalten bleibt und bei der nächsten Befeuchtung des Sandes die Fließstrukturen wieder vorgibt.

Die Stärke der *Zwischenlamellen* und die Frage nach ihrem Wassergehalt ist nur unter Betrachtung der Körnung, ihrer sedimentären Entmischung oder der Orientierung und der Mächtigkeit der Sedimentlagen zu betrachten.

Werden die Einstauzonen von einer – in der Abb. 3.13 von einer beispielsweise rechts gedachten breiteren Zunge her – seitlichen Quelle mit kapillar ungespanntem Druckwasser gespeist, so können sie unter Anschwellen selbst bei sehr geringem Gefälle das Wasser über große Strecken hinweg lateral transportieren. Sie gehören damit dann ebenfalls zu dem System der präferentiellen Fließbahnen.

3.6.4 Versuch 3: Transport des Tracers Amaranth

3.6.4.1 Zeitlicher Ablauf

In einer Wiederholung der Versuches 2 (3.6.2) mit dem grobem Mittelsand wurde in Versuch 3 das Verhalten des Tracers Amaranth untersucht, der in den Versuchen 2 (und später 4) einen von der Bewegung des Wassers abweichenden anscheinend dispersiven Transport erkennen ließ.

Tracer:	Amaranth
Konzentration in der Beregnungslösung:	250 mg/l Wasser
Ausbringungszeit und -dauer:	16. bis 36. Beregnungstag = 21 Tage
Ausbringungs-Gesamtmenge:	1575 mg
Ausfluss-Gesamtmenge:	1200 mg
Verbleib-Gesamtmenge:	375 mg (24 %)
Fotometrische Konzentrationsbestimmung:	bei 521 nm

Tag 1 bis 15: 15 Tage 2 • täglich 5 mm = 10 mm Aqua demin.; Abflussbeginn: Tag 12
 Tag 16 bis 36: 21 Tage 2 • täglich 5 mm = 10 mm Amaranthlösung
 Tag 37 bis 55: 19 Tage Regenpause zur diffusiven Verteilung des Amaranths in der Säule
 Tag 56 bis 179: 124 Tage 1 • 10 mm = 10 mm Aqua demin. Zur Amaranthauswaschung
 Tag 180 bis 181: 2 Tage 0 mm; kein Abfluss
 Tag 182 bis 186: 5 Tage; Abfluss
 Ende

Die Vorberegnung mit demineralisiertem Wasser diente dem Aufbau des Wasser-Vorratssystems mit seinen Leitbahnen und „Sackgassen“, die später nicht mehr durchspült wurden. In sie sollte kein Amaranth gelangen. Die 19-tägige Regenpause diente dazu, das Amaranth aus den Leitbahnen in die unmittelbar benachbarten „ruhenden“ oder nur schwach „bewegten“ Wasserkompartimente diffusiv zu verteilen.

Abb. 3.14 stellt den Zeitgang der Regen- und Abfluss-Tagesraten dar. Die Tagesraten des Abflusses lagen nach Tag 56 wieder unter den Regenraten, was den Aufbau eines zusätzlichen Wasservorrates und/oder die nicht gemessenen Verdunstungsraten anzeigte.

Abb. 3.14: Versuch 3: Zeitgang der Beregnungs- und Abflussraten

Wie in den vorausgegangenen Versuchen kam es auch hier wieder zu Beginn der Beregnungspausen zu plötzlichen Abfluss-Schüben mit extremen Tagesraten. Als Erklärung bietet sich an, Druckentlastungen im Lysimeter bei sinkendem Wasserinhalt anzunehmen, wodurch Abflussblockaden in Form von Luftbarrieren oder tragenden Menisken aufgehoben worden wären.

3.6.4.2 Wasserspeicherung

Die Entwicklung des Wasserinhalts des Lysimeters (statisch-dynamisch-statisch) glich annähernd der des Versuches 2. Hervorzuheben ist jedoch, dass trotz der gegenüber Versuch 2 wesentlich längeren Beregnungsdauer (124 Tage) der dynamische Wasserinhalt nicht über 4,5 Liter stieg. Das heißt, dass auch in Versuch 2 der maximale Vorratswert erreicht worden sein musste, d.h. dass dort die Kurve der Vorratszunahme am Ende der Beregnung horizontal abknicken muss. Die Abweichung der Tagesraten des Abflusses von denen der Regengaben muss also spätestens von diesem Zeitpunkt an der Verdunstung zugeschrieben werden.

3.6.4.3 Amaranth-Transport

Die Amaranthlösung wurde hier sozusagen als Tracerpuls in das eingestellte Fließgeschehen des Wassers eingefügt. Der erste Austritt von Amaranth erfolgte wie beim Wasser am elften Tag nach der Aufbringung. Die Tagesraten der aufgetragenen und ausgetragenen Mengen des Tracers sind in Abb. 3.15 dargestellt. Sie schwankten entsprechend den Abflussraten der Flüssigkeit. So trat am Tag 64 bei einem Spitzenwert von 440,32 ml/d eine maximale Austragsrate von 57,25 mg/d des Amaranths auf.

Demgegenüber zeigt der Verlauf der Amaranthkonzentrationen in der täglichen Ablauflösung in Abb. 3.16 einen gleichmäßigeren Verlauf mit dem für dispersiven Transport typischen Erscheinungsbild: Nach einem recht steilen Ansteigen während der Aufbringungs- und ersten Ablaufphase, bei dem die Konzentration in der Spitze etwa 72 % der vorgegebenen Konzentration erreichte, folgte eine sich über 120 Tage hinziehende Austragsschleppe.

Abb. 3.15: Versuch 3: Ein- und Austragsraten des Farbstoffes Amaranth

Die Tatsache, dass 24 % der aufgetragenen Amaranthmenge im Sand verblieben und dass der Austragspeak der Konzentration ca. 28 % unter der ursprünglichen Konzentration des Regenwassers lag, ist wahrscheinlich wie folgt zu erklären: Zu Beginn der Verregnung von Amaranth hatte das bis dahin verregnete Wasser noch nicht ausgereicht, um das volle System von Dochten und Lamellen einschließlich der später nicht mehr durchflossenen „Sackgassen-Lamellen“ aufzubauen. Es fand noch eine weitere Ausbildung des Wasservorrates statt. Dabei konnte Amaranthlösung im Zuge der Primärinfiltration des trockenen Sandes in solche neu entstandenen „toten“ Lamellen geströmt sein, die zu weit von den durchflussaktiven Dochten entfernt waren, um noch einen wirksamen diffusiven Rücktausch der Amaranthmoleküle zu gestatten.

Mit dem Ende der Regenpause dürfte die Verdrängung des ungefärbten Wassers abgeschlossen und die diffusive Amaranthverteilung auf die den Leitdochten benachbarten, ruhenden oder nur schwach bewegten wasserführenden Porenzonen abgeschlossen gewesen sein. Die folgende Be-

regnung mit Wasser zeigte, wie vorher beim Amaranth, einen schnellen Durchbruch von wenig gefärbtem Wasser mit anschließendem steilen Konzentrationsanstieg und dem dann folgenden diffusen oder auch desorptiven Rücktausch des Amaranths.

Obwohl eine - wenn auch nur schwach sichtbare - Sorption des Amaranths an den Mineralkörnern des Sandes nicht auszuschließen ist, erscheint sie doch als gering genug, um die Dispersität des Amaranthtransportes den unterschiedlichen Fließeigenschaften der Fließlinien im Porenraum zuzuschreiben und dafür als Tracer zu nützen.

Abb. 3.16: Versuch 3: Amaranthkonzentration der Beregnungslösung und Abflusslösung im Zeitgang

3.6.5 Versuche 4 und 5: Wassertransport in vertikal geschichtetem Sand

Wenn die im Absatz 3.6.3 als Modell entwickelte Vorstellung Gültigkeit hat, dürfte bei vertikaler Schichtung des Sandes keine Entstehung horizontaler Wasserlamellen möglich sein.

Dies zu überprüfen ist notwendig, weil sich in Aufschlüssen von Sanden mit schräg oder senkrecht gestellten Sand-Paketen – eine Folge glazialer Stauchungen – durchaus horizontale Tonlamellen finden. Die später noch zu beleuchtende Hypothese „Tonlamellen haben ihre Ursache in Wasserlamellen“, die sich so vereinfacht nicht halten lässt, da die Tonakkumulation die laterale Ausbreitung von Lamellen modifiziert, erfordert diesen Punkt vorab zu klären.

In Versuch 4 war die feinere Fraktion $< 355 \mu\text{m}$ Ø (feiner Mittelsand + Feinsand + Schluff + Ton), in Versuch 5 der grobe Mittelsand $630 - 355 \mu\text{m}$ Ø unter Verwendung des Lysimetergefäßes C horizontal feinschichtig trocken eingefüllt und dann um 90° gekippt worden, so dass die Schichten senkrecht standen. Dabei war die Befüllung so vorgenommen, dass die senkrecht stehenden Schichten unten auf einem Kiesbett standen, das ein Ausfließen des Sandes ausschloss und das Wasser aufnahm. Die Stärke der Sedimentlagen war in beiden Versuchen etwa mit 2 mm gleich gehalten worden.

3.6.5.1 Versuch 4: Sand < 355 μm

Der Versuch erstreckte sich über 26 Tage, davon 24 Tage mit je 10 mm Amaranth-Regenwasser und zwei Tage bis zum Ende des freien Abflusses. Der Abfluss begann am fünften Tag, gleichbleibende Abflussraten gab es vom zehnten Tag an. Von den verregneten 300 ml flossen 280 ml ab. Die Differenz von 20 ml resultierte aus weiterer Vorratsbildung und Verdunstung.

Abb. 3.17: Versuch 4: Fließmuster (10 mm = 1 d)

Die Fließmuster in Abb. 3.17 zeigen das Folgende:

- 0 mm: Richtung der Linien zeigt die Ausrichtung der Sandschichtung an.
- 50 und 100 mm: Das Wasser sickert fingerförmig in den trockenen Sand ein. Die Finger sind unterschiedlich breit. Sie erstrecken sich auf 1 - 6 Sandschichten und zeigen nach rechts und links hin scharfe Begrenzungen, die durch die feinkörnigeren oder dicht arrangierten Schichtobergrenzen gebildet werden. Die Leitung des Wassers erfolgt hier in den Kernzonen der Schichtpakete.
- 150 bis 250 mm: Die vertikalen Finger werden tiefer und breiter und schließen sich dann zu einer gleichmäßig erscheinenden Durchfeuchtungszone. Dabei ist die laterale Verbreiterung nur scheinbar. Die wenig leitenden Schichtgrenzen werden nicht durchbrochen, sondern es werden nach und nach im Zuge der Beregnung von oben her immer neue Schichten vertikal durchflossen. Es sind also keine präferentiellen Fließbahnen, die sich hier abzeichnen, sondern zeitlich nacheinander und nebeneinander entstehende Infiltrationsfinger. Das dem so ist, zeigt Abb. 3.18, in der die vertikalen Amaranthstriche, angelegt in den Kernzonen der Sandschichten, dicht parallel nebeneinander liegen. Ein diffusiver Querausgleich hat kaum stattgefunden, und ein präferentielles Fließen ist nicht gegeben.

Die intensivere Färbung im unteren Bereich des Lysimeters ist auf einen höheren Wassergehalt infolge Staus über tragenden Menisken an der Grenze Sand/Kies zurückzuführen, der einen horizontalen diffusiven Ausgleich gestattet.

Das Abbiegen der Durchfeuchtungszone nach links bei 150 mm Infiltrat beruht darauf, dass sich der Abflusssutzen an der linken Seite des Lysimeter-Kiesbettes befindet.

Abb. 3.18: Versuch 4: Amaranthverteilung innerhalb der Sandsäule fünf Tage nach dem letzten Abflussereignis

3.6.5.2 Versuch 5: Sand 630 – 355 μm

Laufzeit:	32 Tage, davon 31 Tage mit $2 \cdot 5 = 10$ mm Amaranthlösung
Abflussbeginn:	an Tag 8
Konstante Abflussraten:	ab Tag 12
Ende des freien Abflusses:	an Tag 32
Wasserbilanz:	wie Versuch 2
Wasserinhalt d. Sandsäule:	$\varnothing$ 2,08 l; max. 2,35 l - Beim Mittelwert waren fast 20 % des Lysimeter- volumens bzw. 50 % des Porenvolumens mit Wasser gefüllt. Ursache dafür war der Stau durch tragende Menisken an der Grenze vom Sand- zum Kieskörper.

Die Fließphänomene des Wassers waren ansatzweise ähnlich wie im Sand mit der feineren Körnung. Beim Eindringen des Wassers in den trockenen Sand waren diese seitlich wieder nur durch die Schichtgrenzen der Sedimentlagen scharf begrenzt und wurden nach und nach von oben mit Wasser beschickt, wodurch zunehmende Breite der Finger vorgetäuscht wurde (z.B. in Abb. 3.19 Bild 150 mm). Offenbar wurden durch Meniskenwasser-Abschluss an der Oberfläche des Sandes - aber auch durch Meniskenbildung im Sand selbst - Lufteinschlüsse, eventuell mit Druckerhöhung, hervorgerufen. Sie blockierten die Fortsetzung des Fließens in den Sedimentlagen und zwangen das Wasser zum Ausweichen innerhalb der Sedimentlagen oder in andere Sedimentlagen. Von unten her baute sich, stärker als in Versuch 4, über tragende Menisken eine Zone der Sättigung mit Wasser auf, die von unten her als Luftabschluss wirkte.

Abb. 3.19: Versuch 5: Fließmuster (10 mm = 1 d)

Die Rechtsabweichung der Wasserzunge bei 50 mm war wieder auf die Lage des Abflusstutzens zurückzuführen.

Anders als bei dem feinen Sand in Versuch 4 blieben – vermutlich auf Grund der Lufteinschlüsse – große Teile des Sandes trocken. Das heißt, dass hier die Infiltrationszungen als präferentielle Fließbahnen fixiert worden waren.

Weder in Versuch 4 noch in Versuch 5 war – mit Ausnahme des nur über kurze Distanzen erfolgten Abknickens der vertikalen Sedimentlagen-Wasserzungen – eine Ausbildung horizontaler Wasserlamellen festzustellen.

3.6.6 Versuch 6: Kreuz- oder Diagonalschichtung

Mit diesem Versuch wurde angestrebt, aufgrund der Erfahrungen und Modellvorstellungen aus den Versuchen 1 und 2 ein Wasserleitsystem mit ausgeprägtem lamellär-präferentiellem Fluss zu erstellen. Dazu diente eine alternierende Kreuz- oder Diagonalschichtung (wie in Abb. 3.20 skizziert) aus grobem Mittelsand (630 – 355 μm Ø), die durch wiederholten Wechsel der Seiten beim Einfüllen des Sandes von den Schmalseiten des Lysimeters her erstellt worden war und einen Schüttungswinkel von etwa 28° aufwies.

Laufzeit:	67 Tage, davon 67 Tage mit je 10 mm Amaranth-Lösung
Abflussbeginn:	an Tag 5 (zum Vergleich Versuch 2 am 10. Tag)
konstante Abflussraten:	ab Tag 10
Ende des freien Abflusses:	Tag der Beendigung der Beregnung (Sofortreaktion)
Wasserbilanz:	tägliche Regenmenge 300 ml, tägliche Abflussmenge 265 ml, Differenz: Vorratsbildung und Verdunstung
Wasserinhalt d. Sandsäule:	Ø 2,67 l; max. 3,88 l
	(dynamisch)

Abbildung 3.20 gibt das Fließgeschehen an einer der beiden Frontseiten des Lysimeters als Momentaufnahme der Versuchstage 4, 8, 12, 16 und 20 entsprechend 40 - 200 mm Niederschlag wieder. Aus der Abbildung ist mehr als deutlich zu erkennen, dass sich der Wasserfluss an die Vorzugsrichtung der Sandschichtung hielt. Dabei strömte das Wasser lamellenförmig in den obersten Bereichen der alternierenden Sandpakete. An einigen Stellen kam es sehr schnell zum Aufstau des Lamellenwassers an schräg auf diese Lamellen zulaufenden Sedimentlagen anderer Sandpakete.

An diesen Stellen bewirkte der zunehmende hydrostatische Druck sowohl ein Eindringen in die oberen Sedimentlagen des schräg zuführenden Sandpakets, aber auch in die oberste Sedimentlage des entgegengesetzt schräg abführenden Sandpakets, dessen Wasserlamellen jetzt die Ableitung des Wassers übernahmen. In diesem Versuch ist also durch den spezifischen Schichtauf-

bau ein präferentielles Fließsystem geschaffen worden, das bei sehr wenig Wasserbedarf für seinen Aufbau im oberen Lysimeterabschnitt und langen Fließstrecken eine hohe Durchsatzleistung mit rascher Eintrags/Austragsreaktion aufwies.

Abb. 3.20: Versuch 6: Fließmuster (10 mm = 1 d)

Im Gegensatz zu allen anderen Versuchen spiegelte sich das auf der Frontseite des Lysimeters entstandene Fließmuster auf der Rückseite wieder. An den schmalen Lysimeterseiten zeigten sich horizontale Verbindungen der auf Front- und Rückseite entstandenen lamellären Fließwege. Aufgrund dieser ist davon auszugehen, dass die Wasserbewegung sich schichtförmig über den jeweiligen Sedimentkörper hinweg vollzog und nicht nur auf Teile der obersten Sedimentlagen beschränkt war.

3.6.7 Versuche 7, 8 und 9: Einseitige Beregnung, laterale Ausbreitung

Die Versuche 7 (Sand < 355 μm und 8 (Sand 630 – 355 μm) dienen der Beantwortung der Frage nach dem Ausmaß der lateralen Ausbreitung von Wasser bei der infiltrativen Entstehung von horizontalen Wasserlamellen im trockenen Sand und deren ausschließende Funktion als Transportwege für abströmendes Wasser.

Tab. 3.3: Versuch 7,8 und 9: Übersicht

	Versuch 7	Versuch 8	Versuch 9	
Sand, Korndurchmesser:	< 355 μm	630 – 355 μm	630 – 355 μm	
Beregnungsdauer:	Tag 1 - 16	Tag 1 – 25	Tag 1 - 20	
Regentagesrate (mm):	10	10	10	
Regentagesrate (ml):	150	150	150	
Tagesverlust (Verdunstung, dynamische Vorratsbildung):	10			
erstes Abflussereignis:	Tag 11	Tag 8	9	Die Beregnung erfolgte, betrachtet man die Fließmusterbilder, nur auf die rechte Hälfte des Lysimeters.
Konstanz der Abflusstagesraten:	Tag 13	Tag 12	12	
Wasservorrat (statisch, nach Abfluss):	1,72 l	1,35 l	nicht bestimmt	
letztes Abflussereignis:	Tag 21	Tag 29	Tag 24	
dynamischer Wasservorrat:	1,74 l	1,44 l	nicht bestimmt	

Die Fließmuster zu Versuch 7 gibt Abb. 3.21 wieder. Das Regenwasser bewegte sich in breiter Front – wie in Versuch 1 beschrieben – unterhalb der beregneten Fläche abwärts. Es bildete sich dabei über dem Kiesbett wieder eine Zone des Wasserstaus, die lateral über Lamellen gefüllt wurde, wobei diese Stauzone langsam nach oben anstieg. Aber auch im oberen Teil des Lysimeters war ein laterales Vorrücken der Wasserlamellen aus dem rechten Versickerungsbereich heraus zu beobachten, was jedoch in der Fließmusterskizze kaum zu erkennen ist. Es ist lediglich ansatzweise an einigen Protuberanzen im Bild „40 mm“ am Tag 4 zu erkennen. Danach vollzog sich sowohl aus der Perkolationszone wie aus der Stauzone heraus die Befeuchtung der nicht beregneten Lysimeterhälfte.

Abb. 3.21: Versuch 7: Fließmuster (10 mm = 1 d)

Die Fließmuster zu Versuch 8 gibt Abb. 3.22 wieder. In dem hier verwendeten gröberen gleichkörnigen Sand mit seinen ausgeprägten Möglichkeiten für Lufteinschlüsse wurde die Eindringzone des Wassers unter der beregneten Oberflächen-Hälfte nach links abgelenkt und stellenweise stark eingeeengt. Man sieht aber deutlich, dass diese Eindringzone aus der bereits in Versuch 6 beschriebenen Folge von Wasserlamellen bestand. Diese bildeten, ausgeprägter als in Versuch 3, laterale Protuberanzen rechts und links in die trockenen Partien des Sandes hinein aus.

Abb. 3.22: Versuch 8: Fließmuster (10 mm = 1 d)

Auch hier kam es wieder zu einem Stau des Wassers auf den tragenden Menisken an der Grenzschicht Sand/Kies. Auch diese Stauzone war in Wasserlamellen gegliedert, aus denen heraus bei weiterem Anheben der Stauwasser-Oberfläche Wasser seitlich abfloss und damit auch hier zur Befuchtung der zunächst von der Infiltration ausgesparten Zonen des Sandes beitrug.

Der Versuch 9 stellt eine Variante zum Versuch 8 dar, in der versucht wurde, durch eine 10 cm hohe Trennwand im basalen Teil der Sandfüllung des Lysimeters über dem Kies das Ansteigen des Stauwassers zu kontrollieren, um den von diesem ausgehenden Störeinfluss auf das Geschehen im oberen Teil des Lysimeters zu reduzieren.

Abb. 3.23: Versuch 9: Fließmuster (10 mm = 1 d)

Die Korngröße des Sandes und der Beregnungs/Abflussmodus waren etwa die gleichen wie in Versuch 8. Die Trennwand, die nicht in den Kies hineinreichte, verzögerte zuerst die Ausbildung des Staukörpers auf der linken Lysimeterseite. Die Dränzone, die diesen Staukörper speiste, verlief dieses Mal zunächst im rückwärtigen Teil des Lysimeters und brach dann nach vorn durch – über die Trennwand hinweg, wo sie den links der Trennwand liegenden trockenen Sand auffüllte.

Die beiden lateralen Protuberanzen, die oberhalb der Trennwand aus den älteren und späteren Dränzungen in den trockenen Sand hinein vorstießen und immer mehrere Sedimentlagen einnahmen, waren bis zum neunten Tag deutlich zu sehen.

3.6.8 Versuch 10: Grober Mittelsand 630 – 355 µm

Mit diesem Versuch wurde beabsichtigt, die Entstehung von „toten“ Lamellen, die bei der Infiltration des lufttrockenen Sandes entstehen und später nicht am Durchfluss teilnehmen, von den Lamellen im Perkulations- oder Durchbruchbereich räumlich abzugrenzen und eventuell erste Hinweise auf den diffusiven Stofftransport zwischen beiden Bereichen zu erhalten.

Dazu wurde eine Hälfte des Lysimeters beregnet und die andere durch seitlich eingeschobene Platten in 10, 20 und 30 cm Tiefe untergliedert.

Versuchscharakteristika:

Sand:	Fraktion 630 – 355 µm, lufttrocken
Schichtung:	horizontal, 2 mm-Sedimentlagen
Steuerung des Abfließens:	durch seitlich eingesetzte PVC-Platten
Beregnung:	halbseitig rechts, täglich 10 mm
	- Phase 1: Tag 1 bis 10 ungefärbtes Wasser
	- Phase 2: Tag 11 bis 31 amaranthgefärbtes Wasser
Abfluss:	Ende an Tag 35

Beobachtung im Ruhezustand: bis Tag 241

Abb. 3.24: Versuch 10: Frontseitenfließmuster (10 mm = 1 d)

Abb. 3.24 zeigt in ihren Fließbildern nur die Ausbreitung der befeuchteten Zone in die lufttrockene Zone des Sandes hinein – unabhängig von Färbung und Nichtfärbung des infiltrierenden Wassers. Dabei wird rechts wieder die rasche Ausbildung eines unterschiedlich stark eingeschnürten und mehrfach abgeknickten Dränkanals deutlich, der oberhalb der Grenze Sand/Kies wieder die Ausbildung verursachte.

Die linke durch PVC-Platten untergliederte Lysimeterhälfte wurde nicht durchflossen. Es zeigte sich aber, dass mit der Ausbreitung der rechts ausgebildeten Perkolationszunge Wasserlamellen lateral in die abgeschirmten Bereiche hineinwuchsen.

Die Abb. 3.25 zeigt die Situation im Lysimeter am Tag 40, d.h. neun Tage nach Ende der Beregnung mit Amaranthwasser und fünf Tage nach dem letzten Austritt von abfließendem Wasser. In diesem Stadium war die Verteilung des Amaranths durch dunkelrote Farbtöne markiert. In den folgenden 200 Tagen diffundierte das Amaranth - gekennzeichnet durch hellrote und orange Säume - in den nur durch Wasser befeuchteten Bereich hinein. Die Grenze zwischen befeuchtetem und lufttrockenem Sand blieb in dieser Zeit unverändert.

Der Ablauf der Bilder zeigt Folgendes: In Phase 1 bildete das infiltrierende Wasser Wasserlamellen aus, die in der rechten Hälfte des Lysimeters von einem Dräntunnel überdeckt und durchschlängelt wurden (dränaktive Lamellen). Aus dieser Zone mit Fließbewegung heraus, wuchsen seitlich Infiltrationslamellen heraus, die später nicht mehr durchflossen wurden und damit „Sackgassen-Lamellen“ darstellten. Abb. 3.25 zeigt, dass die in Phase 2 verregnete Amaranthlösung nur den ausgebildeten Fließweg benutzte und nicht in die „toten“ Bereiche zwischen den seitlichen Platten strömte.

Vergleicht man das Fließbild von Tag 10 (100 mm) aus Abb. 3.24 mit Tag 40 der Abb. 3.25, so erkennt man, dass - auch noch während der Amaranth-Wasserinfiltration - Wasser, das offenbar filtriert war, die Befeuchtungsfront lateral noch etwas weiter in die trockenen Bereiche des Sandes hinein verschoben hat.

Die Diffusion des Amaranths aus der dabei sistierten Durchflusszone in die lediglich mit Wasser befeuchtete Totlamellen-Zone war sehr gering, wie die während der 200-tägigen Beobachtungszeit entstandenen Diffusionssäume erkennen ließen.

Abb. 3.25: Versuch 10: Verteilung von Wasser und mit Amaranth gefärbtem Wasser entlang der Lysimeterrückseite im hydrostatischen Zustand ab Tag 40

3.6.9 Versuche 11, 12, 13 und 14: Ausbreitung von Wasserlamellen

In diesen Versuchen wurde noch einmal das bereits in Kapitel 3.6.5 behandelte Thema aufgegriffen: Können horizontale Wasserlamellen in vertikal geschichtetem Sanden aufgrund der Bildung von Luftkissen entstehen, wie es im Gelände gelegentlich angetroffene horizontale Tonlamellen in senkrecht oder schräg geschichtetem Sand suggerieren? Dazu soll im Folgenden besonders die Möglichkeit der lateralen Ausbreitung von Wasserlamellen aus horizontal geschichtetem Sand in vertikal geschichteten Sand hinein betrachtet werden.

In allen vier Versuchen enthielt das Lysimeter – wie in den Fließbildern 3.26, 3.27, 3.28 und 3.29 dargestellt – in seiner rechten Hälfte horizontal, in seiner linken Hälfte vertikal geschichteten Sand. Das Regenwasser wurde entweder auf die linke oder die rechte Hälfte aufgebracht. Der Abflussstutzen des Lysimeters an der Basis befand sich auf der linken Seite.

Tab. 3.4: Versuch 11 bis 14: Übersicht

	Versuch 11	Versuch 12	Versuch 13	Versuch 14
Sand-Körnung $\mu\text{m } \varnothing$:	< 355	630 - 355	< 355	630 - 355
Beregnung auf Seite:	links	links	rechts	rechts
Beregnungsrate $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$:	10	10	10	10
Beregnungsdauer (Tage)	15	25	16	25
erstes Abfließen an Tag:	4		11	
letztes Abfließen an Tag	16		20	

In den Versuchen 11 und 12, Abbildungen der Fließmuster 3.26 und 3.27, wurde die linke Lysimeterhälfte mit vertikal geschichtetem Sand beregnet. Wie in den früheren Versuchen zur Wasserleitung in vertikal geschichtetem Sand unterschiedlicher Korngröße wurde in beiden Fällen das

Wasser schnell nach unten durchgeleitet. Dabei entstand an der Basis des feineren Sandes nicht einmal eine Stauzone und bei dem gröberen Sand eine relativ schwache Stauzone, was möglicherweise auf die schnelle Wasserabfuhr durch den links sitzenden Wasserauslass zurückzuführen ist. Ein laterales Eindringen des Wassers in den horizontal geschichteten Sand fand nur unmittelbar unter der – vorübergehend wohl wassergesättigten – Oberflächenschicht in zwei bis drei horizontalen Sandlagen statt. Sie war wegen des bereits beschriebenen Luft-Gegenstaus beim groben Sand ($630 - 355 \mu\text{m}$) deutlicher und zeigte auch noch einige Zentimeter unter der Oberfläche einige Protuberanzen.

Die Versuche 13 und 14, bei denen die horizontal geschichtete Seite beregnet wurde, bestätigten die bereits vorher gewonnene Erkenntnis, dass keine laterale Ausbreitung von Wasserlamellen aus dem horizontal geschichteten Sandkörper in den vertikal geschichteten hinein stattfindet. Das Wasser strömte zwar in Lamellen teilweise nach links ab, wobei der vertikal geschichtete Sand gleich seine Funktion der vertikalen Wasserabfuhr erfüllte. Die Zahl der dafür benötigten vertikalen Sedimentlagen war je nach lateralem Wasserandrang unterschiedlich. Beim feineren Sand < 355 (Abb. 3.28) zeigte die Ausbildung einer schiefen Befeuchtungsfront, dass oben offenbar mehr Sedimentlagen für die Vertikaldrainage beansprucht wurden, als weiter darunter. Beim gröberen Sand, in dem sich das Wasser im rechten Teil wieder ungesteuert eine definierte Dränung mit einer horizontalen Verbindung suchte, war im unteren Lysimeterabschnitt die Grenze zwischen den unterschiedlich geschichteten Lysimeterhälften noch deutlicher als beim feineren Sand.

In den beiden letztgenannten Versuchen war die Ausbildung der Stauzone, die hier ihren Ursprung im horizontal geschichteten Lysimeterteil hatte, viel stärker als in den Versuchen mit der Beregnung der vertikal geschichteten Sandhälfte.

Auch diese vier Versuche gaben auf die eingangs gestellte Frage nach der Bildung von horizontalen Wasserlamellen in nicht horizontal geschichteten Sanden eine negative Antwort.

Abb. 3.26: Versuch 11: Fließmuster (10 mm = 1 d)

Abb. 3.27: Versuch 12: Fließmuster (10 mm = 1 d)

Abb. 3.28: Versuch 13: Fließmuster (10 mm = 1 d)

Abb. 3.29: Versuch 14: Fließmuster (10 mm = 1 d)

3.6.10 Versuche 15 und 16: Wasserfluss durch Sandpakete unterschiedlicher Sortierung

Mit diesen beiden Versuchen wurde angestrebt das unterschiedliche Fließgeschehen, wie es bislang in den Versuchen mit Sanden 630 – 355 μm und < 355 μm beobachtet worden war, in nur einem Durchflussgeschehen darzustellen.

Dazu wurden im Versuch 15 in eine horizontale Schüttung trockenen Sandes < 355 μm Ø, im Folgenden als „fein“ bezeichnet, zwei horizontal geschüttete Schichten trockenen Sandes 630 bis 355 μm Ø, im Folgenden als „grob“ bezeichnet, von je vier Zentimetern Dicke eingebracht (Variante „fein mit grob“). Umgekehrt wurden in Versuch 16 zwei Schichten von Sand „fein“ in Sand „grob“ eingebracht (Variante „grob mit fein“). Beide Lysimeter wurden zehn Tage lang mit täglich 10 mm Niederschlagshöhe beregnet.

Abb. 3.30: Versuch 15: Fließmuster, zwei Schichten grober Mittelsand (630 – 355 µm Ø), 4 cm stark, in Sand < 355 µm Ø; 10 mm Regenhöhe entsprechen einem Tag

Abb. 3.30 zeigt am Beispiel der Variante „fein mit grob“ in geradezu klassischer Weise den Durchbruch einer Durchfeuchtungsfront durch eine Sedimentlage mit Lufteinschluss. Im oberen Teil des Lysimeters rückte die Durchfeuchtungsfront scheinbar gleichmäßig nach unten vor, wobei der „feine“ Sand in dieser Zone die zahlreichen horizontalen Wasserlamellen bildete, die hier nicht darstellbar sind. Erst über den beiden „grogen“ Sandlagen wurde das Phänomen einer sich durch Stau verdickenden Wasserlamelle deutlich. Diese brach nach Erreichen eines bestimmten hydrostatischen Druckes an mehreren Stellen in Form von Fließfäden oder –tunneln durch die grobe Sandschicht hindurch. Das durchgebrochene Wasser schloss sich, zumindest unterhalb der oberen groben Sedimentlage, wieder zu einer homogen nach unten fortschreitenden Durchfeuchtungsfront. Interessant ist, dass beim Durchbruch des Wassers durch die trockenen Schichten groben Sandes horizontale Wasserlamellen entstanden, welche durch den in der Modelldarstellung in Absatz 3.6.3 in den Dochtzonen der Sedimentlagen herrschenden Sog verursacht wurden.

Im umgekehrten Versuch mit der Variante „fein in grob“ vollzog sich das Fließen erwartungsgemäß völlig anders: Das Beregnungswasser floss schon dicht unterhalb der Oberfläche des Sandes zu einer einzelnen Dränbahn zusammen, die in dem Lysimeter nach hinten und nach vorn schwang. Auf der Ansichtsseite des Gefäßes sah man nur die nach vorn vorgewölbten Schlingen – gewissermaßen „angeschnitten“. Auf dieser Dränbahn floss das Wasser schnell zur Basis des Sandes hinunter und bildete dort den üblichen Staukörper.

Abb. 3.31: Versuch 15: Fließmuster, zwei Schichten Sand (< 355 µm Ø), 4 cm stark, in grobem Mittelsand 630 -355 µm Ø; 10 mm Regenhöhe entsprechen einem Tag

Dort, wo die Dränbahn aber die 4 cm-Schichten des feineren Sandes querte, saugten sich die Dochtzonen der Sedimentlagen rechts und links bis zu den seitlichen Begrenzungen des Lysimeters mit Wasser voll. In den systematisierten Fließbildern der Abb. 3.31 ist die Feinheit dieser lamellären Gliederung innerhalb der 4 cm-Zwischenschichten nicht darstellbar. Es ist aber sicher, dass diese im Zuge der Infiltration des Wassers in die trockeneren feinen Sandschichten hinein in-

filtrierten Wasserlamellen insofern als „tot“ zu bezeichnen sind, als sie nach ihrer Anlegung nicht mehr an einem weiteren Durchfließen des Wasser teilnahmen. Was bei ihrer Entstehung an gelösten Stoffen mit in diese Wasserlamellen hinein transportiert worden war, konnte nur durch Diffusion zurück in die Dränbahnen gelangen.

3.6.11 Versuch 17: Lateraler Fluss durch horizontale Lamellen

Die Versuche mit grobem Mittelsand ($630 - 355 \mu\text{m } \varnothing$) ließen die Lamellenstruktur des Wassers beim Eindringen in den trockenen Sand und beim späteren Durchfließen deutlicher hervortreten als beim Sand $< 355 \mu\text{m } \varnothing$, weil die Lamellen-Abstände größer waren. In der Erwartung, dass bei der Wahl von noch gröberen Sandkörnungen die Phänomene noch deutlicher würden, wurde in diesem Versuch mit Grobsand gearbeitet.

- Sandbefüllung: horizontal, schichtweise, trocken, Fraktion $1000 - 630 \mu\text{m } \varnothing$
1. Beregnung: 10 Tage à 10 mm amaranthgefärbtes Wasser
2. Beregnung: 10 Tage à 10 mm dünne Tonsuspension

Zur besseren Sichtbarmachung der Tonlamellen war nach Ende des Ablaufens von Sickerwasser das Lysimeter oben luftdicht verschlossen und an der Ausflussöffnung ein Unterdruck von 100 cm ($\approx 0,1 \text{ bar}$) Wassersäule angelegt worden. Danach wurde das Lysimeter von außen mit Hilfe von Rotlicht-Wärmelampen getrocknet.

Die Verwendung einer Tonsuspension nach erfolgter Vorberegnung verfolgte den Zweck festzustellen, ob in und in welchen Wasserlamellen, nachdem sie sich bei der Infiltration des Wassers in den trockenen Sand entwickelt hatten ein lateraler Durchfluss stattfand, oder ob sie „Sackgassen“ oder „tote“ Lamellen darstellten. Mit Amaranth einen solchen Nachweis zu führen, war insofern fraglich, als dass dieser Farbstoff sich letztlich auch durch Diffusion in „tote“ Lamellen hinein ausbreiten könnte, wenn dieses auch aufgrund der beobachteten geringen Raten der Diffusion bei den hier angelegten kurzen Phasen der Beobachtung von geringer Bedeutung zu sein schien. Beim kolloidalen Ton $< 0,6 \mu\text{m } \varnothing$ wäre dagegen dessen laterale Ausbreitung in Wasserlamellen auf Massentransport zurückzuführen und damit als ein sicherer Hinweis auf ein laterales Durchfließen zu werten.

Eindringen und Fließen: Die schematische Skizze des Fließablaufs dieses Versuches unterscheidet nur zwischen dem trockenen Sand (weiß) und dem befeuchteten Sand (grau), ohne die Feinstruktur der Wasserverteilung in letzterem darstellen zu können. Schon an der Oberfläche bildete sich bei den angewandten mäßigen Regengaben eine geschlossene, luftabschließende Schicht von Stauwasser, die von Luft getragen wurde. Trotzdem wurde durch starke vertikale Dränbahnen Wasser schnell in größere Tiefen geleitet. Schon am Ende des ersten Tages war eine Eindringtiefe von 30 cm erreicht. Bis zum Tag 7, an dem das Wasser fast die Basis des Sandes erreichte, waren in den Dränzungen trocken gebliebene Sandpartien eingeschlossen. Dies legte, ohne es hier schon nachgewiesen zu haben – dies geschieht später – die Annahme nahe, dass Luft in den von Dränzungen umschlossenen trockenem Sand eingeschlossen und dadurch unter Druck gesetzt worden war und dass die „Dochtzone“ – siehe die Modellvorstellung in Abb. 3.13 – mit hoher Saugspannung kapillares Wasser der Sedimentlagen hineinzogen. Diese Einschlüsse waren erfolgt, obwohl die Luft nach unten verdrängt werden konnte, was auch, wenn auch nur langsam, geschah. Die Vorrückgeschwindigkeit der Befeuchtungsfront des eindringenden Wassers verlangsamte sich aber durch die vielen kleinen Kissen eingeschlossener Luft ständig.

Die innerhalb der Befeuchtungszone ausgebildeten horizontalen Wasserlamellen schollen beim Durchlaufen des Wassers in einer von oben nach unten verlaufenden Wellenbewegung an und ab. Das ist dadurch zu erklären, dass in jeder Lamelle erst ein hydrostatischer Überdruck aufgebaut werden musste, bis die Weitergabe des Wassers nach unten durch die partiell luftgefüllte Schichtlage erfolgen konnte. In diesen Phasen des Anschwellens einer Lamelle war auch die laterale Ableitung des Wassers möglich.

Abb. 3.32: Versuch 17: Fließmuster (10 mm = 1 d)

Dies zeigten die bis zum siebten Tag immer wieder seitlich aus den Dränzungen in den trockenen Sand heraustretenden mehr oder weniger horizontalen Wasserlamellen. Dass diese auch nach dem Schließen der Befeuchtungszone horizontal von Wasser durchflossen wurden bis zu Punkten, an denen sie vertikal entwässert werden konnten und dass sie damit zu einem horizontalen Ausgleich der Wasserverteilung beitrugen, sollte mit Hilfe des Transportes von Ton gezeigt werden.

Schon das Transportverhalten des Amaranths, das in den Anfangsphasen immer sorptiv in seiner Verlagerungsgeschwindigkeit gegenüber dem Wasser retardiert wurde, hatte gezeigt (s. Abb. 3.32 Foto rechts unten) dass aus den präferentiellen vertikalen Leitbahnen heraus ein Transport in die vorgebildeten Wasserlamellen hinein erfolgt - besonders dort, wo diese Lamellen bereits den gesamten Querschnitt des Lysimeters erfasst hatten.

Tatsächlich fand, wie Abb. 3.33 zeigt, eine Anreicherung von Ton in Wasserlamellen statt, und zwar außerhalb der präferentiellen, deutlich markierten Dränzungen. Das heißt, dass dieser Ton lateral transportiert sein muss. Diese Tonlamellen waren bis zu 4 mm stark und zeigten meist eine schärfere Grenze auf der Unterseite (Grenze der „Dochtzone“) und einen diffusen Saum nach oben hin.

Abb. 3.33: Versuch 17: Tonanreicherungen in Wasserlamellen

3.6.12 Versuch 18: Wasserfluss in Grobsand und Feinkies

Da im Gelände auch in sehr groben Sanden und selbst in Feinkies Tonlamellen, wenn auch sehr dünn und in großen Abständen, beobachtet werden, wurde in diesem Versuch nebeneinander horizontal geschichteter grober Grobsand (1 – 2 mm; linke Lysimeterhälfte) und Feinkies (2 – 4 mm; rechte Lysimeterhälfte) mit 10 mm Regenhöhe je Tag bewässert.

Die in Abb. 3.34 skizzierte Umgrenzung der Befeuchtungszone zeigte wie in dem vorausgegangenen Versuch schnell leitende Vorzugsbahnen und Einschlüsse trockenen, lufthaltigen Sandes. Seitliche Protuberanzen der vertikalen Leitungen, besonders der an der Grenze zwischen Grobsand und Feinkies, machten deutlich, dass auch für die hier verwendeten größeren Körnungen das Modell der Bildung von horizontalen schichtgebundenen Wasserlamellen galt.

Abb. 3.34: Versuch 18: Fließmuster (10 mm = 1 d)

3.6.13 Modell B

Das Ergebnis der Orientierungsversuche ist zum einen im Modell A dargestellt, das die Entstehung und Anordnung von Wasserlamellen im Mikromaßstab betrachtet. Es musste vorgezogen werden, um die begrifflichen Festlegungen zu erläutern. Im Modell B (Abb. 3.35) soll dagegen übersichtsmäßig die Ausbildung von Fließwegen für Wasser beim Eindringen in trockenen Sand dargestellt werden. Es ist eine vereinfachende schematische, die Ergebnisse der orientierenden Versuche zusammenfassende Modellskizze.

Das auf die Oberfläche in Schüben aufgebrachte Niederschlagswasser **-A-** drängt die im Sand enthaltene Luft nach unten vor sich her. An der Oberfläche der einzelnen Sandlagen bilden sich Wasserlamellen. Dazwischen bleibt Luft eingeschlossen. Die enge Punktierung zeigt die statischen Wassermenisken an, die zusammen mit der Luft den vertikalen Leitwiderstand bedingen. In den sich verdickenden Wasserlamellen **-B-** fließt Wasser zur Dränzone **-C-** hin. Die Lage der Dränzone ist zufällig und nicht faktoriell vorausszusagen. Trocknet man den Sand nach Beendigung des Versuches vollständig, entsteht bei erneuter Befeuchtung die Dränzone meist an einer ganz anderen Stelle. Das in der Dränzone nach unten abströmende Wasser bildet zahlreiche aufeinander folgende Lamellen mit dazwischen liegendem Luft- und Meniskenwasser enthaltenden Sandlagen-Kernzonen. Der im Modell A beschriebene Mechanismus des Aufbaus eines hydrostatischen Überdrucks in der Wasserlamelle als Auslöser für den faden- oder tunnelförmigen Durchbruch des Wassers durch die lufthaltigen Schichtkerne, wirkt sich in der Dränzone beim Abwärtsströmen des Wassers in einer Wellenbewegung aus. Sie ist in der Skizze durch eine unterschiedliche Dicke der Wasserlamellen angedeutet. Die Lamellen schwellen beim Durchströmen des Wassers von oben nach unten aufeinanderfolgend an und ab.

Aus der Dränzone C mit ihren periodisch auftretenden ungespannten Wasserlamellen saugen die „Dochtzonen“ (Modell A) der Sedimentlagen Wasser ab oder aber: Es fließt auch lateral-lamellär in den trockenen Sand. Dabei entwickeln sich „tote“ oder „Sackgassenlamellen“ **-D-**, die später nicht mehr durchflossen werden, und Leit-Lamellen **-E** und **F-**, die zu horizontalen Leitbahnen werden und neu entstehende Dränzonen **-G-** nähren können. Dabei kommt es zu dem, was man als Kaskadenfließen **-E-F-G-** bezeichnen sollte, da horizontales und vertikales Fließen miteinander abwechseln.

Die Fließzungen entleeren sich in allen orientierenden Versuchen in eine aus Wasserlamellen und viel Wasser bei nur wenig Luft enthaltenden Stauzone über dem Sand/Kies-Kontakt. Hier kommt es, besonders bei feineren Körnungen des Sandes, zu beträchtlichen Stauhöhen – auch wieder mit lateralem Lamellenfließen – die erforderlich sind, um die Leitwiderstände der basalen „tragenden Menisken“ **-H-** zu überwinden und Wasser nach unten zu leiten.

Bei gleicher Dicke der horizontalen Sandschichten hängen Dicke und Abstand der Wasserlamellen von der Körnung des verwendeten Sandes ab. Sand der Fraktion $< 355 \mu\text{m}$ hat auf jeder Sandschicht eine Lamelle gebildet, so dass die Dränzone bei oberflächlicher Betrachtung als homogen durchfeuchtet erscheint, was jedoch nicht der Fall ist. Bei gröberer Körnung sind die Lamellen dünner und haben größere vertikale Abstände.

Die Frage, wie groß die Inseln trockenen Sandes sind, die bei der Befeuchtung ausgespart werden, wird ebenfalls von der Körnung her beantwortet. Die hier gegebene Modellskizze ist typisch für gröberen Sand. Bei feinerem Sand schließt sich das System aus den hier durch die Buchstaben B bis G gekennzeichneten Lammellentypen schneller und täuscht dadurch oft ein frontales Eindringen (piston flow) vor, das erst durch die Verwendung von Farbtracern widerlegt wird.

Abb. 3.35: Modell B

4 Hauptversuche: Quantitäten des Wasser- und Stofftrans- portes in 1 m³- Glas-Lysimetern

4.1 Fragestellung und Übersicht

Die Absicht der in diesem Kapitel beschriebenen Versuche besteht darin, die in den zu den orientierenden Versuchen verwendeten Kleinlysimetern möglicherweise weit ins Innere reichenden Randeffekte durch Verwendung eines sehr viel größeren, 1 m³ Sand fassenden, Glaslysimeters zu vermindern. Das Lysimeter sollte so beschaffen sein, dass es neben der visuellen Dokumentation gestattete, die Flüsse von Wasser, wässrigen Lösungen und Suspensionen in ihren divergierenden Kanälen quantitativ zu erfassen und räumlich zu differenzieren.

Die Sandfüllungen dieses Lysimeters sollten sich einerseits hinsichtlich ihrer Korngröße unterscheiden, um deren Einfluss auf die Ausbildung eines präferentiellen Fließsystems zu erkunden, andererseits sollte aber auch die erwartete Ausbildung von Tonlamellen beobachtet werden können.

Dazu wurden aus einem sedimenttypologisch weit verbreiteten saaleeiszeitlichen Vorschüttssand die Korngrößen „grob“ 630 – 355 µm Ø und „fein“ < 355 µm Ø getrennt und einzeln eingesetzt. Dabei wurde bewusst das Risiko in Kauf genommen, dass solche Fraktionen, deren Korndurchmesser-Bereich relativ eng begrenzt ist, wie die sogenannten „gleichkörnigen“ fluvioglazialen Talsande bei der Sedimentation größere Dichten erlangen können, als der nicht aufgetrennte Vorschüttssand. Dies könnte, so wurde erwartet, die Ausbildung eines räumlich feiner strukturierten und damit insgesamt homogenen Fließsystems bedingen.

Es werden drei Perkolationsversuche vorgestellt, zwei mit der groben (I und II) und einer mit der feinen (III) Sandfraktion, bei denen jeder mit der Irrigation des lufttrockenen Sandes begann, um die für die primäre Ausbildung des Fließsystems entscheidende Anfangsphase zu beleuchten. Mit diesen Versuchen sollte das Fließverhalten des Sickerwassers genauer als bei den orientierenden Versuchen ermittelt werden. Durch eine gleichmäßige Aufbringung gleichbleibender Tagesraten der Beregnung sollte mit Hilfe von 171 Einzelabflüssen festgestellt werden, ob es ein homogenes Abflussbild gibt, oder ob es vielmehr zur Ausbildung von einem oder mehreren Zentren verstärkten Abflussgeschehens – mit konstanter oder variierender Lage - kommt.

Versuch I sollte primär Ergebnisse zur räumlichen Differenzierung des Wasser erbringen. Versuch II sollte die in Versuch I gewonnenen Kenntnisse bestätigen und ferner genauere Aussagen über den Stofftransport ermöglichen, denn nach Beendigung von Versuch I bestand zwar Klarheit über die Wasserverteilung im Versuchssand, nicht aber darüber, wie sich die Tracer innerhalb der Sandsäule mit dem Wassertransport verteilten. Versuch III sollte einen Vergleich des Wasserflusses in groben und feinen Sanden ermöglichen und im Weiteren der Frage nach der Entstehung von Tonbändern in Sanden nachgehen.

4.2 Messvorrichtungen, Füllmaterial und Analytik

In diesem Kapitel werden die für alle durchgeführten Versuche verwendeten Materialien beschrieben. Dabei wird neben der Konstruktion, den Dimensionen und den Baumaterialien der Lysimeter und Versuchsaapparaturen auf Eigenschaften des Versuchssandes und seiner Aufbereitung sowie auf die genutzten Tracer nebst der zu ihrer Bestimmung angewandten Analytik eingegangen.

4.2.1 Lysimeter

4.2.1.1 Ausmaße und Material

Form:	Quader (oben offen)	
Grundfläche:	1500 • 600 mm (Innenmaß)	
Höhe:	1200 mm	
Füllhöhe:	1150 mm	
Sandinhalt:	$\approx 1 \text{ m}^3$	
Sandgewicht:	ca. 1,7 t trockener Sand	
Lagerungsdichte:	$\varnothing 1,73 \text{ g/cm}^3$ im ersten Versuch mit Sand 630 - 355 μm $\varnothing$ $\varnothing 1,71 \text{ g/cm}^3$ im zweiten Versuch mit Sand 630 - 355 μm $\varnothing$ $\varnothing 1,66 \text{ g/cm}^3$ im dritten Versuch mit Sand < 355 μm $\varnothing$ (in allen Fällen Dichtezunahme von oben nach unten)	
Seitenwände:	Spiegelglas 12 mm	
Bodenplatte:	PVC-Platte mit eingefräster Führungsnut für die Wandplatten mit Gewindebohrungen (6 mm) für 171 Einzelabflüsse und mit aufgesetzten Abflusszellen	
Abflusszellen:	PVC-Rohr $\varnothing$ innen: 70 mm $\varnothing$ außen: 75 mm Höhe: 120 mm	
Einzelabflüsse:	PVC-Schlauchstutzen mit 6 mm-Gewinde. $\varnothing$ innen: 2 mm $\varnothing$ außen: 5 mm	
Gestell:	40 mm-Vierkantstahl (geschweißt), Höhe 800 mm	
Auffangbehälter:	drei auswechselbare Sätze zu je 171 Getränkedosen ($\varnothing$ außen: 66 mm, Inhalt: 0,5 l) auf sechs austauschbaren Holzschubfächern.	
Schlauch:	171 Stück PVC-Schlauch (von Schlauchstutzen zu Auffangdosen) $\varnothing$ innen: 4 mm $\varnothing$ außen: 6 mm Länge: 380 mm	
Befestigungen:	Abflusszellen und Bodenplatte: Kunststoffkleber Schlauchstutzen und Bodenplatte: Verschraubung Bodenplatte und Seitenwände: Silikonkautschuk Seitenwände (Eckverklebung): Silikonkautschuk	
Stabilisierung:	Abschluss: Ringanker aus vier verschweißten Eisen-L-Profilen (30 mm) Frontseiten: Ringanker aus zwei mit Gewindestangen (12 mm) miteinander verschraubten Stahl-U-Profilen (50 mm)

Abb. 4.1: Glaslysimeter (Seitenansichten)

Abb. 4.2: Glaslysimeter mit aufgesetzter Beregnungsanlage

Abb. 4.3: Anordnung der Abflusszellen über den Abflusslöchern

4.2.1.2 Sicherung gegen Ausfließen

Um ein Ausfließen des durch die nachfolgende Beregnung angefeuchteten Sandes durch die 171 Zellen zu vermeiden, mussten diese durch einen Filterkörper abgedeckt werden. Von den beiden Alternativen Kiesbett oder Kunstfaserfilter wurde ersterem der Vorzug gegeben - trotz des zu erwartenden Durchmesserbruchs der Kapillaren und dem dadurch ermöglichten Stau von Wasser. Bei Kunstfaserfiltern erschien das Risiko des Verstopfens durch Ton und Schluff zu groß. Die unteren 9 cm des Lysimeters, d.h. alle PVC-Zylinder der Abflusszellen und ihre Zwischenräume bis zu drei Vierteln ihrer Höhe, wurden mit Kies gefüllt. In das obere Viertel lagerte sich bereits der Füllsand des Lysimeters ein. Dadurch und durch die Abflusszellen wurde eine Verzerrung des Abflussbildes durch Wasserbewegungen im Kieskörper vermieden.

4.2.1.3 Vorrichtung zur Beregnung

Vorratsbehälter: Plexiglas (12 mm) verschraubt und mit Kunststoffkleber verklebt

Zwischentank: Plexiglas (12 mm) verschraubt und mit Kunststoffkleber verklebt

Ausläufe: 59 1ml-Einmalspritzen (DIN/EN/ISO 7886-1), dazu vier Sätze austauschbarer Einmalkanülen (DIN/EN/ISO 7864) zur Variation der Berechnungsraten und zur Vermeidung von Verstopfungen bei Tracer- und Tonzugabe

Pravaz 20 Ø 0,40 mm, Länge 20 mm

Pravaz 18 Ø 0,45 mm, Länge 25 mm

Pravaz 16 Ø 0,60 mm, Länge 25 mm

Pravaz 2 Ø 0,80 mm, Länge 40 mm

Wagen: Plexiglas (12 mm) verschraubt und mit Kunststoffkleber verklebt
vier Kunststoffräder (Gummilaufflächen) mit Aluminiumflachmaterial an
Plexiglas befestigt

Plattform: Holz mit zwei aufgeschraubten Aluminium-U-Profilen zur Radführung

Abb. 4.4: Beregnungseinrichtung

Abb. 4.5: Antrieb des Beregnungswagens

Antrieb:	BOSCH LKW-Scheibenwischermotor Geschwindigkeitsregelung durch CONRAD Labornetzgerät PS-405-D
Kraftübertragung:	Zahnscheiben und Zahnriemen
Antriebswelle:	in Lagern ruhende 16 mm-Gewindestange
Steuerung:	Relaisumschaltung für Laufrichtung in Kunststoffschaltkasten zwei Kontaktschalter

4.2.1.4 Vorrichtung zur Befüllung mit Sand

Abb. 4.6: Selbstentladewagen zur Lysimeterbefüllung

Wagen:	Rahmen: Holz Entladespaltregulierung: eine feste und eine durch Stellschrauben verschiebbare Holzplatte, Spaltlänge 60 cm, Spaltbreite 0 - ca. 20 mm - Öffnung beim Befüllungsvorgang max. 5 mm. vier auf dem oberen Ringanker des Lysimeters laufende PVC-Rollen
--------	---

4.2.1.5 Befüllung des Lysimeters

Zahlreiche eigene und von anderen Autoren durchgeführte Versuche zur Befüllung von Lysimetern mit Sand haben gezeigt, dass weder in Luft noch in Wasser die Erzeugung eines homogenen Sandkörpers ohne Korngrößenentmischung möglich ist. Die Bildung von feinen Schichten mit von oben nach unten gewichteten Korngrößen-Gradienten grob zu fein, ist aufgrund variierender Fallzeiten unvermeidbar. Um möglichst dünne Schichten gleicher Stärke im Bereich 0,5 - 3 mm zu erzeugen, wurde der mit ca. 20 dm³ befüllte Selbstentladewagen bei einer Spaltbreite von 2 bis 4 mm mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit von ca. 2 m/min manuell über den oberen Ringanker des Lysimeters bewegt (Abb. 4.7). Wegen der Dimensionierung des Ringankers ließ sich der Wagen nicht ganz bis an die Seitenwände des Lysimeters heranzuführen, so dass sich hier ein jeweils 20 cm breiter Bereich mit geneigten Schichten ausbildete (Abb. 4.8).

Abb. 4.7: Lysimeterbefüllung mit Selbstentladewagen

Abb. 4.8: Füllungsbedingte Strukturen im trockenen Sand

4.2.1.6 Berechnung

Die Beregnungsanlage (Abb. 4.4) lief auf einer Holzplattform mit Beregnungsfenster, die auf dem oberen Ringanker des Lysimeters arretiert worden war.

Die aufzubringende Tages-Wasserrate tropfte aus 59 in zwei Reihen gleichmäßig versetzt angebrachten, im Zwischentank verankerten Einmalspritzen mit aufgesteckten, austauschbaren Einmalkanülen. Der Zwischentank wurde über eine Röhre aus einem Vorratstank (max. Inhalt 11 l) gespeist. Die Tanks wurden auf einem Wagen, der über eine Welle von einem Motor angetrieben wurde, über das Lysimeter bewegt. Eine Richtungs-Umschaltvorrichtung, welche ihre Schaltsignale über zwei Kontaktschalter erhielt, ermöglichte ein ständiges Hin- und Herfahren des Wagens über die zu beregnende Fläche. Die Geschwindigkeit des Wagens wurde über ein Labor-Netzgerät ge-

steuert. Je nach Beregnungsintensität wurden bei den Versuchen Geschwindigkeiten von 3 - 6 m/h gefahren. Das heißt der Beregnungswagen bewegte sich innerhalb von 15 - 30 Minuten einmal von einer Seite des Lysimeters zur anderen.

Die Rate des abtropfenden Wassers war durch die Wahl verschieden großer Einmalkanülen zu variieren. Je nach Wahl der vier verwendeten Kanülengrößen betrug die Länge der Aufbringungszeit von 10 mm Wasser zwischen 2 und 14 h.

Die hauptsächlich gewählte Tages-Beregnungsrate lag für alle Versuche bei 10 mm/d während einer Aufbringungszeit von sieben Stunden. Diese Rate ließ nicht zu große Auswirkungen einer inneren Erosion befürchten und ermöglichte die Beobachtung von Sandbefeuchtung, Tracereintrag und Traceraustrag in angemessenen Zeitabschnitten. Um Auswirkungen unterschiedlicher Beregnungsraten zu beobachten, wurde auch mit den Beregnungsraten 5 mm/d, 20 mm/d und 50 mm/d gearbeitet.

Bei einer zu beregnenden Lysimeteroberfläche von $0,9 \text{ m}^2$ ergibt sich die in Tab. 4.1 wiedergegebene Umrechnung der Beregnungsrate von l zu mm.

Tab. 4.1: Umrechnung der Beregnungsrate von l zu mm

Beregnung	schwach	normal	intensiv	sehr intensiv
l	5	10	20	50
mm	4,5	9	18	45

4.2.1.7 Verdunstung

Um eine Abschätzung der täglichen Verdunstungsrate vornehmen zu können, wurden mit Sand gefüllte Kontrollgefäße in Lysimeternähe aufgestellt. Diesen $10 \cdot 10 \cdot 8 \text{ cm}$ großen, zur Hälfte mit Versuchssand gefüllten Gefäßen wurden 100 ml Wasser zugegeben. Täglich wurde gravimetrisch der Wasserverlust gemessen und anschließend die Wassermenge im Gefäß wieder auf 100 ml aufgefüllt. Mit Hilfe der so ermittelten Tages-Verdunstungsraten wurde aus der täglichen Beregnungsrate die effektive Tages-Beregnungsrate berechnet. Wie sich beim Entleeren des Lysimeters bzw. bei der anschließenden Wassergehalts-Bestimmung des Lysimetersandes zeigte, lag die berechnete Verdunstung etwas höher als die tatsächliche Verdunstung. Sie lag aber in einem tolerierbaren Bereich, der das Rechnen mit den effektiven Beregnungsraten gestattete.

4.2.1.8 Lysimeter-Entleerung

Abb. 4.9: Stechwürfel

Um nach Beendigung der Beregnungsversuche genaue Daten zu Wassergehalt, Stoffinhalt und Dichte des Sandes im 1 m^3 -Lysimeter zu erhalten, wurde dieses mittels eines Stechwürfels (s. Abb. 4.9) dm^3 -weise entleert. Dabei wurden die oberen 100 cm des Lysimeters würfelweise für die Ermittlung von Wasser- und Solutgehalt entnommen. Der restliche im Lysimeter befindliche Sand konnte wegen der Abflussszellen nicht mit dem Stechwürfel entnommen werden. Er wurde zusammen mit dem Kies mittels eines Industriestaubsaugers aus dem Lysimeter entfernt und anschließend untersucht.

4.2.2 Füllmaterial Sand

Der für alle Versuche als Füllmaterial verwendete Sand stammt aus einer Sandgrube (R3567470 H5818860) südlich von Ramlingen bei Burgdorf (Abb. 4.10).

Abb. 4.10: Herkunftsgebiet des für die Versuche verwendeten Sandes
(vergrößerter Ausschnitt aus der TK L3524 Hannover Nord und der TK L3526 Burgdorf)

Hier treten über 10 m mächtige, grundwasserferne glazifluviale Vorschüttungsande des Drenthestadials der Saaleeiszeit auf. Die einstige darüber liegende Grundmoräne ist völlig abgetragen und hat nur wenige Kleingeschiebe hinterlassen. Nach Korngrößenanalysen von MUCH (1996) ergibt sich die in Tab. 4.2 dargestellte Korngrößenzusammensetzung:

Tab. 4.2: Durchschnittliche Korngrößenverteilung in Prozent des Feinboden-Materials <2 mm

gS	mS	fS	S	U	T
2000 – 630 µm	630 - 200 µm	200 - 63 µm	2000 - 63 µm	63 - 2 µm	<2 µm
15,75	67,86	10,84	94,45	4,42	1,13

Ca. 4 t Sand wurden an der Luft getrocknet und anschließend für die Versuche aufbereitet.

Mittels Trockensiebung wurde der Sand unter Verwendung von Prüfsieben ($\varnothing$ 20 cm, DIN 4188 Maschenweite 630 μ m und 355 μ m) in eine grobe (630 - 355 μ m) und eine feine Fraktion (< 355 μ m) getrennt. Von der außerdem beim Sieben anfallenden Grobsandfraktion 2000 - 630 μ m wurden für die Nebenversuche mit den kleineren Lysimetern zwei weitere Fraktionen (2 - 1 mm und 1 mm - 630 μ m) gewonnen.

Die Trockensiebung brachte eine ausreichende Trennung. Der grobe Mittelsand (grob) war bis auf geringe Reste der feineren Fraktionen (fein), die vermutlich über Tonbeläge an die größeren Körner gebunden sind, recht sauber zu gewinnen. Die Korngrößenverteilung der Versuchssande wird in Tab. 4.3 wiedergegeben.

Tab. 4.3: Korngrößenverteilung der beiden durch Trockensiebung gewonnenen Versuchssande

Versuchssand	mSg 630 – 355 μ m	mSf 355 - 200 μ m	fS 200 - 63 μ m	gUg 63 - 36 μ m	gUf 36 - 20 μ m	mU – T <20 μ m
Grob	94,19	3,66	0,85	0,05	0,10	1,15
Fein	-	79,25	17,65	0,9	0,70	1,50

Der grobe Versuchssand enthielt vor Versuchsbeginn als Rest der Eindampfung von Bodenlösung 6,69 mg Cl/kg. Nitrat war nicht nachzuweisen.

4.2.3 Tracer

Um den Transport von Stoffen mit dem Sickerwasser zu erfassen, war zwischen folgenden Tracern zu entscheiden:

- wasserlöslich, nicht oder kaum sorbierbar
- hoch wasserlöslich, sorbierbar
- kolloidal filter-, bzw. sorbierbar

Ein „idealer“ Tracer soll Viskosität und Dichte der Trägerflüssigkeit nicht verändern (SCHLINDWEIN 1992). Für 1 boten sich Cl⁻ und NO₃⁻ an, für 2 der nur relativ schwach an Silikatoberflächen sorbierbare Farbstoff Amaranth, für 3 körnungsmäßig kalibrierte, stabilisierte Suspensionen von bodenbürtigem Ton.

4.2.3.1 Chlorid (Cl⁻)

Nach KURTZ und MELSTED (1973) erfüllt Chlorid weitgehend die Voraussetzungen für einen „idealen“ Tracer. Für die Versuche wurde daher Chlorid (Cl⁻) als Tracer eingesetzt. In Anbetracht des Residualgehaltes an Cl⁻ im Sand wurde mit einer Konzentration von 75 mg Cl⁻/l gearbeitet. Die für diese Konzentration nötige Menge Cl⁻ ist in 156 mg Calciumchloriddihydrat (CaCl₂ • 2H₂O) enthalten. Für den ersten Versuch mit der Sandfraktion „grob“ wurde eine Stammlösung, die durch entsprechende Verdünnung für 100 Tage ausgereicht hätte, angesetzt.

Bei dem Versuch II im 1-m³-Lysimeter wurde mit einer Cl⁻-Konzentration von 2 g Cl⁻/l gearbeitet. Die sehr viel höhere Konzentration war nötig, weil die Cl⁻-Analyse vereinfacht werden sollte. Während bei Versuch I die Cl⁻-Analyse durch potentiometrische Titration mit AgNO₃ erfolgte, wurde beim zweiten Versuch das Chlorid indirekt über die elektrische Leitfähigkeit (s. 4.2.4.2) bestimmt.

4.2.3.2 Nitrat (NO_3^-)

Nitrat (NO_3^-) wurde beim ersten Versuch verwandt, um neben Cl^- eine zweite Durchbruchskurve zu erhalten. Hier wurde zweimal eine Stammlösung angesetzt, die bei entsprechender Verdünnung eine NO_3^- -Konzentration von 1,2 g NO_3^- /l für 50 Tage ergab. Für eine Konzentration von 1,2 g NO_3^- /l wurden 2,29 g Calciumnitrat-4-Hydrat $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ /l eingewogen.

4.2.3.3 Amaranth (acid red 27)

Aufgrund seiner Eigenschaften wurde der Farbstoff Amaranth ($\text{C}_{20}\text{H}_{11}\text{N}_2\text{Na}_3\text{O}_{10}\text{S}_3$) gewählt, der auch unter den Bezeichnungen Azorubin, Echtröt, Naphtolröt geführt wird. Dieser Farbstoff ist anionisch und sehr gut wasserlöslich. Der Farbgehalt liegt bei 80 %. Sein Absorptionsmaximum liegt bei λ 521 nm. Nach Versuchen zur Ermittlung einer optimalen Amaranthkonzentration wurde für die Berechnungslösung eine Konzentration von 100 mg/l verwendet. COREY stellte schon 1968 fest, dass sich die Verlagerung anionischer Farbstoffe nicht so schnell wie die des Sickerwassers vollzieht. Er erklärte dies mit Adsorption. Neben dieser sind aber auch Ausfällungen in trockenfallenden Bereichen von Bedeutung. Trocknet ein Sandpaket von oben nach unten aus, lagert sich Amaranth hülsenförmig um die Sandkörner ab, wird aber bei erneuter Befeuchtung wieder gelöst.

4.2.3.4 Ton

Bei allen drei Versuchen am 1 m³-Lysimeter wurde zeitweilig eine Tonsuspension aufgegeben. Durch die Tonzuführung sollte untersucht werden, ob Tonteilchen in gleichem Maße wie Wasser und Farbstoff verlagert werden, bzw. ob sie sich an irgendeiner Stelle anreichern oder gar Bänder bilden.

Die Tonsuspension wurde gewonnen, indem mehrere Kilogramm Bodenmaterial aus tonhaltigen Bereichen einer Parabraunerde in Wasser aufgeschwemmt wurden. Die Dispergierung des Tons erfolgte durch Zugabe von CO_2 in die Lösung. Nach dem Aufrühren der Suspension wurde der schluff- und sandfreie Teil der Suspension abgehebert und für die Versuche gesammelt. Durch die mehrfache Wiederholung dieses Prozesses wurde das flockende Ca-Ion als Ca-Hydrogencarbonat eliminiert und durch dispergierende H-Ionen ersetzt. Die Fallzeiten waren so gewählt, dass die Gewinnung einer schluff- und sandfreien Suspension sichergestellt war. Nach einiger Zeit der Aufbringung des Tons aus dem Bt-Horizont einer Parabraunerde, während der sich keine guten optischen Ergebnisse zeigten, wurde eine weitere Tonsuspension aus Schwarzerde-A-Horizonten gewonnen. Hiermit wurde die Gewinnung dunkleren, schwarzen Tons erzielt, welcher besser erkennbar war als der im Versuchssand kaum auffallende braune Ton der Parabraunerde. Strukturierte Tonakkumulationen z.B. in Form von Bändern konnten nicht beobachtet werden. Vielmehr war eine ganzheitliche von oben nach unten gerichtete Verfärbung der Sandsäule zu erkennen. Die Farbunterschiede zwischen den tonangereicherten Bereichen und der übrigen Sandsäule waren aber so minimal, dass sie bei der Betrachtung der fotografischen Dokumentation nur wenig auffallen.

4.2.4 Analytik

4.2.4.1 Wasser

Abflusswasser: Die Menge abgeflossenen Wassers wurde in 24 h-Intervallen einzeln für jeden der 171 Abflusstutzen gravimetrisch bestimmt.

Bodenwasser (Menge): Das nach Versuchsende im Sandkörper verbliebene Wasser wurde ebenfalls gravimetrisch bestimmt. Dazu wurde der Sandkörper dm³-weise aus dem Lysimeter entnommen, in Tüten gefüllt, gewogen, bei 105° C im Trockenofen getrocknet und anschließend zurückgewogen. Aus der Differenz Feuchtgewicht minus Trockengewicht errechnete sich der Wassergehalt.

4.2.4.2 Chlorid

Chloridbestimmung durch Titration: Während des ersten Lysimeterversuches wurde der Chloridgehalt des täglich aus den einzelnen Austrittsstutzen abfließenden Wassers mittels potentiometrischer Titration mit AgNO_3 (0,01 n) bestimmt. Die Analyse erfolgte an einem Metrohm Titroprozessor.

Chloridbestimmung über Leitfähigkeit: Im zweiten Versuch am 1m^3 -Lysimeter wurden außer Chlorid und später Ton keine weiteren Tracer eingesetzt. Zur Chloridbestimmung konnte daher die indirekte Bestimmung über die elektrische Leitfähigkeit angewendet werden. Im ersten Versuch konnte diese vergleichsweise einfache Methode nicht eingesetzt werden, weil sich sowohl das Nitrat als auch das Amaranth des Perkolats auf dessen Leitfähigkeit auswirkten.

Zur Messung der Leitfähigkeit (LF) wurde ein Konduktometer der Wissenschaftlich-Technischen Werkstätten (WTW) Typ LF 318 mit TetraCon 325 Standard-Leitfähigkeitsmesszelle genutzt. Für die Umrechnung der LF-Werte in Chloridgehalte wurden die Leitfähigkeiten einer Cl^- -Eichreihe bestimmt, mit deren Hilfe eine Regressionsgleichung berechnet wurde, mit welcher später die LF-Werte in Chloridgehalte umgerechnet werden konnten. Die LF-Bestimmung wurde für alle täglich anfallenden Proben der Einzelabflüsse durchgeführt. Proben mit weniger als 70 ml Perkolat täglich wurden zu einer Mischprobe zusammengefasst.

Außer im Perkolat wurde im zweiten Versuch auch im Sandkörper die Cl^- -Verteilung untersucht. Hierzu wurde den für die Bestimmung der Gehalte entnommenen und getrockneten dm^3 -Proben ein Liter Wasser zugegeben. Die Leitfähigkeit der Lösung wurde nach 15-minütigem Schütteln auf einem Überkopfschüttler gemessen. Da beim Trocknen der Proben Chlorid durch Verdunstung in das Papier der Probetüten hineindiffundierte und z.T. ausgeblüht war, mussten die Tüten mitgeschüttelt werden.

Die Chloridbestimmung mittels Leitfähigkeit liefert ungenauere Werte als die Bestimmung mittels Titration, ist dafür aber wesentlich billiger und nimmt weniger Zeit in Anspruch. Für die Aufgabenstellung war die Messgenauigkeit völlig ausreichend. Zur Überprüfung der durch LF-Messung errechneten Chloridgehalte wurden einzelne Proben parallel wiederholt auch der Cl^- -Bestimmung durch Titration unterworfen.

4.2.4.3 Nitrat

Die Nitratbestimmung erfolgte mittels Destillationsmethode. Je nach Menge des vorhandenen Perkolats wurden 2 bis 50 ml in den Destillationskolben gegeben.

4.2.4.4 Amaranth

Die Amaranthmessung erfolgte photometrisch an einem Spectronic 20-Photometer der Firma Bausch und Laub. Wie beim Chlorid wurde mit Hilfe einer Eichreihe eine Regressionsgleichung aufgestellt, mit deren Hilfe Extinktionswerte in Amaranthgehalte umgerechnet werden konnten.

4.2.4.5 Ton

Für die Tonbestimmung zur Auswertung des Versuches III wurden zunächst aus den 810 dem Lysimeter mit dem Stechwürfel entnommenen Sandwürfeln 108 Proben nach geometrischen Auswahlkriterien ausgewählt. Diese Proben wurden in 2 l – Rundhalsflaschen nach Zugabe von einem Liter Wasser 30 min. über Kopf geschüttelt. Der dabei entstandenen Suspension wurde nach entsprechender Fallzeit aus 2 cm Tiefe ein sand- und schluffreies Aliquot von 20 ml entnommen, in Messbecher gefüllt und bei 105°C im Trockenofen eingedampft. Der zurückgebliebene Ton wurde anschließend gravimetrisch bestimmt.

4.2.5 Luftdruckmessung

Bei der Infiltration von Wasser in trockenen Sand kommt es zu linsenförmigen Lufteinschlüssen, in denen möglicherweise eine Erhöhung der Luftdrücke stattfindet. Um diese zu messen, wurden im ersten Versuch am 1m³-Lysimeter sechs Stahlkapillarrohre in Tiefen von 40 und 70 cm, im zweiten Versuch 20 Kapillaren (je zehn in 35 und 65 cm Tiefe) in die Sandsäule eingesetzt. Als Druckaufnehmer diente ein Messgerät der Adolf Thies GmbH + Co KG. Die Messung erfolgte in 30 min-Intervallen.

4.2.6 Bildverarbeitung

Zur Analogfotografie wurde eine Spiegelreflexkamera (Minolta, Modell: Dynax 7000i) verwendet. Bei den Aufnahmen der kleinen Lysimeter kam das Festobjektiv Minolta AF 50 mm 1:1,7, für die Aufnahmen des großen Lysimeters das Zoomobjektiv Minolta AF Zoom 28 – 85 mm 1:3,5 – 4,5 zum Einsatz. Sowohl für Dia- als auch für Bildaufnahmen wurden Filme von Agfa (Dia: CT precisa 100, Bild: HDC 100) benutzt.

Zur Reduzierung von störenden Lichtreflexen wurde ein Zirkularpolarisationsfilter von Heliopan eingesetzt. Trotzdem gelang es nicht vollständig die störenden Lichtspiegelungen zu unterdrücken. Der Kellerraum, der für die Aufstellung des Lysimeters aufgrund gebäudestatistischer Vorgaben als einziger im Inst. für Bodenwissenschaft zur Verfügung stand, wies aufgrund zahlreicher betriebstechnischer Einrichtungen einfach zu viele Störquellen auf.

Die Aufnahmen der Lysimeter erfolgten über Selbstauslöser der auf ein Stativ aufgesetzten Kamera mit Belichtungszeiten von 1 - 2 Sekunden. Die Brennweiten-Einstellung betrug bei den kleinen Lysimetern 50 mm, bei den Frontalaufnahmen des 1 m³-Lysimeters 28 mm und bei den Schrägaufnahmen des 1 m³-Lysimeters 35 mm.

Für die Gewinnung digitaler Bilder aus den Analogbildern wurde ein Flachbettscanner (Plustek, Modell: OpticPro UT12) mit integrierter Durchlichteinheit eingesetzt.

Digitale Aufnahmen wurden mit einer Digitalkamera (Hewlett Packard, Modell: HP PhotoSmart C5340A unter Verwendung der HP PhotoSmart-Fotospeicherkarten 2 MB (Artikel-Nr. C5346A) und 4 MB (Artikel-Nr. C5347A) aufgenommen und später am PC weiterverarbeitet.

Während des Versuches I wurde zusätzlich zu den Fotos täglich eine vier Sekunden lange Filmsequenz mit einem digitalen MiniDV-Camcorder von JVC aufgenommen. Aus allen aufgenommenen Sequenzen resultierte ein Quasizeitrafferfilm, welcher das Fließgeschehen an einer der beiden großen Schauseiten des 1 m³-Lysimeters während des Versuches I wiedergibt.

4.2.7 EDV

Zur Verarbeitung digitaler Bilder wurde das Softwarepaket Corel Draw benutzt. Text- und Datenverarbeitung erfolgten mit der Microsoft Office Software.

4.3 Versuch I (Grober Mittelsand) - Dauer 287 Tage

4.3.1 Zeitlicher Ablauf

Abb. 4.11 liefert ein Schema für den zeitlichen Verlauf des Versuches. Es zeigt die Tages- (RT) und Stundenraten (RS) und die Intensität der Beregnung, das Erfolgen von Abflussereignissen und das Einbringen von Tracern. Der Versuch gliedert sich in sechs Phasen.

Phase I (Tag 1 bis 8): 8 Tage, RT 10 mm CaCl_2 -Lösung (75 mg Cl^-/l), RS 0,71 mm für 14 h/d.

Die Lösung infiltrierte die Sandsäule, verdrängte Luft und legte dabei Fließstrukturen an, die das weitere Fließgeschehen weitgehend bestimmten. Der erste Wasseraustritt aus dem Lysimeter beendete Phase I.

Phase II (Tag 9 bis 45): 37 Tage, RT 10 mm CaCl_2 -Lösung (75 mg Cl^-/l), RS 1,25 mm für 8 h/d.

Bis zum 23. Tag dieser Phase (gesamt: Tag 31) bildete sich ein Fließgleichgewicht zwischen RT und Abflussrate heraus. Da die Ein- und Austrags-Tagesraten nicht gleichzeitige Schwankungen zeigten, werden die Begriffe „Quasi-Fließgleichgewicht“ und „Quasi-Fließgleichgewichts-Zustand“ verwendet. Zu diesem Zeitpunkt glich sich die Chloridkonzentration in der Abflusslösung der der Beregnungslösung an. Zuvor war sie infolge des Austrags von Chloridresten im Sand höher.

Phase III (Tag 46 bis 80): 35 Tage, RT 10 mm $\text{CaCl}_2 / \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – Mischlösung (75 mg Cl^-/l , 1,2 g NO_3^-/l), RS 1,25 mm für 8 h/d.

Der Nitratreintrag begann mit der Zugabe von Ca-Nitrat (1,2g NO_3^-/l), zusätzlich zum Chlorid. Der Quasi-Fließgleichgewichts-Zustand blieb bestehen. Die Chloridkonzentration in Zu- und Ablauf der Lösung blieb gleich. Die Nitratkonzentrationen in Zu- und Ablauflösung wurden etwa nach 25 Tagen (Tag 71) gleich. Phase III endete mit der Beendigung der Cl^- -Zufuhr mit dem Regenwasser. Die Nitratzufuhr wurde fortgesetzt.

Phase IV (Tag 81 bis 120): 40 Tage, RT 10 mm Nitratlösung (1,2 g NO_3^-/l), RS 1,25 mm für 8 h.

Der Quasi-Fließgleichgewichts-Zustand blieb bestehen. Die Nitratkonzentrationen in der Zu- und Abflusslösung blieben gleich. Die Cl^- -Konzentration in der Abflusslösung ging nicht auf Null, aber auf einen ab etwa 7 mg/l sich langsam dem Ordinatenwert Null anschmiegenden Niedrigwert zurück. Das Erreichen des 7 mg/l-Wertes (ca. 9 % der Konzentration der Regenlösung) wurde als Endpunkt der Cl^- -Verdrängungsphase IV gewählt.

Phase V (Tag 121 bis 165): 45 Tage, RT 10 mm (NO_3^- 1,2 g/l, allein, dann im Gemisch mit Amaranth 100 mg/l), RS 3,3 mm/h für 3 h/d. RS musste wegen Verstopfung der bisher verwendeten PRAVAZ 18 und fehlender Zwischengrößen dreimal gewechselt werden. 1,25 – 3,3 – 1,25 – 2,0 mm/h. Von diesen erwies sich 2,0 technisch als am günstigsten. Die Variation der Stundenraten erwies sich als belanglos für die Tagesraten der abgeflossenen Lösung.

Amaranth zeichnete die Fließwege des Wassers (Lösung) nach, die beim ersten Eindringen (Phase I) vorgegeben worden waren, aber nur undeutlich von außen erkannt werden konnten. Das Ende der Phase wurde, ähnlich wie beim Chlorid, zeitlich dorthin gelegt, wo die Nitratkonzentration in der Abflusslösung mit ca. 75 mg 6,25 % der Zugabe-Konzentration erreichte.

Phase VI (Tag 166 bis 287): 122 Tage, Wechsel von Nitratberegnung zu Beregnung ohne Tracerzusatz nur mit Aqua demin. RT 10-20-5-10-50 mit RS 1,25 und 2,0 für 8-16-4-5-25 h/d

Fließgleichgewichts-Speicherwasser wurde durch Ablaufenlassen auf statisches Speicherwasser reduziert, Fließgleichgewichts-Zustand und Speicherwasser wurden erneut eingestellt, ein Fließgleichgewichtszustand bei geringeren Raten wurde erzeugt. Drucksondeneinbau und Starkregen am Tag 270, Bodenentleerung ab Tag 288.

Insgesamt wurden 1813,5 l Flüssigkeit verregnet. Davon traten 1648,11 l wieder aus dem Lysimeter aus. 47,27 l waren in der Sandsäule gespeichert. In der unter dem Sandpaket liegenden Kies-schicht befanden sich 13,39 l. Aus der Summe dieser Werte ergibt sich für Versuch I ein Wasserverlust von 104,73 l. Dieser Wasserverlust ist auf die Verdunstungsrate zurückzuführen, die bei etwa 6 % lag. Die mit Hilfe der Kontrollgefäße bestimmte tägliche Verdunstungsrate lag nahe bei diesem Wert und betrug 4,84 %. Das Minimum der Tages-Verdunstungsrate betrug 1,1 %, das Maximum 13,9 %.

Abb. 4.11: Versuchsablauf

4.3.2 Wasserfluss

Der Durchfluss des Wassers durch die 1,2 m mächtige Sandfüllung verlief wesentlich anders als erwartet. Wie Abb. 4.12 zeigt, wies der Wasserabfluss gegenüber der homogenen Wasserzuführung ein Oszillieren auf und schien neben der zugeführten Wassermenge auch von anderen Parametern abhängig zu sein.

Abb. 4.12: Tagesraten des Wasserein- und austrags während des Versuches I
(verdunstungskorrigierte Werte der Eintragsraten)

Die Präferenz beim Fließen war so ausgeprägt, dass von den 171 Boden-Abflusszellen während der gesamten Laufzeit von 287 Tagen nur 12 durch das abfließende Wasser benutzt wurden. Diese verteilten sich unregelmäßig über die Lysimetergrundfläche, befanden sich aber vorwiegend in der Nähe der Lysimeterwände (s. Abb. 4.13).

Abb. 4.13: Lage der am Abflussgeschehen beteiligten Zellen und Abflusstutzen im Lysimeterboden
und ihr Anteil an der Summe des gesamten Abflusses

An dieser Stelle muss näher auf die Frage eingegangen werden, inwieweit Randeffekte für das in Abb. 4.13 dargestellte Abflussbild verantwortlich waren und ob die Abflussergebnisse überhaupt zu verwerten sind.

Abb. 4.14: Anteile des randlichen und des zentralen Abflussgeschehens am Gesamt-Abflussgeschehen

In Abbildung 4.14 sind die 171 Abflusszellen vier Zonen, innerer Kern bis äußerer Rand, zugeordnet, um statistisch die Verteilung der Abflussmengen auf diese Bereiche darzustellen. Danach entfallen 99 % der Abflussmenge auf den Bereich des inneren Randes, was hier – verteilt auf die Einzelzelle – eine durchschnittliche Abflussmenge/je Zelle von 30,75 l bedeutet.

Neben der geringen Zahl und der ungleichmäßigen Verteilung der vom Wasser benutzten Abflusszellen waren deren sehr unterschiedliche Abflussraten auffällig, die in Tab. 4.4 angegeben sind.

Tab. 4.4: Abflussmengen, -anteile, -ereignisse und -raten der Abflusszellen und -stutzen

Abflussstutzen Nr.	Gesamt- abflussmenge l	Anteil an Abflusssumme %	Tage mit Abfluss d	Ø Abfluss- tagesrate l/d
7	143,90	8,73	37	3,89
55	0,66	0,04	2	0,33
70	809,78	49,13	183	4,43
85	37,92	2,30	18	2,11
144	12,33	0,75	16	0,77
161	5,57	0,34	15	0,37
162	130,72	7,93	90	1,45
163	81,66	4,95	64	1,28
164	3,34	0,20	2	1,67
166	132,15	8,02	52	2,54
167	289,73	17,58	126	2,30
171	0,33	0,02	5	0,07

Allein durch die fünf Abflusszylinder 7, 70, 162, 166 und 167 strömten 90 % des gesamten Lysimeterabflusses ab, wobei der Abflusszylinder 70 allein rund 50 % des Gesamtabflusses bewerkstelligte. Tab. 4.4 zeigt, dass die Dauer des Abflusses aus einzelnen Zellen zwischen 2 und 183 Tagen variierte. Entsprechend streuten die Tagesraten, d.h. Abflussmenge durch Zahl der Abflusstage, zwischen 0,07 und 4,43 l/d.

Abb. 4.15 zeigt am Beispiel der Abflüsse der durch hohe Tagesabflussraten gekennzeichneten Abflusszylinder 7, 70 und 162, dass es während der 287-tägigen Durchflussdauer zu Änderungen in den Flussverläufen kam, wobei alle drei Ausläufe eine starke Oszillation der Tages-Abflussraten aufwiesen.

Abb. 4.15: Zeitgang der Abflussraten an den Ausflüssen 7, 70 und 162

Vom zehnten Tage nach Beginn der Beregnung an näherte sich in dem Glaslysimeter das Fließgeschehen einem Quasi-Fließgleichgewichts-Zustand. (Wasser-Input: Tagesrate der Beregnung $\approx$ Output: Tagesrate des Abflusses). Bei annähernd gleichbleibenden Tagesraten der Beregnung zeigt Abb. 4.16 ein beträchtliches Oszillieren der Tagesraten des Gesamtabflusses.

Abb. 4.16: Zeitgang der Raten in l/d und mm/d: Gesamtabfluss-Tagesraten (1 – 171; blau) und Raten der Abflusszylinder-Gruppen (1 – 85, violett) und (86 – 171; rot). Niederschlagsrate (grün).

Teilt man die Gesamtzahl der Abflusssylinder in die zwei Gruppen 1 bis 85 (linker Lysimeterteil) und 86 bis 171 (rechter Lysimeterteil), so werden die Schwankungen noch ausgeprägter. Dabei ist zu beobachten, dass sich die Maxima und Minima der Tagesraten gegenläufig verhielten. Das legte den Schluss nahe, dass die schon zu Beginn des Durchlaufs angelegten Wasserleitbahnen gewissermaßen „pendelnd“ unterschiedlich stark vom abströmenden Wasser benutzt wurden.

Dies wird noch deutlicher, wenn – wie in Abb. 4.15 gezeigt – der zeitliche Ablauf der Tagesraten an den Abflusssylindern mit maximalen Tagesraten, den Nummern 7 und 70, im Vergleich mit 162, d.h. den drei zugleich am weitesten voneinander entfernt liegenden verfolgt wird.

Der Abflusssylinder 70 bewerkstelligte bei starker Oszillation der Tagesraten über lange Zeiten hinweg fast den gesamten Abfluss des Beregnungswassers, bis er nach 168 Tagen bei der vorübergehenden Unterbrechung der Beregnung versiegte und bei deren Wiederaufnahme nur noch einmal ganz kurz und daran anschließend fast gar nicht mehr Abflusswasser spendete. Anstelle des Abflusssylinders 70 trat nun die Nummer 7. Der Zylinder 162, der zu Anfang des Versuches eine Abflussspende lieferte und dann versiegte, beteiligte sich später – so wie auch Nr. 7 – nur noch sporadisch am Abflussgeschehen.

Dass ein solcher Wechsel durch äußere Faktoren ausgelöst werden kann, zeigt folgender Fall. Am 68. Tag wurde durch einen Motorschaden an der Beregnungsvorrichtung der Beregnungswagen angehalten. Dadurch gelangten gut 70 % der Beregnungs-Tagesrate auf ein eng begrenztes Areal der Oberfläche des Sandkörpers. Dabei wurde die Abflussbahn 7 geöffnet, welche dann bis zum Versuchsende aktiv blieb.

Abb. 4.17: Zeitgang der täglichen Abflussraten der Abflüsse 161, 162, 163, 164, 166 und 167

Zwischen den offensichtlich schon beim Eindringen des Beregnungswassers in den trockenen Sand, also vor Erreichen des Zufluss/Abflussgleichgewichtes angelegten Abflussbahnen, bestand nach diesen Beobachtungen eine Vernetzung. Darüber, in welche der vertikalen Hauptwasserleiter der Strom des abfließenden Wassers geleitet wurde, müssen innere Faktoren entschieden haben. Möglicherweise war der sich im oberen Abschnitt des Sandkörpers intermediär ausbildende Wasserstaukörper mit seiner wechselnden Form dafür ausschlaggebend.

Diese Annahme wird nahegelegt, wenn man – siehe Abb. 4.17 - die Tages-Abflussraten der in Abb. 4.13 am rechten Rand aufgereihten Abflusszellen in ihrem zeitlichen Ablauf verfolgt.

Man möge erkennen, dass ein periodischer Wechsel in der Verteilung erfolgte. So übernahm Zylinder 167 vom 109. bis zum 168. Tag fast allein die Gesamt-Tagesrate des Abflusses in dieser Zylinderreihe.

Hervorzuheben ist aber in diesem Zusammenhang, dass der Wechsel in der Abflussverteilung immer durch kürzere oder längere Unterbrechungen des Abflussgeschehens (Erhöhung des Stauwasservorrates im oberen Teil des Lysimeters ?) oder durch Beendigung und Wiederaufnahme der Beregnung ausgelöst wurde (siehe Abb.4.18).

Abb. 4.18: Wasserinhalt des Lysimeters im Zeitablauf, variiert durch die Raten der Beregnung

Abb. 4.19: Zeitgang der Abflussraten des Lysimeters und der Zahl „aktiver“ Abflüsse

Abb. 4.19 soll zeigen, dass keine Beziehung zwischen der Höhe der Abflussraten und der Anzahl entwässernder Zellen bestand. Man beobachtet, dass auch nach Unterbrechen der Beregnung in den Phasen des Abfließens plötzlich mehr Abflussbahnen aktiviert wurden. Möglicherweise ist dies auf Druckausgleiche in den Lufträumen des Lysimeters zurückzuführen, die zur Aufhebung von Luftbarrieren und damit zur Öffnung von Wasserleitbahnen führten. Auffällig war ferner, dass nach Regenpausen der Wiederbeginn der Beregnung plötzlich bei hohen Durchflussraten viele Bodensutzen aktivierte.

4.3.3 Wasserspeicherung

4.3.3.1 Dynamische Speicherung

Tab. 4.5: Zeitgang der Regen- und Ablauf-Tagesraten und der Tageswasser-Speichermenge

Versuchstag Nr.	Regen- Tagesrate	Ablauf- Tagesrate	Speicherwasser	Regen- Tagesrate	Ablauf- Tagesrate	Speicherwasser
	Liter			mm		
1 – 30	8,56	5,92	64,12	9,54	6,58	71,24
31 – 165	8,43	8,43	77,29	9,37	9,37	85,88
166 – 175	-	1,96	62,77	-	2,18	69,74
176	8,62	0,62	66,41	9,58	0,69	73,79
177 – 180	0,00	0,40	65,71	-	0,44	73,01
181 – 186	8,64	3,02	88,77	9,60	3,36	98,63
187 – 188	-	6,13	88,53	-	6,81	98,37
189 – 190	8,67	2,99	95,02	9,63	3,32	105,58
191	17,21	22,10	92,76	19,12	24,56	103,07
192 – 195	-	4,31	78,94	-	4,79	87,71
196 – 200	4,33	2,46	81,10	4,81	2,73	90,11
201 – 202	-	3,34	79,56	-	3,71	88,40
203 – 220	8,59	7,67	92,68	9,54	8,52	102,98
221 – 270	-	0,82	61,28	-	0,91	68,09
271	43,38	18,51	79,55	48,20	20,57	88,39
272 – 287	-	2,75	63,20	-	3,06	70,22

Tab. 4.5 zeigt: Mit dem Eindringen von Beregnungswasser baute sich im Sandkörper des Lysimeters ein Wasservorrat auf, der nach dem Eintreten des Fließgleichgewichts-Zustandes von Zu- und Abflussrate um den Tag 30 im weiteren Verlauf des Versuches bis Ende Phase V annähernd konstant blieb. Nach Abb. 4.17 betrug in den ersten 165 Tagen des Versuches bei wirksamen Abflussraten von $8,44 \text{ Liter} \cdot \text{d}^{-1}$, entsprechend 9,5 mm, die mittlere Größe des Wasservorrates etwa 77 l entsprechend 85,6 mm. Das waren ca. 7,7 Volumenprozent Fließgleichgewichts-“steady state“ oder dynamische Wasserspeicherkapazität.

Abb. 4.18 zeigt ferner: Nach dem 165. Versuchstag gab es mehrere Versuchsphasen, in denen die Beregnung unterbrochen wurde. In allen diesen Phasen sank der Wasservorrat bei fortlaufendem Ablauf des Wassers ab und näherte sich langsam anschießend einem neuen niedrigeren, statischen Vorratsniveau von ca. 58 l, entsprechend 64,4 mm. Wie der Abschnitt nach dem 220. Versuchstag zeigt, dauerte diese Einstellung bis zu 50 Tagen.

Abb. 4.18 zeigt aber auch, dass die dynamische Wasserkapazität offenbar keine feste Größe war, sondern sich nach jeder „Entleerung“ durch Unterbrechung der Beregnung neu mit unterschiedlicher Höhe aufbaute. Während die Störung der Beregnung am Versuchstag 68 fast keine Veränderung der dynamischen Speicherkapazität bewirkte, stieg diese nach den Ablaufphasen bei Wiederaufnahme der Beregnung ab Versuchstag 176 bzw. 181 statt auf 77 l auf Beträge um die 100 l.

Dies legte die Hypothese nahe, dass durch das Ablaufenlassen eines Teils des Speicherwassers eine Umgestaltung des von Wasser gebildeten Lamellen- und Fingersystems hervorgerufen wurde, das beim erneuten Beregnen eine vermehrte Ausbildung von Luftbarrieren bewirkte.

4.3.3.2 Statische Speicherung

4.3.3.2.1 Ψ - Θ -Beziehungen

Dieser Absatz soll den zwei Zwecken dienen, Folgendes zu schaffen:

- Grundlagen für die Interpretation der visuellen Beobachtungen in Abs. 4.3.4 und
- Grundlagen der Interpretation des Tracertransportes in 4.3.5

Der nächste Abschnitt befasst sich mit der visuellen Verfolgung der Wasserströme im Glaslysimeter. Deren Sichtbarwerden beruhte auf der unterschiedlichen Lichtreflexion der Quarzkorn-Oberflächen zu den Porenwänden hin, wenn diese unterschiedliche Grade der Wasserfüllung aufwiesen. Dies war besonders dann der Fall, wenn die Poren soweit von Wasser entleert (oder erst soweit aufgefüllt) waren, dass der kapillare Zusammenhang des schnell wasserleitenden Porensystems aufgehoben war. Das äußerte sich im sprunghaften Rückgang der Wasserleitfähigkeit auf sehr niedrige Werte. Nur an den Kornberührungsstellen (Porenwinkelwasser) stand noch Meniskwasser, das nur über dünne Wasserfilme auf den Kornoberflächen untereinander verbunden war. Bei welcher Saugspannung wurde im Verlauf der Entwässerung dieser kritische Punkt erreicht? Erfahrungswerte bei Dünenständen liegen etwa bei 15 - 20 % Wasserfüllung des Gesamt-Porenvolumens (MEYER 2002).

Die Methodik zur Beantwortung dieser Frage stieß auf folgende Probleme: a) die Verwendung von Sand-Lagerungsdichten, wie sie im Lysimeter tatsächlich auftraten (siehe dazu 4.3.3.2.3: Sanddichten am Ende des Perkulationsversuches) und b) die Tatsache, dass der genannte kritische Punkt nur von der Seite der Entwässerung, nicht von der Seite der Aufsättigung her sicher erfasst werden konnte. Die Entwässerung ließ sich bis zu diesem Abrisspunkt mit Hilfe der porösen Platte (PP) im Drucktopf, darunter nur mit der Zentrifugenmethode (ZE) verlässlich durchführen.

4.3.3.2.2 Stechzylinderproben

In 100 ml-Stechzylindern wurde der Lysimetersand unter feuchter Verdichtung auf die Trockendichte des Materials im oberen Teil des Lysimeters (nach Versuchsende) eingestellt, von unten her langsam vollständig mit Wasser gesättigt und auf der porösen Platte (PP) im Drucktopf in Stufen bis pF 1,8, entsprechend 60 cm Wassersäule, entwässert. Danach wurde – zum Vergleich – im Drucktopf bzw. mit der Zentrifuge weiter entwässert. Die Daten aus zwei Versuchen sind in Tab. 4.6 zusammengestellt.

Tab. 4.6: Dichte, Porenvolumen und saugspannungsspezifische Wassergehalte (Vol.-%);
PP: poröse Platte im Drucktopf, ZE: Zentrifuge, P: Pore

Trockendichte g/cm³	Porenvolumen %	pF	< 0,7	0,7 bis 1,0	1,0 bis 1,5	1,5 bis 1,8	1,8 bis 2,0	2,0 bis 2,3	2,3 bis 2,5	2,5 bis 2,7	2,7 bis 3,0	3,0 bis 3,7	3,7 bis 4,2	> 4,2
		cm WS	< 5	5 10	10 30	30 60	60 100	100 200	200 315	315 500	500 1000	1000 5000	5000 15000	> 15000
		P Ø µm	> 600	600 300	300 100	100 50	50 30	30 15	15 10	10 6	6 3	3 0,6	0,6 0,2	< 0,2
1,47	44,5	PP/ZE Vol.-%	3,4		31,4	5,2	1,8	1,1	0,6	0,0	0,2	0,2	0,3	0,3
1,49	43,8	PP Vol.-%	4,1	3,7	31,7		1,2	0,6	0,4	0,1	2,0			

Nach Tab. 4.6 ist der kapillare Abriss schon bei etwa 30 cm Wassersäule entsprechend pF 1,5 und 100 cm Porendurchmesser recht vollständig erfolgt. Dies deckt sich einigermaßen mit dem rechnerischen Wert für die Intergranularen des Sandes $\emptyset = (630 + 355) : 2 : 3 = 164 \mu\text{m}$, entsprechend 18 cm WS Saugspannung.

Überträgt man die Werte der Tabelle auf die Sandfüllung des Lysimeters, indem man die gleiche Trockendichte von 1,45 für alle Tiefen annimmt und indem man von einem kapillaren Gleichgewichts-Sättigungszustand in allen Tiefen ausgeht, so entsteht die in Abb. 4.20 dargestellte Kurve, die zugleich eine Ψ - Θ -Funktion darstellt.

Die so errechnete gesamte statische Speicherwassermenge ist mit 119 mm (107 %) fast doppelt so hoch wie die nach Ablauf des Lysimeterwassers verbleibende Menge an statisch gebundenem Wasser (58 l = 64 mm) und noch 38 % höher als die im Fließgleichgewicht bestehende Speichermenge.

Abb. 4.20: Rechnerische Tiefenverteilung des statisch gespeicherten Wassers im Lysimeter im kapillaren Gleichgewichtszustand bei Annahme gleicher Dichte der Sandfüllung

Das Mengenmaximum der Porengrößenverteilung liegt hier theoretisch bei etwa 120 μm . Das sind ca. 25 % des mittleren Korndurchmessers. Zusammen mit dem Gesamtporenvolumen von 43,8 % bedeutet dies, dass der trocken eingefüllte Sand – handelte es sich um kugelförmige Körner – eine überwiegend kubisch lockerste Packung einnimmt. Tatsächlich ist aber das Strukturbild des Sandes und die Wasser-Mengenverteilung völlig anders. Dies zeigt die Zerlegung des Sandkörpers in 900 kubische Proben von je 1 dm^3 Volumen am Ende der Durchlaufversuche, dargestellt in Abb. 4.21.

Abb. 4.21: Tiefenabhängigkeit der Sand-Trockendichte im statischen Zustand am Versuchsende. Luft- (LPV) und Wasserporen-Anteile (WPV) am Gesamtporenanteil (GPV) bei insgesamt 47,27 l Speicherwasser.

4.3.3.2.3 Sand-Trockendichte am Ende des Perkolationsversuches

Nach Abschluss der Durchlaufversuche wurde der Füllsand des Lysimeters in ungestörter Lagerung in Form von 900 Blöcken von je 1 dm^3 entnommen. Daran wurden Trockendichte und Wassergehalt gemessen.

Nach dem Einfüllen hatte der trockene Sand eine Gesamtschüttdichte von $1,727 \text{ g/cm}^3$. Am Ende des Versuchs war die Oberfläche des Sandes um 1 cm abgesunken. Das entspricht einer Zunahme der Gesamttrockendichte auf $1,744 \text{ g/cm}^3$.

Abb. 4.22 gibt einen Überblick über die Verteilung der Trockendichte im Lysimeter nach Versuchsende. Dazu liefert Abb. 4.21 die Durchschnittsdichten und Wasserporen-Anteile für jede der Tiefenschichten, siehe Abb. 4.22 Aufsicht. Die Dichten waren sehr unterschiedlich und streuten besonders in den oberen vier Schichten.

Dies bedarf einer Interpretation. Die Korngrößenverteilung der verwendeten Sandfraktion 630 bis $355 \mu\text{m}$ Ø war so beschaffen, dass bei mechanischer Verdichtung sehr große Dichten entstehen konnten, weil sich kleinere Körner dieser Fraktion in die Kugelporen kubisch angeordneter großer Körner einfügen konnten (eine typische Erscheinung sog. „gleichkörniger“ fluvialer Sande in Urstromtälern). Zur Klärung, welchen Anteil an der Dichteverteilung bereits der Vorgang des trockenen Einfüllens des Sandes und welchen Anteil der Vorgang des Perkolierens des Wassers gehabt hat, wurde von MEYER (2002) in einem aus Bohrab schnitten zusammengesetzten Rohr das trockene Einfüllen in unterschiedlicher Weise (z.B. durch Klopfen) vollzogen, bis eine gleiche Gesamttrockendichte wie oben angegeben erreicht wurde. Es resultierte eine vertikale Dichtezunahme von der obersten 10 cm -Schicht mit $1,49 \text{ g/cm}^3$ zur untersten Schicht in 90 bis 100 cm Tiefe auf $1,95 \text{ g/cm}^3$.

Vergleicht man mit diesen Modelldaten die Messdaten im Lysimeter nach Versuchsende und berücksichtigt dabei die Senkung der Oberfläche, so ergaben sich in den oberen drei Tiefenabschnitten Gewinne an Porenvolumen von insgesamt $9,1$ Volumenprozent (Maximum: Tiefe 10 bis 20 cm mit $+ 4,9 \text{ Vol.-%}$) und in den Tiefenabschnitten von 30 bis 80 cm Verluste von insgesamt $15,2 \text{ Vol.-%}$ (Maximum: Tiefe 50 bis 60 cm mit $- 6,9 \text{ Vol.-%}$). Der Differenz von Gewinn und Verlust in Höhe von $6,1 \text{ Vol.-%}$ stand der errechnete Gesamtporenverlust durch Setzung von 1 cm gleich $8,1 \text{ Vol.-%}$ gegenüber. Dies kann bei einer Anfangsporenmenge im Lysimeter von 348 l in Anbetracht der angewendeten unterschiedlichen Messansätze als eine gute Übereinstimmung betrachtet werden.

Diese Daten ließen annehmen, dass der Vorgang der Perkolation mit seiner im Folgenden infolge unterschiedlicher hydrostatischer und pneumatischer Drücke entstehenden Umverteilung von Sandkörnern im oberen Teil des Lysimeters Luftblähungen mit „Schwellungen“ des Sandes, im unteren Teil dagegen unter Setzung „Schrumpfungen“ bewirken konnte. Diese vollzogen sich offenbar auch nebeneinander innerhalb der einzelnen Schichten und erzeugten so das dargestellte Dichtemosaik.

Anschließend wird in Abb. 4.23 in Form von Häufigkeitsverteilungen der Gesamtporenvolumina innerhalb der einzelnen Lysimeterschichten die mosaikhafte Darstellung der Dichteverteilung in Abb. 4.22 statistisch dargestellt. Die oberen fünf Schichten zeigten eine ausgeprägte eingipfelige Verteilung, die von Schicht VI an breiter wurde und ab Schicht VII zur Zweigipfeligkeit tendierte. Dabei differenzierten sich zwei Bereiche heraus: Ein dichter ($D = 1,93 \text{ g/cm}^3$; GPV $25 - 30 \text{ Vol.-%}$) und ein lockerer ($D = 1,52 \text{ g/cm}^3$; GPV $40 - 45 \text{ Vol.-%}$).

Abb. 4.22: Verteilung der Trockendichte in der Sandfüllung des Lysimeters, 900 Einheiten zu je 1 dm³

Abb. 4.23: Verteilung der Gesamtporen-Volumina der 1 dm³-Sandblöcke in den Schichten I bis X

4.3.3.2.4 Statischer Wassergehalt am Ende des Perkulationsversuches

Unter den Bedingungen einer so starken Streuung der Lagerungsdichte und des vertikalen Dichtegradienten erscheint die Verwendung der in dem Abschnitt 4.3.3.2.1 dargestellten Ψ - Θ -Beziehungen für die Interpretation der Wasserverteilung wenig geeignet. Abb. 4.21 lässt zwar tendenziell erkennen, dass im Lysimeterprofil mit zunehmender Dichte der Wassergehalt um wenige Volumenprozent stieg, dass aber sonst eine auffällige vertikale Gleichförmigkeit des Gehaltes an wassergefüllten Poren herrschte. Deren Anteil lag zwischen 2 und 8 Vol.-%.

Ziehen wir zum Vergleich das Diagramm 4.20 heran und bedenken wir, dass bei dem gefundenen Dichteprofil des Lysimeters der vertikal absteigende Rückgang des GPV von 44 Vol.-% (oben) auf 28 Vol.-% (unten) hauptsächlich in einem Verlust an größeren Poren bestand, dann lag der prozentuale Anteil der wassergefüllten Poren am GPV noch weit unter dem theoretisch möglichen kapillar-hydrostatischen Wasserhaltevermögen. In den oberen sieben Abschnitten lag der Grad der Porenfüllung für Wasser durchweg über dem theoretisch zu erwartenden kapillaren Gleichgewichts-Wassergehalt, in Tiefe acht etwa auf gleicher Höhe, in den beiden unteren Abschnitten weit darunter.

Dies gestattet die Interpretation, dass die Bedingungen für die Wasser-Zurückhaltung in den einzelnen Schichten andere Ursachen hatte als den Bezug auf den „Grundwasserspiegel“ an der Basis mit der Einstellung eines darauf bezogenen kapillaren Gleichgewichts-Zustandes. Die hohen Luftporenanteile in den basisnahen Schichten des Lysimeters ließen als wesentliche Ursache für das dargestellte Phänomen die Ausbildung tragender Luftkissen annehmen.

Die Verteilung der Porenwasser-Volumenanteile in den oberen fünf Schichten (Abb. 4.24 I -V) war recht gleichmäßig. Darunter folgte als dichteste Schicht die Nummer VI, die mit 7 – 9 Vol.-% Wasserporen-Volumen als eine zwischengeschaltete Speicherschicht für Wasser auffiel. Sie wurde von weniger wasserhaltigen, überwiegend 4 – 6 Vol.-% Wasser und 24 Vol.-% Luft enthaltenden Schichten mit etwa gleicher Dichtestreuung und damit wohl auch gleicher Struktur getragen. Beim Wasser der Schicht VI dürfte es sich im Wesentlichen um Wasser in Poren von $< 100 \mu\text{m}$ mit Saugspannungen von über 30 cm Wassersäule gehandelt haben.

Abb. 4.24: Wassergehalte in Vol.-% in den kubischen 1 dm³-Blöcken der Sandfüllung nach Abfluss-Ende

Das schichtweise oder verstreute Auftreten höherer finaler Wassergehalte in den verschiedenen Schnittbildern der Abb. 4.24 legt die Interpretation nahe, dass darunter kapillare "Dochte" fehlten, welche eine Entwässerung herbeigeführt haben könnten. Ob solche Dochte zugleich auch die Bahnen darstellten, auf denen beim Fließen des Wassers im Input-Output-Fließgleichgewichts-Zustand das ungespannte Wasser abwärts gesickert ist, hat einen gewissen Grad an Wahrscheinlichkeit.

Betrachtet man in den horizontalen und vertikalen Schnittbildern in Abb. 4.24 den finalen Feuchtezustand oberhalb der "aktiven" Ausflusszellen am rechten Lysimeterrand, so waren hier die Literkompartimente relativ gut entwässert – abgesehen von der basalen Feuchtlage, innerhalb derer möglicherweise über kurze Distanzen eine laterale Ableitung des Wassers erfolgen konnte.

Die Situation oberhalb der wenigen "aktiven" Zellen am linken und vorderen Rand des Lysimeterbodens war dagegen weniger eindeutig. Sie ließ vermuten, dass hier die "Bahnfindung" des Sickerwassers erst unterhalb Schicht VI erfolgte.

Abb. 4.25 zeigt die Häufigkeitsverteilungen des mit Wasser gefüllten Anteils (Vol.-%) des gesamten Porenvolumens der 1 dm³-Sandblöcke in den einzelnen Tiefenschichten der Lysimeter-Sandfüllungen – entsprechend den Mosaikdarstellungen in Abb. 4.24. Auch hier zeigte sich in den oberen Schichten I – IV, auch in den Schichten VI und VII unter Schulterbildung, eine ausgeprägte Eingipfeligkeit. Bei zunehmendem Wassergehalt (Vol.-%) in Schicht VIII und IX verbreiterte sich die Kurve der Häufigkeitsverteilung. Schicht V und X werden durch eine ausgeprägte Zweigipfeligkeit charakterisiert.

Abb. 4.25: Verteilung der Wasserporen-Volumina der 1 dm³-Sandblöcke in den Schichten I bis X

4.3.4. Visuelle Befunde

Versuch I wurde wie alle Vorversuche fotografisch dokumentiert. In 24 h-Abschnitten wurden Bilder von den Lysimeterseiten aufgenommen. Von den beiden großen Schauseiten wurde jeweils eine Frontalaufnahme sowie eine Schrägaufnahme gemacht. Wegen zahlreicher Reflektionen, welche von Körpern in unmittelbarer Umgebung des Lysimeters stammten, die sich auch bei den Schrägaufnahmen trotz der Verwendung eines Polarisationsfilters nicht völlig unterdrücken ließen, werden hier nicht die Originalaufnahmen, sondern daraus hergestellte Skizzen verwendet.

Abb. 4.26: Fließmuster während des Eindringens von Lösung in den **lufttrockenen** Sand (Versuchstag 1 bis 10)

Abb. 4.26 zeigt das Fließgeschehen an einer der Frontseiten während des Eindringens von Beregnungslösung in den lufttrockenen Sand, also während der ersten zehn Versuchstage. Es ist zu erkennen, dass es nicht zur Bildung einer ebenen Wasserfront kam. Schon nach dem ersten Versuchstag bildeten sich oberflächennah sechs Zonen heraus, die präferentiell befeuchtet wurden. Auffällig war dabei, dass nicht durchgängige Abflusssdochte entstanden, sondern Systeme von

vertikal aufeinander folgenden Wasserlamellen. Diese wurden durch trockenbleibende Bereiche voneinander getrennt und dehnten sich zunehmend lateral aus. Der vertikale Wasserfluss zwischen diesen Lamellen muss über sehr feine, hier nicht sichtbare Bahnen (Anastomososen) erfolgt sein. Die laterale Bewegung orientierte sich in diesem Versuch ausschließlich an Schichtoberflächen, die bei der Lysimeterbefüllung entstanden waren. Wahrscheinlich ist, dass es in diesen Bereichen zu einem Stau der von oben nach unten verdrängten Luft und damit zur Bildung von Luftkissen kam, welche die Wasserlamellen trugen und einen lateralen Fluss ermöglichten. Die ausgeprägte laterale Wasserbewegung entlang den Schichtoberflächen war besonders gut nach vier bis sechs Versuchstagen zu erkennen. Nach dem zehnten Versuchstag hatte sich entlang der gesamten Lysimeterwand eine durchgehende Befeuchtung des Sandes ausgebildet, wobei einige Bereiche deutlich feuchter als andere erschienen.

Abb. 4.27 zeigt das Fließgeschehen an der selben Frontseite nach 125 bis 155 Versuchstagen. Das Lysimeter war hier seit ca. 110 Tagen befeuchtet und hatte schon eine anhaltende Passage von Chlorid- und Nitratlösung hinter sich. Die Färbung mit Amaranth zeigt also im Gegensatz zu Abb. 4.26 das Eindringen einer Lösung in ein lösungserfülltes System. Seit Versuchstag 120 wurde der Beregnungslösung der Farbstoff Amaranth beigelegt. Der Farbstoff breitete sich zuerst in den Bereichen aus, die schon beim Befeuchten des trockenen Sandes präferentiell mit Lösung gefüllt worden waren. Auch die weitere Ausdehnung der Farbstofflösung verlief etwa auf den primär angelegten Befeuchtungswegen. So blieb beispielsweise ein Areal in der unteren linken Ecke, das während der ersten Eindringphase die längste Zeit zur Befeuchtung benötigt hatte, am längsten farbstofffrei. Hier ist für den Farbstoffeintrag neben dem Massenfluss auch wieder die Diffusion des Farbstoffes von Bedeutung.

Diese Phänomene weisen darauf hin, dass die bei der Erstbefeuchtung angelegten Fließwege dauerhaft das nachfolgende Fließgeschehen festlegten. Deutlich ist auch wieder eine laterale Bewegung auf den einst angelegten Wasserlamellen zu erkennen.

Abb. 4.27: Fließmuster während des Eindringens von Amaranthlösung in den **feuchten** Sand (Versuchstag 125 bis 155)

Abb. 4.28 zeigt das Fließgeschehen an der selben Lysimeterseite an den Versuchstagen 186, 200 und 270, also während der Amaranth-**Auswaschung**. Die Bilder deuten wiederum darauf hin, dass die alten Fließbahnen nach wie vor bestanden und den Wasser- und Stofftransport im Lysimeter vgaben.

Abb. 4.28: Fließmuster-Bilder während der Amaranth-Auswaschphase (Versuchstag 186, 200 und 270)

Auch beim Auswaschen des Amaranths gaben sich die vorgeprägten präferentiellen Fließzonen des Wassers wieder deutlich zu erkennen. Bereiche – wie z.B. unten links und rechts, die bei der Erstbefeuchtung lange trocken geblieben waren und zu denen der Farbstoff auch später – nach offenbar nur schwacher Befeuchtung – kaum Zutritt hatte, blieben weiterhin bestehen. Der große Eindringlobus in der Mitte war zugleich der Bereich bevorzugter Auswaschung, während die nur zögernd mit Amaranthlösung gefüllten Zonen auch deren Auswaschung verzögerten. Zu vermuten ist, dass hier die Lösungsverdrängung (Lösungsdynamik) gegenüber der Diffusion des Amaranths aus den statischen Zonen in die Zonen mit bewegter Lösung von untergeordneter Bedeutung wurde.

4.3.5 Tracer

4.3.5.1 Chlorid

Der Sand im Lysimeter wurde 80 Tage lang vom ersten Versuchstag an mit je neun Litern (10 mm) Chloridlösung beregnet. Die Konzentration der Lösung betrug 75 mg/l. Berücksichtigt man den verdunstungsbedingten Wasserverlust aus den fallenden Regentropfen, den von der Sandoberfläche, den aus dem abtropfenden Sickerwasser und den aus den Auffanggefäßen, so liegt die Chloridkonzentration des abgeflossenen Wassers im Bereich zwischen 80 und 82 mg/l. Durch die 80 Tagesgaben à 675 mg wurden insgesamt 54 g Chlorid in das Lysimeter eingetragen. Bis zum Versuchsende nach 287 Tagen wurden dagegen 60,46 g Chlorid aus dem Lysimeter ausgetragen. Wir haben also zunächst eine Wiederfindungsrate von 111,96 %. Wird der vorgegebene Chloridgehalt des Sandes berücksichtigt und der Summe aufgegebenen Chlorids zugeschlagen, hätten insgesamt 65,37 g Chlorid aus der Sandsäule ausgetragen werden können. Von dieser Menge wurden aber nur 92,48 % in der Summe der täglichen Abflusslösungen wiedergefunden. Der Rest von 4,92 g ist in der Sandsäule verblieben - vermutlich in den Bereichen, in denen kaum ein Wasserfluss stattgefunden hat. Die Chlorid-Wiederfindungsrate im Verlauf des Versuches wird in Abb. 4.29 wiedergegeben.

Abb. 4.30 gibt die Differenz zwischen der täglichen Eintrags- und der täglichen Austragsmenge an Chlorid wieder. Die Oszillationen im Zeitablauf beruhen vorwiegend auf den variierenden täglichen Abflussraten. Festzuhalten ist an dieser Stelle, dass von Beginn des Abflusses an mehr Chlorid ausgetragen, als mit der Beregnungslösung eingetragen worden ist. Neben dem Chlorid der Beregnungslösung ist also auch immer das im Sand primär gelöst enthaltene Chlorid mit der Abflusslösung ausgetragen worden.

Abb. 4.29: Ausgetragenes Chlorid in % der eingetragenen Chloridmenge

Abb. 4.30: Differenz der Tagesraten von Ein- und Austrag an Cl^- bezogen auf das Lysimeter; positiv: Eintragüberschuss, negativ: Austragüberschuss

Aufgrund des vorgegebenen Cl^- -Gehaltes des Versuchssandes lagen die Cl^- -Konzentrationen der Abflusslösungen an den ersten Tagen weit über denen der Beregnungslösung (s. Abb. 4.31). Diese hohen Werte resultieren aber sicherlich auch aus verdunstungsbedingten Erhöhungen der Cl^- -Konzentrationen in der Abflusslösung. Weil während der ersten Versuchstage mit Abfluss die Abflussraten noch sehr gering waren, ließ die Verdunstung aus den Auffangbehältern die Cl^- -Konzentrationen überproportional ansteigen. Insgesamt lagen die in den Ablauflösungen gemessenen

Cl^- -Konzentrationen während der Versuchsphase I - III (Tag 1 - 80) von Beginn an in dem zu erwartenden Bereich von 80 bis 85 mg Cl^- /l. Nach Beendigung des Cl^- -Eintrages gingen die Werte der Abflusslösung innerhalb von etwa 30 Tagen auf 5 - 10 mg Cl^- /l zurück. Geringe Cl^- -Konzentrationen von 2 - 5 mg Cl^- /l waren bis zum Versuchsende festzustellen. Anzunehmen ist, dass es sich hierbei um Chlorid handelt, das ganz langsam aus den „inaktiveren“ Lysimeterbereichen verdrängt worden, oder aus diesen heraus diffundiert ist.

Abb. 4.31: Cl^- -Konzentration in den Abflusslösungen aller fördernden Ablaufstutzen

4.3.5.2 Nitrat

Da der natürliche Chloridgehalt des Sandes speziell zu Beginn des Versuches die Austragskurve des Chlorids beeinflusst hat, wurde Nitrat eingesetzt, um den Eintrags- und Austragsvorgang nach Möglichkeit deutlicher zu erfassen.

Nitrat wurde dem Lysimeter während der Phasen II, III, IV und Teilen der Phase V an insgesamt 94 Tagen zugeführt. Am Anfang geschah dies in Form einer Chlorid/Nitrat-Mischlösung, die vom 80. Versuchstag an durch eine reine Nitratlösung ersetzt wurde. Diese wiederum wurde ab Versuchstag 121 durch eine Nitrat/Amaranth-Mischlösung abgelöst. Die Nitratkonzentration belief sich aber immer auf 1,2 g/l. Da die Tagesrate der Beregnung während der gesamten Phase der Nitratgabe auch wieder neun Liter (10 mm) betrug, wurden also täglich 10,8 g Nitrat in das Lysimeter eingetragen, was über die ganze Zeit der Nitratgabe eine Summe von 1015,2 g ausmachte. Davon wurden bis zum Versuchsende 989,6 g mit der Abflusslösung wieder ausgetragen. Das ergab eine Wiederfindungsrate von 97,48 %. Der Rest von 25,63 g Nitrat wurde in der Sandsäule zurückgehalten. Es ist anzunehmen, dass ähnlich wie beim Chlorid das restliche Nitrat in solchen Bereichen des Lysimeters verblieben ist, in denen nur ein geringer Wasserdurchsatz stattfand und der Nitrataustausch über die Diffusion erfolgte. Abb. 4.32 gibt die Wiederfindungsrate des Nitrats im Verlauf des Versuchs wieder.

Abb. 4.33 veranschaulicht - wie Abb. 4.30 für das Chlorid - die Differenz zwischen Eintrag und Austrag des Nitrats. Auch hier war wieder eine zeitliche Schwankung der Differenzen festzustellen, die aus den unterschiedlichen Tagesraten des Abflusses resultierte.

Da hier im Gegensatz zum Chlorid keine Vorbelastung des Sandes vorgelegen hat, stimmten beim Nitrat Ein- und Austragsmengen weitgehend überein.

Abb. 4.32: Ausgetragenes Nitrat in % der eingetragenen Nitratmenge

Abb. 4.33: Differenz der Tagesraten von Ein- und Austrag an NO₃⁻ bezogen auf das Lysimeter;
positiv: Eintragüberschuss, negativ: Austragüberschuss

Betrachtet man in Abb. 4.34 summarisch die Nitratkonzentration in den täglich aufgefangenen Ablauflösungen aller Ablaufstutzen, so sieht man, dass erst nach ca. zwanzig Tagen des Nitratreintrages die Konzentration (etwa 1,1 g/l) annähernd das Niveau der Beregnungslösung (1,2 g/l) erreichte. Berücksichtigt man dabei die mögliche verdunstungsbedingte Konzentrierung in der Beregnungslösung, so erreichten die Nitratgehalte in der Ablauflösung erst nach etwa dreißig Tagen das Niveau der Beregnungslösung.

Abb. 4.34: Nitratkonzentration in der Ablauflösung der Einzelabflüsse

Nach Ende der Nitratzufuhr dauerte es wieder ca. zwanzig Tage, bis sich die summarische Nitratkonzentration in den Ablauflösungen auf einen Wert um die 0,1 g/l einstellte. Diese ging dann während des weiteren Versuchsgeschehens auf Minimalwerte um die 20 mg/l zurück. Festzuhalten ist also wieder, dass sowohl für das Erreichen eines Nitrat-Fließgleichgewichts-Zustandes, als auch für das Einstellen der End-Minimalkonzentration jeweils ca. zwanzig Versuchstage benötigt wurden.

4.3.5.3 Amaranth

Nach 121 Tagen wurde die Phase V des Versuches durch die Zugabe des Farbstoffes Amaranth zum Nitrat in die Beregnungslösung eingeleitet. Der Farbstoff sollte zum Einen die Fließwege des Wassers entlang der Lysimeterwände sichtbar machen. Zum Anderen sollte mit dem Farbtracer mittels photometrischer Konzentrationsmessung der Ablauflösungen eine dritte Austragskurve aufgenommen werden. Ersteres gelang sehr gut, Letzteres gestaltete sich sehr schwierig, da der Farbstoff in weit höherem Maße als erwartet sorbiert und damit in der Sandsäule festgehalten wurde.

Amaranth wurde an 45 Tagen in das Lysimeter eingetragen. Die Amaranthkonzentration der Beregnungslösung betrug dabei 100 mg/l. Während der Amaranth-Eintragsphase lag die tägliche Beregnungsrate bei 10 mm (9 Liter), was bedeutet, dass pro Tag 900 mg Amaranth in das Lysimeter eingebracht wurden. Insgesamt kamen 40,5 g Amaranth mit der Beregnungslösung in den Versuchssand. Mit der Ablauflösung wurden aber nur 21,82 g wieder ausgetragen. Das ergibt in der Ablauflösung eine Wiederfindungsrate von 53,87 %. In Abb. 4.35 wird diese dargestellt.

Abb. 4.35: Ausgetragenes Amaranth in % der eingetragenen Amaranthmenge

Aus Abb. 4.36, in welcher die Differenz zwischen Amarantheintrag und Amaranthaustrag dargestellt wird, geht deutlich hervor, dass weitaus mehr Amaranth in das System eingetragen als ausgetragen wurde. Wie oben schon bemerkt, wurde der Farbstoff sehr stark sorbiert. Dies wurde auch dadurch begünstigt, dass im Gegensatz zu den vorausgegangenen Tracern nach Beendigung der Amaranthgabe die Beregnung des Lysimeters vorübergehend unterbrochen wurde und anschließend nur in mehreren kurzen Blöcken mit nicht einheitlichen Beregnungsraten wieder aufgenommen wurde. Während der ersten reinen Ablaufphase ohne Beregnung (Tag 166 – 175) verlagerte sich der Farbstoff nicht ausschließlich mit dem sich vertikal bewegendem Wasser nach unten, sondern setzte sich an den Oberflächen von Sandkörnern in „trocken gefallen“ Bereichen ab.

Bei Wiederbefeuchtung bzw. Wiederanschluss an das Abflusssystem, unter erneuter Beregnung, reichte die Kontaktzeit des Wassers nur dazu aus, geringe Anteile des Farbstoffes wieder in Lösung zu bringen. Weitere Anteile des Farbstoffes wurden nach Ende der Beregnung auch dadurch festgelegt, dass durch Diffusion Amaranth aus ursprünglich am Wasserfluss beteiligten Bereichen in solche gelangte, die bislang kaum am Wasserfluss beteiligt gewesen waren. Dies wird auch bei der Betrachtung der Fließbilder (Abb. 4.26 und 4.28) deutlich. Der Farbstoff benötigte für das Eindringen in die weniger gut durchströmten Bereiche (vor allem die unteren Ecken) lange Zeit und verblieb dort auch am längsten.

Betrachtet man in Abb. 4.37 die Amaranthkonzentrationen in den Ablauflösungen der Ablaufstutzen, fällt auf, dass es erst 15 Tage nach Einsetzen der Beregnung mit Amaranth zum ersten Amaranthdurchbruch kam. Eine der Eintragslösung entsprechende Amaranthkonzentration in der Ablauflösung stellte sich erst weitere 8 bis 10 Tage später ein. Dies war der retardierenden Wirkung der Sorption zuzuschreiben. Bis zum Ende des Versuchs etablierte sich eine Konzentration von ca. 10 mg/l Amaranth in den Ablauflösungen.

Versuche an kleineren Sandsäulen hatten schon vorher gezeigt, dass Amaranth, welches sich erst einmal an Oberflächen von Sandkörnern abgelagert hatte oder sich in Bereichen mit nur geringem Wasseraustausch befunden hatte, nur mit unverhältnismäßig großen Wassermengen wieder in

Lösung zu bringen bzw. auszuwaschen war. Selbst ein vielfacher Austausch des Wassers in diesen kleineren Versuchsgefäßen hinterließ immer noch erhebliche Mengen an Farbstoff.

Abb. 4.36: Differenz der Tagesraten von Ein- und Austrag an Amaranth bezogen auf das Lysimeter; positiv: Eintragüberschuss, negativ: Austragüberschuss

Abb. 4.37: Amaranthkonzentration summarisch in der Ablauflösung aller Ablaufstutzen

4.3.5.4 Ton

Ab Versuchstag 176 wurde an den 14 folgenden Versuchstagen mit der Beregnung eine tonhaltige Suspension aufgebracht. Insgesamt wurden 117 Liter Tonsuspension verregnet. Die darin enthaltene Tonfracht wurde nicht genau quantifiziert. Grob überschlagen wurden ca. 10 kg Ton in das Lysimeter eingebracht.

Mit der Tonzufuhr sollte untersucht werden, ob

- Ton ähnlich wie die anderen Tracer transportiert würde,
- es dort zu Anreicherungen von Ton kommen würde, wo im Sand ein stärkerer Wasserfluss stattfindet,
- diese Zonen in Kontakt mit solchen einer geringeren Abflussbeteiligung stehen.

Leider konnte keine Differenzierung des eingebrachten Tones im Lysimeter beobachtet werden. Lediglich innerhalb der oberen 20 bis 30 cm wurde eine auf Anreicherung zurückzuführende einheitlich leichte Farbveränderung des Sandes deutlich wahrgenommen.

4.3.6 Luftdruck

Wenn die Hypothese zutrifft, dass beim Eindringen von Wasser in ein trockenes annähernd gleichkörniges Sediment über Kissen aus von der Wasserfront abwärts getriebener und komprimierter Luft wassergesättigte Lamellen entstehen, wenn ferner auch nach dem Abfließen des Wassers die nur wenig befeuchteten Luftkissen wieder belüftet werden, dann müsste jeder Vorgang der Erst- und Wiederbefeuchtung zum Ansteigen des Luftdruckes in den Kissen führen.

Zur Prüfung dieses Verhaltens wurden nach Abfließen des Wassers am Versuchstag 270 sechs Sonden installiert. Das Lysimeter befand sich in einem Ruhezustand, d.h. es hatte seit Versuchstag 259 kein Wasserabfluss mehr stattgefunden. Der statische Wassergehalt des Lysimeters betrug zu diesem Zeitpunkt 54,68 Liter. Es ist also davon auszugehen, dass am Tag 270 erhebliche Teile des Lysimeters weitgehend entwässert waren.

Zur Druckmessung wurden, wie in 4.2.5 beschrieben, sechs Stahlkapillarrohre in das Lysimeter eingesetzt, ohne bei deren Einbau kontrollieren zu können, ob sie in einem Luftkissen, in einer Lamelle oder in einem Wasserdocht endeten. Die Lage dieser Kapillarrohre ist aus Abbildung 4.38 zu ersehen.

Abb. 4.38: Lysimeteraufsicht und Lage der Luftdruckmesssonden

Um zu gewährleisten, dass überhaupt messbare Druckveränderungen auftreten konnten, wurde ein Starkregen von 50 mm Stärke simuliert. Die dabei während ca. 25 Stunden eingetragenen 45 Liter Wasser schienen auszureichen, um Druckverschiebungen innerhalb des Lysimeters zu initiieren. Es wurde erwartet, dass das eindringende Wasser während des Versickerns Luft verdrängen und in Luftblasen einschließen würde. Durch zunehmenden hydrostatischen Druck, bedingt durch weiter zufließendes, der Luftblase aufliegendes Wasser, konnten Druckvariationen innerhalb dieser aufgenommen werden. Tabelle 4.7 gibt wieder, welche Druckverhältnisse im Laufe dieses Versuches an den Messsonden auftraten.

Die Starkregen-Simulation setzte um 12:00 ein. Die ersten leichten Druckvariationen konnten gegen 15:15, also etwa nach drei Stunden, aufgenommen werden. Die gemessenen Drücke an den Sonden 2, 3, 4 und 5 stiegen nur um 1 bis 3 cm Wassersäule.

Tab. 4.7: Gemessene Drücke während der Starkregen-Simulation am Versuchstag 270
(Die rote Linie markiert das deutliche Einsetzen des Abfließens)

Zeit	Sonde 1	Sonde 2 Tiefe: 70 cm	Sonde 3	Sonde 4	Sonde 5 Tiefe: 40 cm	Sonde 6
	Druck in cm WS					
Start 12:00	0	0	0	0	0	0
15:15	1	1	2	1	1	1
16:00	0	1	0	2	0	0
16:30	1	1	2	2	2	2
17:00	2	1	2	3	2	2
17:30	0	1	0	3	0	0
18:00	0	1	0	1	0	0
18:30	3	1	0	1	0	2
19:00	2	1	0	1	0	7
19:30	3	1	0	1	1	7
20:00	3	1	0	1	1	6
20:30	3	1	0	1	1	5
21:00	2	1	0	2	1	4
21:30	4	0	0	0	1	6
22:30	4	1	0	0	0	7
23:00	4	1	0	0	0	7
23:30	4	1	0	0	0	17
00:00	3	1	0	0	0	3
00:30	4	2	0	0	0	2
01:00	5	2	0	0	0	1
01:30	4	2	0	0	0	1
02:00	0	2	0	0	0	0
02:30	0	2	0	0	0	0
03:00	1	2	0	0	0	0
Ende 10:00	0	0	0	0	0	0

Sonde 1 erreichte einen Maximalwert von 5 cm Wassersäule, Sonde 6 einen Spitzenwert von 17 cm Wassersäule. Nachdem die Abflusszellen 7 und 70 nach 11 Stunden und die Abflüsse 85, 162 und 167 nach 11,5 Stunden Wasser förderten, nahm der Druckanstieg ab und ging nach dem Einsetzen des Abflusses an den Ablaufstutzen 161 und 144 bis 01:30 weiter zurück. Nach 03:00 war an den Sonden bis zur Beendigung der Druckmessungen um 10:00 der Druck auf die Anfangswerte zurückgegangen.

Der Wasservorrat im Lysimeter erhöhte sich während der Starkregen-Simulation zeitweise bis auf etwa 96 Liter, um dann bis zum Versuchstag 283 auf einen neuen statischen Endzustand von ca. 60 Liter abzusinken.

4.4 Versuch II (Grober Mittelsand) - Dauer 38 Tage

Versuch II stellte in seinen Grundzügen eine Wiederholung des Versuches I dar. Da bei Versuch I im Zuge der Befeuchtung des trockenen Sandes ein Fließsystem mit mehr randständiger Präferenz ausgebildet worden war, was das Wirksamwerden von Randeffekten nicht auszuschließen gestattete, sollte nun geprüft werden, ob auch kernorientierte Ablaufbahnen entstehen würden. Zugleich sollte die Infiltration des Tons in der Absicht, Toninfiltrations-Lamellen zu erzeugen, verbessert werden. Schließlich, und das mit einem gewissen Vorrang, sollte nach Verdrängung der Chloridsuspension durch das Wasser der Tonsuspension und nach freiem Ablaufenlassen des dynamisch retinierten Wassers im statischen Speicherwasser die Verteilung des nicht ausgetragenen Chlorids auf die 900 1 dm³-Stechwürfel der Sandfüllung des Lysimeters untersucht werden. Es wurde gehofft, dass sich daraus Hinweise auf durchwaschungsaktive Präferenzzonen und inaktive lamelläre Ruhezone des Wassertransportes ergeben würden.

4.4.1 Zeitlicher Ablauf

Zur Befüllung wurde der selbe Sand wie im Versuch I benutzt. Dieser Sand (900 dm³) wurde nach Abschluss der Untersuchungen des ersten Versuches im 1 m³-Lysimeter lufttrocken eingefüllt. Er enthielt noch 4,92 g Chlorid.

Versuch II erstreckte sich über 38 Tage. Während der ersten 29 Tage wurde das Lysimeter täglich mit einer Tagesrate von 10 mm beregnet. Von Tag 1 bis 20 wurde Chloridlösung, von Tag 21 bis 29 eine schwarzerdebürtige Tonsuspension verregnet. Das tägliche Aufgeben der Chloridlösung erfolgte innerhalb von 8 h, das der Tonsuspension innerhalb von 5 h. Nach der letzten Beregnung an Tag 29, kam es noch an sieben Tagen zu Abflussereignissen. Nach Tag 37 hörte das Abfließen auf. Der Versuch wurde beendet, der Sand dem Lysimeter wie bei Versuch I entnommen und auf Wasser- und Chloridgehalt untersucht.

Insgesamt wurden 261 l verregnet. Davon traten 181,17 l wieder aus dem Lysimeter aus. 44,23 l waren in der Sandsäule gespeichert (durchschnittlich $\approx 49 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ Sand gegenüber $58 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$ Sand in Versuch I). Der Wasserinhalt der unter dem Sandpaket liegenden Kiesschicht wurde hier nicht bestimmt. Leitet man diesen aber aus dem Versuch I ab, müssten etwa 12,5 l in dem Kieskörper gespeichert gewesen sein. Aus der Summe dieser Werte ergibt sich ein Wasserverlust von 23,2 l. Dieser Wasserverlust ist auf die Verdunstungsrate zurückzuführen, die bei Versuch II bei etwa 9 % lag. Dieser Wert lag auch sehr nahe an den Verdunstungsraten, die mit den Kontrollgefäßen bestimmt wurden. Im Mittel erreichten diese 9,42 %. Minimum und Maximum lagen bei 7,29 bzw. 10,99 %.

4.4.2 Wasserfluss

Wie bei Versuch I verlief der Wasserabfluss nicht gleichmäßig, sondern wies wieder ein deutliches Oszillieren der Tagesraten auf. Der erste Abfluss erfolgte an Tag 8. Eine klare Ausbildung eines Fließgleichgewichtes war während des Versuches nicht zu erkennen. Dies überrascht aber auch nicht, wenn noch einmal auf Versuch I zurückgeblickt wird. Dort benötigte die Etablierung eines Fließgleichgewichtes 31 Tage – also eine Einstellzeit, die länger war, als die gesamte Beregnungsphase des Versuches II. Anders als bei Versuch I war das Oszillieren der Tages-Abflussraten stärker ausgeprägt, d.h. die Differenzen zwischen hohen und niedrigen Abflussereignissen vergrößerten sich (s. Abb. 4.39).

Abb. 4.39: Versuch II: Abfluss-Tagesraten

Die Verteilung der Lage der am Abfluss beteiligten Abflusszellen, welche in Abb. 4.40 dargestellt ist, zeigt anders als beim Versuch I ein weitaus differenzierteres Bild. Insgesamt waren während des Versuches II 64 verschiedene Abflusszellen am Abfluss beteiligt. Davon förderten maximal 46 Abflusszellen, also ähnlich wie im Versuch I (8 von 12), etwa zwei Drittel der Zellen gleichzeitig Abflusslösung.

Abb. 4.40: Lage der am Abfluss beteiligten Zellen und Abflussstutzen im Lysimeterboden und ihr Anteil an der Summe des gesamten Abflusses während des Versuches II

Aus Abb. 4.40 lässt sich erkennen, dass der Abfluss dieses Mal, im Gegensatz zu Versuch I, in zentralen Bereichen stattgefunden hat. Es waren zwar größere Teile des äußeren Randes in das Abflussgeschehen einbezogen, unter diesen war aber kein Abflussschwerpunkt vertreten.

Abb. 4.41: Anteile des randlichen und des zentralen Abflusses am Gesamtabfluss (G)

Abb. 4.41 zeigt die Summen der Abflussmengen aus den 171 Ablaufstutzen, gegliedert nach vier Abflusszonen. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass der Abfluss pro Ablaufstutzen in den vier Zonen, berechnet aus der Anzahl der jeweils vorhandenen Abflusstutzen und der des innerhalb jeder Zone gemessenen Abflusses nicht sehr unterschiedlich war (0,72 – 1,51 l). In dem äusseren und inneren Randbereich sowie im inneren Kern wiesen die Ablaufstutzen im Durchschnitt eine Abflussbeteiligung von 0,4 bis 0,58 % auf. Der äussere Kern hatte, wegen der Ausbildung zweier Abflusszentren (s. 4.40), mit 0,84 % einen höheren Wert. Insgesamt lief im Kernbereich bei durchschnittlich (0,69 % des Gesamtabflusses pro Ablaufstutzen) mehr Wasser ab als über den Randbereich (0,46 % des Gesamtabflusses pro Ablaufstutzen). Dadurch relativiert sich auch die nach dem Versuch I aufgetretene Frage nach Randeffekten, die durch die Versuchsanordnung bedingt sein könnten. Der bevorzugte Randabfluss in Versuch I war vermutlich nur eine Zufallserscheinung.

Neben der Frage nach dem randlichen und dem zentralen Abfluss war im Versuch II auch wieder die der „Rechts-/Links-Verteilung“ von Bedeutung, die in Abb. 4.42 gezeigt wird. Auch während dieses Versuches kam es zu einem gegenläufigen Abflussgeschehen zwischen der linken (Abfluss 1 - 85) und der rechten Lysimeterhälfte (Abfluss 86 - 171). Über den größten Zeitraum des Versuches hinweg galt:

- hohe Abflussrate der Ablaufstutzen 1 - 85 = geringere Abflussrate der Ablaufstutzen 86 - 171,
- geringe Abflussrate der Ablaufstutzen 1 - 85 = höhere Abflussrate der Ablaufstutzen 86 - 171

Nur während der sechs Tage von Versuchstag 19 bis 25 verliefen die Abflusskurven der beiden Lysimeterhälften annähernd gleich, nach Ende der Beregnung floss dynamisch zurückgehaltenes (gestautes?) Speicherwasser ab.

Abb. 4.43 zeigt ergänzend zu Abb. 4.42 die „Rechtslinksverteilung“ des Abflusses als Summe der Tages-Abflussraten. Die Summe des Abflusses der Ablaufstutzen 1 – 85 lag zwar immer über der der Ablaufstutzen 86 – 171, doch sind der Abbildung schon fast zyklisch erscheinende Annäherungsphasen der beiden Kurven zu entnehmen.

Abb. 4.42: Zeitgang der Tages-Abflussraten der Abflusszylinder-Gruppen
1 – 85 (blau) und 86 – 171 (rot)

Abb. 4.43: Zeitgang der Tagessumme der Abflussraten der Ablaufstutzen-Gruppen
(1 – 85 blau und 86 – 171 rot)

Aus der Abbildung 4.44 ist zu entnehmen, dass auch für Versuch II galt:

- die Zahl „aktiver“ Ablaufstutzen erreichte während des Versuches niemals einen annähernd konstanten Wert
- die Anzahl „aktiver Ablaufstutzen“ war anscheinend eine nicht vorhersehbare Größe, d.h. es bestand keine Kausalität zwischen Abflussmenge und Anzahl der Ablaufstutzen

Ein möglicher Erklärungsansatz hierfür wurde bereits unter 4.3.2 gegeben.

Abb. 4.44: Abflussraten und die Zahl „aktiver“ Ablaufstutzen im Versuchsablauf

4.4.3 Wasserspeicherung, Dichte- und Wasserverteilung

Wie bereits festgestellt, war es bei der kurzen Dauer des Versuches II nicht zur Ausbildung eines Fließgleichgewichtes gekommen. Aus diesem Grund konnte für Versuch II - anders als bei dem Versuch I - die dynamische Wasserkapazität der Sandsäule nicht erfasst werden. Da die Wasserkapazität in der Versuchsphase Tag 11 bis 27 zwischen 55 und 70 l gelegen hat, kann – eine Fortsetzung des Versuches unter gleichbleibenden Bedingungen vorausgesetzt – mit einer dynamischen Wasserkapazität von 65 – 70 l gerechnet werden.

Die während des Versuches täglich berechnete Menge des in der Sandsäule dynamisch gespeicherten Wassers betrug maximal 69,42 l. Nach Abbruch der Beregnung ging dieser Wert, aufgrund der statischen Wassergehalte an 900 1 dm³-Sandwürfeln bei der Lysimeterentleerung, auf 43,42 l zurück. (s. Abb. 4.45)

Abb. 4.46 gibt einen Überblick über die Durchschnittsdichten und die Anteile an Wasserporen für jede der Tiefenschichten (s. auch Abb. 4.47). Die Dichten waren auch bei diesem Versuch sehr unterschiedlich. Der Durchschnitt aller 900 Proben lag bei 1,71 g/cm³. Allerdings war keine deutliche Dichtezunahme von oben nach unten festzustellen. Gerade die oberen 20 cm wiesen durchschnittlich Dichten um 1,80 g/cm³ auf, welche vermutlich auf eine beregnungsbedingte Versetzung zurückzuführen sind. Anders als bei Versuch I traten hier keine entgegenwirkenden Prozesse (Hebung und Auflockerung durch in größerer Tiefe vom eindringenden Wasser verdrängter Luft) auf. Eine Erklärung für das Ausbleiben solcher Prozesse könnte die in der im zweiten Versuch sehr viel

kürzeren Versuchsdauer und die damit verbundene geringere Menge zugeführten Wassers sein. Dadurch, dass die Perkulationsmenge nur ein Sechstel der von Versuch I betrug, konnten keine nennenswerten Umverteilungen durch hydrostatische und pneumatische Drücke entstehen. Die Dichteverteilung schien, ausgenommen die oberen zwei Schichten, im ganzen noch die ursprünglich bei der Befüllung entstandene gewesen zu sein und stieg ganzheitlich gesehen von oben nach unten an. Das Gesamt-Porenvolumen des Sandes war mit 35,39 Vol.-% im Versuch II geringer als im ersten Versuch (34,19 Vol.-%).

Abb. 4.45: Wasserinhalt des Lysimeters im Zeitablauf

Abb. 4.46: Tiefenabhängigkeit der Sand-Trockendichte im statischen Zustand am Versuchsende. Luft- (LPV) und Wasser- (WPV) – Porenanteile am Gesamt-Porenanteil (GPV) bei insgesamt 43,42 l Speicherwasser

Abb. 4.47: Verteilung der Trockendichte in der Sandfüllung des Lysimeters, 900 Einheiten zu je 1 dm³

In Abbildung 4.47 wird die räumliche Verteilung der Trockendichten bzw. die der Porenvolumina im Lysimeter nach Versuchsende dargestellt. Wie schon aus der Abb. 4.46 zu entnehmen ist, war die Streuung der Dichten erheblich. Aus den Aufsichten ist zu erkennen, dass die Schichten III – V die geringsten Dichten aufwiesen. Schicht I und IX besaßen die größten Dichten. Die möglichen Ursachen dafür wurden schon im Zusammenhang mit Versuch I im Kapitel 4.3.3.2.2 erörtert.

In Abb. 4.48 wird für jede der zehn Schichten des Lysimeters die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Würfel-Porenvolumina dargestellt. Ähnlich wie im Versuch I zeigen auch hier die obersten fünf Schichten, dazu die Schicht VII eine ausgeprägte Eingipfeligkeit. Die Häufigkeitsverteilung der tieferen Schichten wird breiter und tendiert zunehmend zur Zwei- und Mehrgipfeligkeit. Auch hier sind Bereiche unterschiedlicher Dichte voneinander zu unterscheiden.

- ein Bereich höherer Dichte ($D > 1,80 \text{ g/cm}^3$; GPV: 20 – 30 %)
- ein Bereich mittlerer Dichte ($D > 1,65 \text{ g/cm}^3$; GPV: 30 – 40 %)
- ein Bereich geringerer Dichte ($D > 1,50 \text{ g/cm}^3$; GPV: 40 – 50 %)

Vergleicht man Abb. 4.48 aus Versuch II mit der entsprechenden Abb. 4.2.3 aus Versuch I, so wird – besonders in den oberen Schichten – eine Umkehrung der Reihenfolge in den Häufigkeitsmaxima deutlich.

Abb. 4.48: Häufigkeitsverteilung der Porenvolumina in den dm³-Sandwürfeln in den zehn Schichten des Lysimeters

Die Verteilung der Wassergehalte (Abb. 4.49) der 1 dm³-Sandwürfel nach Ende des Abfließens nähren die Vermutung, dass die Verteilungsstruktur der Dichten im Sand noch keinen endgültigen Zustand erreicht zu haben schien. Die oberen drei Schichten wiesen Wassergehalte mit einer geringen Streuung zwischen 5 und 7 Vol.-% auf. Unterhalb der dritten Schicht wurde der Kern des Sandkörpers trockener und hatte Wassergehalte von < 1 bis 6 Vol.-%. In der Basisschicht kam es wieder zu Stauwirkungen des Wassers bei > 10 Vol.-%. Die in den Schichten IV – IX eingeschlossene Luft konnte wegen des in Schicht X gestauten Wassers durch das von oben zuströmende Wasser nicht aus dem Lysimeter verdrängt werden. Die dazu benötigten Drücke konnten bei der Gesamt-Regenmenge von 261 l wahrscheinlich nicht aufgebaut werden. Auch für Drücke wie im ersten Versuch, bei denen möglicherweise ein Teil der im Zentrum befindlichen Luft nach oben verdrängt worden sein dürfte und dabei den Sandkörper nach oben hin zum Anschwellen gebracht haben dürfte, hat die Beregnungsmenge anscheinend nicht ausgereicht. Die im Zentrum der Schicht VII etwas angehobenen Wassergehalte könnten ein Indiz dafür sein, dass hier nachströmendes Wasser Drücke aufgebaut hat, die eine fortschreitende Befeuchtung der Schicht durch das Verdrängen von Luft ermöglicht haben. Dabei verdrängte Luft könnte möglicherweise noch nicht aus dem Lysimeter entwichen sein und in das Luftporensystem benachbarter Sandpartien abgewandert sein, wobei dort die Luftdrücke angehoben wurden und dadurch eine weitere Befeuchtung verhindert wurde.

Abb. 4.50 bringt ergänzend die Häufigkeitsverteilungen des mit Wasser gefüllten Porenanteils (Vol.-%) des Volumens der 1 dm³-Sandblöcke, gegliedert nach den einzelnen Tiefenschichten des Lysimeters – entsprechend den Mosaikdarstellungen in Abb. 4.49. Zwar weisen die oberen fünf Schichten auch hier eine klare Eingipfeligkeit auf, doch sind die einzelnen Verteilungskurven sehr viel breiter als im Versuch I. Es ist anzunehmen, dass bei längerer Beregnungszeit die Verteilungskurven profilierter geworden wären und sich denen der Abb. 4.25 angeglichen hätten.

Abb. 4.50: Verteilung der mit Wasser gefüllten Porenvolumenanteile der 1 dm³-Sandblöcke in den Schichten I bis X

4.4.4 Visuelle Beobachtungen

Auch während dieses Versuches wurden wieder Fotografien der großen Schauseiten in 24 h-Intervallen aufgenommen. Auch hier werden zur Darstellung wieder Skizzen verwendet, die aus den Fotografien gewonnen worden sind.

Abb. 4.51 zeigt die entstandenen Fließmuster an einer der beiden Schauseiten während des Eindringens der Beregnungslösung in den lufttrockenen Sand während der Versuchstage 1 bis 8.

Die entstandenen Fließmuster wichen erheblich von denen des Versuches I ab. Der an der Lysimeterwand sichtbare Wasserfluss zeigte einen sehr viel ausgeprägteren präferenziellen Fluss. Schon am ersten Versuchstag bildete sich ein Abflussfinger. Von diesem ging eine starke lateral-lamelläre Wasserbewegung entlang von Schichtoberflächen des Sandes aus. Diese laterale Ausbreitung erreichte zeitweilig bis zu 30 cm, z.B. an den Tagen 4 und 5. Nach Versuchstag 6 befeuchtete sich langsam die gesamte Fläche der Schauseite. Der in der Skizze des achten Tages auffällige trocken gebliebene Bereich benötigte noch sehr lange Zeit bis zu seiner Auffüllung. Diese schritt von den Rändern her voran und war erst gegen Ende des Versuches abgeschlossen. In diesem zunächst trockenen Bereich konnte also Wasser erst sehr spät eindringen, vermutlich weil erst der Aufbau hydrostatischer Drücke notwendig war, um eine Verdrängung der Luft durch das Sickerwasser herbeizuführen.

Im Versuch II bauten sich also beim Eindringen des Wassers in den trockenen Sand ganz andere Fließmuster auf als in Versuch I. Bevor man jedoch von einem Zufallsergebnis spricht, sei bedacht, dass in Versuch II von Anfang an für die Beregnung die Kanülen Pravaz 18 eingesetzt wurden.

Durch diese wurde die Tages-Regenrate innerhalb von 8 h verabreicht. Im Versuch I hingegen wurde mit den Kanülen Pravaz 20 während der ersten acht Versuchstage die Tages-Regenrate auf über 14 h verteilt. Möglicherweise bestimmt die Intensität (Stundenrate) des Wassereintrages in der anfänglichen Befeuchtungsphase Form und Zahl der bevorzugten Leitbahnen. Erfolgt die Ausbringung der Tagesrate gleichmäßig über einen langen Zeitraum, ist der Wasserfluss weniger präferentiell ausgeprägt als bei einer kurzzeitig und intensiven Aufbringung der täglichen Regenrate.

Abb. 4.51: Fließmuster während des Eindringens von Lösung in den lufttrockenen Sand (Versuchstage 1 bis 8)

4.4.5 Tracer

Im Versuch II wurden die Tracer primär nicht für die Beschreibung des Wasserflusses mittels Bestimmung der Abflusskurven eingesetzt. Vielmehr ging es darum zu erfassen, wie sich Tracer während des Transportes in dem Sandkörper verteilen. Zum Einsatz kamen dabei eine Chloridlösung (2 g/l) als wasserlöslicher, kaum sorbierbarer Tracer und eine Tonsuspension als kolloidal filtrier- bzw. adsorbierbarer Tracer.

4.4.5.1 Chlorid

Chlorid wurde über 20 Tage hinweg mit der Beregnungslösung in den Sandkörper eingebracht. Dabei gelangten 360 g Chlorid in das Lysimeter. Bis zum Ende der Chloridzuführung wurden bereits 215 g Chlorid wieder mit der Abflusslösung ausgetragen. Bis zum endgültigen Abbruch der Beregnung stieg dieser Wert auf 297 g, bis zum letzten Tag des Abfließens auf 306,98 g. Die Be-

regnungslösung enthielt pro Liter 2 g Chlorid. Am Ende der Chloridzuführung wies die Chloridkonzentration der Gesamt-Abflusslösung einen Wert von 2,079 g auf. Berücksichtigt man die verdunstungsbedingte Konzentrationserhöhung, entsprach die Konzentration der Eintragslösung der der Abflusslösung. Zu diesem Zeitpunkt wurde angenommen, dass die gesamte in der Sandsäule enthaltene Lösung, welche das Lysimeter gänzlich befeuchtete, eine Chloridkonzentration von ca. 2 g/l hatte. Der Wasserinhalt des Lysimeters betrug zu diesem Zeitpunkt 59,28 l. Nach Versuchstag 20 wurde das Lysimeter 9 Tage lang mit insgesamt 81 l einer chloridfreien Tonsuspension beregnet. An diesen 9 Tagen liefen 53,05 l Abflusslösung aus dem Lysimeter. Die chloridhaltige Lösung hätte unter piston flow-Bedingungen aus dem Lysimeter annähernd vollständig verdrängt worden sein und die Chloridkonzentration der Abflusslösung gegen Null gehen müssen. Tatsächlich lag die Chloridkonzentration der Abflusslösung aber noch bei 0,69 g/l, und die Menge des in der Sandsäule gespeicherten Chlorids bei 63,15 g. Nachdem die Beregnung an Tag 29 beendet worden war, kam es noch bis zum Tag 38 zu weiteren Abfluss-Ereignissen. Die Chloridkonzentration der Abflusslösung ging dabei auf 0,089 g/l zurück. Nach dem letzten Abfluss waren im Versuchssand noch 53,02 g Chlorid enthalten.

Abb. 4.52: Zeitgang der Cl^- -Tagesein- und -austragsraten

Die Abbildungen 4.52 und 4.53 veranschaulichen zum Einen den Zeitgang der Chloridein- und -austragsraten, zum Anderen die Chlorid-Speicherdynamik des Sandes während des Versuches II.

Nach Abschluss des Versuches II musste angenommen werden, dass das in dem Lysimeter verbliebene Chlorid nicht gleichmäßig in der Sandsäule verteilt vorlag. Es wurde hauptsächlich in Zonen mit geringerer Feuchte zurückgehalten, d.h. Zonen die bei ihrer Befeuchtung nur wenig oder gar nicht durchflossen und damit nicht an das Abflusssystem angeschlossen gewesen waren. Der Chloridaustrag könnte in solchen Bereichen nur über Diffusion stattgefunden haben, oder aber durch - nur selten vorkommende - hydrostatisch ausgelöste Wassereinbrüche mit anschließendem Massenabfluss.

Wäre das Chlorid gleichmäßig in Form eines piston flow verdrängt worden, hätte am Ende des Versuches die im Sand verbliebene Chloridmenge gegen Null gehen müssen. Die noch zurückgebliebenen Chloridreste hätten dabei einen von der Sandoberfläche zur Basis ansteigenden Gradienten ausbilden müssen. Wird von einem präferenziellen Abflusssystem ausgegangen, bei dem

große Teile des Sandkörpers nach ihrer Befeuchtung vom eigentlichen Abflusssystem abgeschnitten sind, so müssten nach Beendigung des Versuches, über den ganzen Sandkörper verteilt, Zonen mit hohen neben Zonen mit geringeren Chloridgehalten liegen.

Abb. 4.53: Cl^- - Inhalt des Lysimeters im Zeitablauf

Um aus der Chloridverteilung am Ende des Versuches auf das Nebeneinander von transportaktiven und -inaktiven Zonen zu schließen, wurde der Sandkörper näher untersucht. Die Sandsäule wurde dafür wieder in 900 1 dm^3 -Blöcke zerlegt. Nach der Wassergehalts- und Dichtebestimmung wurden diese Sandblöcke jeweils in einem Liter H_2O demin. 20 min in Rundhalsflaschen über Kopf geschüttelt und die elektrische Leitfähigkeit der dabei entstandenen Lösung gemessen. Von dem daraus rechnerisch ermittelten Chloridgehalt von 53,02 g wurden auf diese Weise nur 45,84 g wiedergefunden.

Das methodische Problem lag im Folgenden: Da in den 1 l-Papiertüten, in denen der Sand für die gravimetrische Wassergehaltsbestimmung getrocknet wurde, während des Trocknungsvorganges Chlorid aus dem Versuchssand gespeichert worden war, wurde das Chlorid wieder aus den Papiertüten gelöst und analysiert. Die dabei bestimmten Werte wurden mit den Ergebnissen der Sanduntersuchung verrechnet. Die Umrechnung der elektrischen Leitfähigkeit in Chloridgehalte ergab eine in den Tüten zurückgehaltene Menge von 6,72 g. Die Summe des Chlors der Abflusslösung des Sandes und der Tüten ergab eine wiedergefundene Chloridmenge von 359,54 g, d.h. dass das eingetragene Chlorid (360 g) fast vollständig wiedergefunden worden ist.

Die Interpretation des Verteilungsmosaiks der elektrischen Leitfähigkeit in den 1 dm^3 -Sandblöcken, entsprechend den Chloridgehalten des Sandes, hat folgenden Gesichtspunkt zu berücksichtigen: Beim Eindringen der Cl^- -haltigen Beregnungslösung in den trockenen Sand hat diese - unter lateraler Ausbreitung in den Sand hinein - diesen mit unterschiedlichen Mengen an Chloridlösung der Ausgangskonzentration gefüllt. Nach Beendigung der zwanzigtägigen Chloridberegnung, der neuntägigen ChloridAuswaschung mit der wässrigen Tonsuspension und dem achttägigen freien Ablaufenlassen, ergibt sich das Verteilungsbild der Chloridgehalte in den Sandwürfeln wie es in Abb. 4.54 vermittelt wird. Nach dem Ablaufenlassen der wässrigen Lösung hat sich das in Abb. 4.49 dargestellte räumliche Verteilungs mosaik der Wassergehalte im Sand ergeben. In den Schichten V, VI, VIII und IX treten Zonen auf, die so geringe Wassergehalte aufweisen, dass die Annahme gerechtfertigt ist, dass diese Zonen unter Lufteinschluss nicht oder kaum von der eindringenden Chloridlösung befeuchtet worden sind.

Abb. 4.54: Elektrische Leitfähigkeit in mS/cm in der Sandsuspension aus den vorher getrockneten 1 dm³-Blöcken der Sandfüllung nach Beendigung des Abflusses

Dies deckt sich mit der Tatsache, dass hier (Abb. 4.54) auch nur sehr geringe Chloridgehalte gemessen wurden. Andererseits finden sich in Abb. 4.49 ausgedehnte Bereiche, in denen 4 bis 7 % statischer Wassergehalt (grün/blau) gemessen wurden, die Chloridgehalte aber (Abb. 4.54) auf recht geringe Werte abgesunken sind. Dies gilt z.B. in augenfälliger Weise für die oberen vier Schichten, wenn man Abb. 4.49 mit Abb. 4.54 vergleicht. Die Ursache liegt darin begründet, dass hier offenbar in einem kohärenten Leitbahnsystem eine gute Verdrängungsmöglichkeit der Chloridlösung bestanden hat. Auffällig ist dabei jedoch, dass sich in diesen Schichten bei III beginnend und bis IV verstärkend, eine Zone ausbildet, die hohe Salzkonzentrationen aufweist. Sie ist also beim Eindringen der Chloridlösung aufgefüllt, aber von dem verdrängenden Wasser nicht mehr durchspült worden. Die räumliche Ausdehnung dieser Zone ist anhand der Längsschnitte zu verfolgen. Sie liegt schwerpunktmäßig in den Reihen A und B sowie E und F – also zu den Längsflächen des Lysimeters hin. Dies deckt sich mit der in Abb. 4.41 dargestellten Tatsache, dass der Abfluss der Lösung in diesem Versuch hauptsächlich in der Kernzone stattgefunden hat.

Diese Interpretation führt also zur Untergliederung des Fließgeschehens in dem Lysimeter-Sandkörper in drei Zonen, die bei der Befeuchtung des trockenen Sandes ausgebildet werden.

- Zonen mit eingeschlossen bleibender Luft und geringer oder fehlender Befeuchtung
- Zonen mit lateral vordringendem Wasser mit geringer bis vollständiger Wasserfüllung des Sandes, aber keiner späteren Durchwaschung. Konzentrationsausgleich im Wesentlichen durch Diffusion
- Zonen mit voller Wasseraufsättigung und kapillarer Kohärenz, die eine Absickerung und Durchwaschung erlauben (Dochtzone mit „präferentielltem Fließen“)

Es ist verständlich, dass infolge der räumlichen Differenzierung von Ursachen auf der Basis von 1 dm³-Würfeln eine statistische Korrelierung zwischen statischem Wassergehalt und elektrischer Leitfähigkeit bestenfalls zu Werten von 0,35 führen konnten.

4.4.5.2 Ton

Wie beim Versuch I wurde dem Lysimeter durch die Beregnung mit einer Tonsuspension Ton zugeführt. Abweichend vom Versuch I handelte es sich nicht mehr um den aus einer Parabraunerde gewonnenen braunen Ton, sondern um schwarzen Ton einer Schwarzerde. Durch die Tonzufuhr sollte wiederum untersucht werden, ob

- sich ein Tontransport entlang den primär entstandenen Abflussbahnen vollziehen würde,
- Tonanreicherungen in Zonen verstärkten Wasserflusses auftreten würden,
- Tonanreicherungszone im Kontakt mit Bereichen geringerer Durchfeuchtung entstehen würden.

Durch Einsatz des dunkleren, schwarzen Tons wurde ein besseres visuelles Ergebnis erwartet als im Versuch I. Trotz der Verwendung dieses Tons konnte jedoch auch hier kein klares Ergebnis zur Fragestellung erzielt werden. Wie im ersten Versuch war lediglich eine einheitliche Verfärbung der oberen 20 cm des Sandpaketes wahrzunehmen. Die dieses Mal graue Färbung trat zwar deutlicher hervor als die bräunliche Verfärbung in Versuch I, ließ aber auch hier keine weitere Differenzierung zu. Die Frage nach dem Tontransport, der Tonverlagerung mit dem Sickerwasser und den Mechanismen der Tonanreicherung blieb weiterhin unbeantwortet.

4.4.6 Luftdruck

Nach dem erfolgreichen Nachweis von Druckänderungen innerhalb des Lysimeters während der Starkregen-Simulation zu Ende des Versuches I sollten auch im Versuch II Druckunterschiede aufgenommen werden. Anders als beim ersten Versuch wurden die Sonden zur Druckmessung vor Aufnahme der Erstberegnung installiert. Um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, mit den Sonden Bereiche zu erfassen, in denen es zu Änderungen der Druckverhältnisse durch das Sickerwasser bzw. durch von diesem verdrängter Luft kommt, wurde die Anzahl der Sonden auf 20 Stück erhöht (s. Abb. 4.55). Abweichend von der Druckmessung im ersten Versuch wurde nicht in 30 min-Intervallen, sondern täglich 4 bis 8 mal (über die gesamte Versuchsdauer hinweg) kontrolliert, ob Druckveränderungen auftraten. Anstatt eines Starkregen-Ereignisses sollte die tägliche Beregnungsrate von 10 mm zur Initiierung von Druckdifferenzen genutzt werden.

Abb. 4.55: Lysimeternaht und Lage der Druckmesssonden

Trotz einer erhöhten Anzahl von Sonden und einer verlängerten Messzeit ließen sich in diesem Versuch keine Druckvariationen feststellen. Dabei bleibt die Frage unbeantwortet, ob dieses an einer zu geringen Beregnungsrate lag oder aber an dem Umstand, dass sich die Sonden in ungeeigneter Position befanden. Dies ist für weitere Untersuchungen der durch eindringendes Wasser bedingten Luftdruckveränderungen in Sandsäulen von Bedeutung. Sollte die Beregnungsrate der ausschlaggebende Grund sein, wäre eine erfolgreiche Messung durch eine Erhöhung der Beregnungsrate einfach zu bewerkstelligen. Ist die Position der Sonde der entscheidende Faktor, bleibt die Erfassung von Druckveränderungen ein Glückspiel, bei dem selbst ein so hoher Einsatz (Anzahl der Messsonden) nicht ein positives Ergebnis gewährleistet. Während des Versuches I befanden sich die Sonden unglücklicherweise in Bereichen, in welche das perkolierende Wasser ungehindert eindringen konnte. Die dabei verdrängte Luft sammelte sich vermutlich in anderen Zonen und ließ dort den Luftdruck ansteigen. Dies ist auch aus der Abb. 4.49 abzuleiten. Die Schicht IV in der sich die in 35 cm-Sonden befanden zeigt noch eine relativ gleichmäßige Durchfeuchtung. In der Schicht VII – hier waren die 65 cm-Sonden eingesetzt – fand eine Verdrängung der Luft in die Schichten VI und VIII statt.

4.5 Versuch III (Sand < 355 µm Ø inkl. Schluff und Ton) – Dauer 120 Tage

Beobachtungen im Gelände in Versuchen mit Tracerverlagerung (MÜSSEMEIER 1996) hatten erkennen lassen, dass in Sanden, die feiner gekörnt waren und dementsprechend/oder durch eine ausgeprägte Wechselkörnigkeit eine gleichmäßigere Porenverteilung mit kapillarem Dochteffekt aufweisen, die präferentielle, lateral stark den Wasserfluss dispergierende Wasserbewegung durch einen mehr zu frontaler Abwärtsverdrängung neigenden piston flow ersetzt wird. Um dies zu quantifizieren wurde für Versuch III eine feinere Sandmischkörnigkeit als Lysimeterfüllung vorgesehen.

Dafür wurde der in Tab. 4.3 aufgeführte Siebdurchgang < 355 µm Ø des Versuchssandes verwendet, der außer der Fraktion „feiner Mittelsand“ auch den Feinsand und geringe Anteile an Schluff und Ton enthielt – also durchaus als „mischkörnig“ bezeichnet werden konnte.

Da die Frage der Bildung von Tonlamellen, die als hypothetisch mit der Ausbildung von Wasserlamellen in Zusammenhang stehend zu beantworten sein dürfte, in den Versuchen I und II nicht beantwortet werden konnte, sollte im Versuch III die Beregnung des Lysimeters in der Aufsättigungsphase des trocken eingefüllten Sandes ausschließlich mit der wässrigen Suspension des schwarzerdebürtigen Tons durchgeführt werden.

Die Versuchsanlage und –durchführung erfolgte sonst entsprechend der in den Versuchen I und II angewandten.

4.5.1 Zeitlicher Ablauf

Der Versuch dauerte 120 Tage. An den Tagen 1 bis 59 wurde das Lysimeter beregnet (Beregnungsphase). Während der ersten 14 Tage geschah dies mit einer Suspension (4.2.3.4) aus schwarzem Ton, ab Tag 15 nur noch mit Wasser.

4.5.2 Wasserfluss

Insgesamt wurden dem Lysimeter 531 l Flüssigkeit zugeführt, wovon 416,92 l (78 %) wieder abflossen. 57,58 l (11 %) verblieben statisch im Sandkörper des Lysimeters gespeichert. Für das Speicherwasser im Kieskörper wurden aufgrund der Daten von Versuch I 16,1 l (3 %) angesetzt. Der Rest von 40,4 l (8 %) war verdunstet, was in der Tagesrate den Versuchen I und II entsprach und auch recht gut mit den an Kontrollgefäßen bestimmten Tagesraten übereinstimmte, die im Mittel 7,8 %, minimal 6,32 % und maximal 12,05 % betrugen.

Wasser trat zum ersten Mal am Versuchstag 14 aus – sechs Tage später als bei den mit grobem Mittelsand angestellten Versuchen I und II. Zwei weitere Tage benötigte die Ausbildung des Abflusssystems im Sandkörper, um eine annähernde Angleichung der täglichen Abflussraten an die täglichen Netto Regenraten herbeizuführen. Nach der letzten Regengabe am Tag 59 dauerte es dann weitere 60 Tage bis der Ausfluss des Lysimeters endgültig endete (zum Vergleich: Versuch I: 40 d, Versuch II: ca. 10 d).

Nach Abb. 4.56 streuten die Tagesraten des Lysimetergesamtabflusses beträchtlich. Zu keinem Zeitpunkt stellte sich ein annähernd beständiges Fließgleichgewicht wie in Versuch I ein. Zwar lag zwischen den Versuchstagen 16 und 59 der tägliche Durchschnittswert der Gesamtabflussmenge mit 8,36 l etwa in Höhe der verdunstungskorrigierten Tagesregenrate, doch traten in dieser Zeit auch Tagesminima von 0 l (Tag 34) und Tagesmaxima von 15,35 l (Tag 41) auf.

Abb. 4.56: Abfluss-Tagesraten

Nach Abb. 4.57 war die Anzahl wasserspenderer Abflussstutzen gegenüber den Versuchen I und II wesentlich größer. Insgesamt wurden über die Versuchsphase des Abfließens hinweg zum Teil dauernd, sonst nach und nach 94 der 171 Stutzen (55 %) wirksam. Maximal 60 Stutzen spendeten gleichzeitig Abflusswasser.

Abb. 4.57: Lage der am Abfluss beteiligten Zellen und Abflussstutzen im Lysimeterboden und ihr Anteil an der Summe des gesamten Abflusses während des Versuches III

In Abb. 4.58 ist wieder die Gliederung der Abflussstutzen und -zellen am Lysimeterboden in Rand- und Kernzonen vorgenommen. Diesmal sind die Abflussmengen von Rand- und Kernzone etwa gleich. Die räumliche Differenzierung am Lysimeterboden, die in diesem Versuch geringer war als in den Versuchen I und II, wird besonders deutlich, wenn man in der Tabelle zu Abb. 4.58 die beiden rechten Spalten betrachtet. Bei völlig homogenem Abfließen (piston flow, frontale Abwärtsverdrängung) hätte jeder der 171 Abflussstutzen mit je 2,46 l Wasser (0,58 % der Gesamtabflussmenge) spenden müssen. Tatsächlich hatte im Durchschnitt jeder Randstutzen 0,61 %, jeder Kernstutzen 0,56 % der Gesamtabflussmenge geliefert, was auch bedeutet, dass die flächenmäßige

Verteilung der Abflussmengen zwar weiterhin sehr ungleichmäßig war, aber im Vergleich zu den vorhergegangenen Versuchen I und II wesentlich kleinräumiger differenziert war.

Abb. 4.58: Anteile des randlichen und des zentralen Abflusses am Gesamtabfluss

Zur zeitlichen Veränderung der räumlichen Verteilung der täglichen Abflussraten sind die dargestellten Abflusszellen und –stutzen in Abb. 4.59 in eine linke Gruppe (1 - 85) und eine rechte Gruppe (86 - 171) untergliedert. Deren tägliche Gesamt-Abflussraten sind in Abb. 4.59 mit blauer Linie und Fläche für die linke und roter Linie für die rechte Seite dargestellt. Die Kurven zeigen ein Hin- und Herpendeln der Abflussintensität von der linken auf die rechte Seite und umgekehrt, also ein Alternieren von Abflussbahnen wie es auch schon in den Versuchen I und II zu beobachten war.

Die Abbildung 4.60 zeigt noch einmal die Divergenz des Abflussgeschehens zwischen den Abflussgruppen 1 - 85 und 86 - 171, hier durch den Zeitgang der Tagessummen der Abflussraten der Zylindergruppen. Mehrere Phasen, in denen jeweils eine der beiden Abflusszylinder-Gruppen den größeren Anteil am Gesamt-Abflussgeschehen besaß, sind deutlich zu differenzieren und weisen auf ein stetig alternierendes Abflussgeschehen der Abflusszylinder-Gruppen hin.

Wie in den Versuchen I und II bestand auch in diesem Versuch III kein Zusammenhang zwischen den Tagesraten der Abflüsse und der Anzahl dränender Abflussstutzen. Abb. 4.61 zeigt, dass z.B. bei den geringen Abflussraten um Tag 62 herum gleichzeitig aus vielen Stutzen Wasser drang, und dass umgekehrt bei hohen Raten um Tag 21 nur wenige Stutzen am Gesamtabfluss beteiligt waren.

Abb. 4.59: Zeitgang der Tages-Abflussraten der Abflusszylinder-Gruppen
1 – 85 (blau) und 86 – 171 (rot)

Abb. 4.60: Zeitgang der Tagessumme der Abflussraten der Abflusszylinder-Gruppen
1 – 85 (blau) und 86 – 171 (rot)

Abb. 4.61: Zeitgang der Abflussraten und der Zahl "aktiver" Abflüsse

4.5.3 Wasserspeicherung, Verteilung von Dichte und statisch gebundenem Wasser

Abb. 4.62: Wasserinhalt des Lysimeters im Zeitablauf

Die Abbildung 4.62 zeigt den Wasserinhalt des Lysimeters im Zeitablauf. Der Sandkörper (einschließlich der unter diesem liegenden Kiesschicht) enthielt zum Zeitpunkt des ersten Abflusseignisses 115,57 l Wasser. Dieser Wert erreichte während der Beregnungsphase ein Maximum von 123,92 l. Durchschnittlich befanden sich während der Beregnungsphase 117,73 l Fließgleichgewichts-Wasser oder dynamisch gebundenes Wasser im Lysimeter. Die statisch gebundene Wassermenge zum Zeitpunkt der Lysimeterentleerung belief sich rechnerisch auf 57,58 l Wasser im Sandkörper des Lysimeters. Zum Vergleich werden in der Tabelle 4.8 die Werte des statisch und dynamisch gebundenen Wassers der drei Hauptversuche nebeneinander aufgeführt.

Tab. 4.8: Vergleich der dynamisch und statisch gebundenen Wassermengen während der drei Hauptversuche
Angaben in Liter (l) bezogen auf 100 cm Sandsäule

Versuch	statisch	dynamisch Ø	dynamisch max.
I	47,27	≈ 77	98,56
II	43,42	≈ 65 - 70	69,42
III	64,00	≈ 131	137,70

In Abb. 4.63 ist für die einzelnen Schichten des Sandkörpers im Lysimeter die Tiefenabhängigkeit der Trockendichte und die Menge des im statischen Zustand gehaltenen Wasser in Vol.-% dargestellt. Die Trockendichte erreichte auch hier wieder im unteren Abschnitt der Sandsäule Werte bis über 1,9 g/cm³. Das bedeutet, dass auch die in diesem Versuch verwendete feinere Sandkörnung mit ihren dominierenden Fraktionen 355 bis 200 und 200 bis 63 µm „gleichkörnig“ genug war, um beim Setzungs Vorgang solche Packungsdichten zu erzeugen.

Geht man von einer Durchschnittsdichte der Sandsäule von 1,66 g/cm³ aus und benutzt die Tiefenfunktion der statischen Porenwassergehalte für die Erstellung einer Θ - Ψ -Charakteristik (pF-Charakteristik) so ergibt sich ein sehr schwach ausgeprägter Schwerpunkt der Verteilung der Kapillarporen bei etwa pF 1,4 entsprechend 25 cm Wassersäule, entsprechend 120 µm Porendurchmesser.

Abb. 4.63: Tiefenabhängigkeit der Sand-Trockendichte im statischen Zustand am Versuchsende
Luft- (LPV) und Wasser-Porenanteile (WPV) am Gesamt-Porenanteil (GPV) l bei insgesamt 57,58 l Speicherwasser

In der Abb. 4.63 zeigt die Verteilung der Dichte-Mosaiksteinchen in den einzelnen Schichten ein um 35 Gesamtporen-Volumenprozent liegendes Häufigkeitsmaximum. Im Gegensatz zu den Versuchen I und II ist dieses in allen Schichten sichtbar, wenn auch andere Maxima ober- und unterhalb gegeben sind. Sowohl Abb. 4.64 wie Abb. 4.65 lassen erkennen, dass die unterste Sandschicht in ihrer Dichte- und Porenverteilung bei insgesamt geringerer Dichte mehr dem oberen Abschnitt der Sandsäule ähnelte.

Abb. 4.64: Verteilung der Trockendichte und der Porenvolumina in der Sandfüllung des Lysimeters, 900 Einheiten zu je 1 dm³

Abb. 4.65: Verteilung der Gesamt-Porenvolumina der dm³-Sandblöcke in den Schichten I bis IX

Die Abbildung 4.66 lässt die relativ gleichmäßige Verteilung der Wassergehalte in Form von Häufigkeitsverteilungen der Wasserporen-Volumina innerhalb der entnommenen neun Tiefenschichten erkennen. Die Wasserporen-Gehalte der jeweils 90 Sandblöcke der Schichten I, II, VIII und IX verteilen sich über nur ganz enge Bereiche. Für die Wassergehalte der Schichten III und VII gilt: Sie zeigen ein deutliches Maximum, streuen aber über einen größeren Bereich. Die Wassergehalte der Sandblöcke der Schichten IV, V und VI streuen über noch größere Bereiche, weisen aber dennoch stets ein erkennbares Maximum auf. Wenn man die Häufigkeitsverteilung der Wasserporen-Anteile aller 810 Sandblöcke betrachtet, fällt eine kontinuierliche Verlagerung der Verteilungsmaxima von gering zu hoch mit zunehmender Tiefe auf. Der sehr gleichmäßige von oben nach unten gerichtete Feuchtegradient und die gleichmäßige Wasserverteilung innerhalb der Tiefenschichten deuteten sehr stark auf einen piston flow hin.

Abbildung 4.67 gibt in mosaikhafter Form die Wassergehalte der 810 entnommenen Sandblöcke wieder. Neben dem schon aus Abb. 4.63 erkennbaren von oben nach unten gerichteten stetigen Anstieg der Wassergehalte von < 1 Vol.-% auf > 15 Vol.-% war die Verteilung innerhalb der Tiefenschichten im Vergleich zu den Versuchen I und II gleichmäßig. Nur die Randbereiche, besonders der linke, waren teilweise etwas trockener als die Kernzonen der Sandschichten.

Abb. 4.66: Wassergehalte in Vol.-% in den kubischen 1 dm³-Blöcken der Sandfüllung nach Abflussende

Abb. 4.67: Verteilung der Wasserporen-Volumina der 1 dm³-Sandblöcke in den Schichten I bis IX

4.5.4 Visuelle Beobachtungen

In Versuch III wurden ebenfalls in 24-Stundenabständen von den beiden Schauseiten Frontal- und Schrägfotos gemacht. Aus den Fotos wurden wieder Fließmuster-Skizzen abgeleitet. Abb. 4.68 bringt davon die der ersten elf Tage nach Beginn der Beregnung, d.h. der Phase des Eindringens des Beregnungswassers in den trockenen Sand.

Das Vordringen der Wasserfront vollzog sich in diesem Versuch auffällig gleichmäßig. Nur gelegentlich kam es zu einem kurzen, wenige Millimeter betragenden lateralen Vorseilen des Wassers auf Schichtstrukturen. Während die Auffüllung des oberen Abschnitts der Sandsäule sich offensichtlich recht gleichmäßig in Form des piston flows vollzog, kam es in der basalen Sandlage zu einer präferentiell vorseilenden Auffüllung der untersten Zentimeter und darüber zu Lufteinschlüssen mit lateralem Vordringen des Wassers und nur allmählicher Wasseraufnahme, welche die Farbe des lufttrockenen Sandes langsam überdeckte.

Abb. 4.68: Fließmuster während des Eindringens von Lösung in den lufttrockenen Sand
(Versuchstag 1 bis 11, vor dem Einsetzen des Abfließens)

4.5.5 Tonlamellen

Nach Beendigung des freien Ablaufens des Beregnungswassers zeigten sich bei der Entnahme der 1 dm³-Sandwürfel in den unteren 13 cm des Lysimetersandkörpers (Schicht IX) gut ausgeprägte Tonlamellen (Abb. 4.69 und Abb. 4.70). Sie waren von rötlich brauner Farbe und unterschieden sich dadurch von dem dunklen braun-grauen Ton, der als Suspension verregnet worden war. Es musste sich also bei dem Ton der Lamellen um Ton handeln, der im Füllsand enthalten gewesen, durch das absickernde Wasser mobilisiert und transportiert worden war.

In Abbildung 4.71 ist an einzelnen über die Fläche des Lysimeters verteilten Säulen aus 1 dm³-Blöcken die vertikale Verteilung der Tongehalte dargestellt. Die Lamellenzone war innerhalb des transparenten braun markierten unteren Säulenabschnitts angelegt, in dem die vor dem Einfüllen des Sandes ursprünglichen Tongehalte von maximal 1,56 Gew.-% vorlagen. Die Tongehalte in den braunen Lamellen und den helleren bräunlich-grauen Zwischenlamellen waren wegen der unzulänglichen Präparierbarkeit und der geringen Tongehalte kaum messbar unterschiedlich und streuten um diesen Wert. Es war also offenbar kein Transport oder keine quantitativ merklich ins Gewicht fallende Tonverlagerung über größere Strecken hinweg erfolgt.

Der durch die Berechnung zugeführte Ton hatte die basalen Schichten des Lysimeters nicht erreicht, bzw. nur in zweien der Lysimeterecken und über einzelne Randzellen. Er erreichte ein Anreicherungsmaximum, das meist in der Tiefe von 30 – 40 cm (blau – magenta) lag, mit einer Vorlaufaufnahme bis in 60 cm Tiefe und einer Nachlaufschleppe, die bis an die Oberfläche reichte. Zieht man von den in diesem gesamten Bereich gemessenen Tongehalten ($\bar{\varnothing}$ 3,05 Gew.-%) die in den Basalabschnitten des Lysimeters vorliegenden ($\bar{\varnothing}$ 1,17 Gew.-%), als Grundgehalte des Sandes angenommenen Tongehalte ab, so errechnen sich für das Lysimeter insgesamt 1602 g an eingetragenen Ton. Die größte gemessene Anreicherung trat in dem Sandblock Schicht IV / Reihe C / Spalte 4 auf. Hier stieg der Tongehalt vom Grundgehalt um 5,31 Gew.-% auf 6,48 Gew.-% an. Tab. 4.9 zeigt zusammenfassend die durchschnittlichen Dichten und Tongehalte der Sandsäule für die Schichten I – IX.

Tab. 4.9: Durchschnittliche Dichten und Tongehalte der Sandsäule in den Schichten I - IX

Schicht	Tiefe (cm)	Dichte (durchschnittl.) (g/cm ³)	Tonmenge (durchschnittl.) in den entnommenen 1 dm ³ -Sandblöcken (g)	Tongehalt (durchschnittl.) der entnommenen 1 dm ³ -Sandblöcke (Gew.-%)	Tonmenge (durchschnittl.) je Schicht (g)
I	0 – 10	1,36	4,10 g	3,01	369,0
II	10 – 20	1,64	4,90 g	2,99	441,0
III	20 – 30	1,64	4,75 g	2,90	427,5
IV	30 – 40	1,64	6,45 g	3,93	580,5
V	40 – 50	1,62	5,20 g	3,21	468,0
VI	50 – 60	1,85	4,20 g	2,27	378,0
VII	60 – 70	1,92	1,60 g	0,83	144,0
VIII	70 – 80	1,77	2,00 g	1,13	180,0
IX	80 – 90	1,47	2,30 g	1,56	207,0

Innerhalb der Lysimeter-Tiefenabschnitte, in welche die aufgebrauchte Tonsuspension infiltriert war, traten keine Tonlamellen auf. Der Sand nahm aber im oberen Bereich bis etwa 40 cm Tiefe (Lage des Maximums der Tonanreicherung) eine graue Schattierung an, die keine räumliche Differenzierung erkennen ließ. Auch dieses lässt sich in Übereinstimmung mit dem Mosaik der statischen Wassergehalte in Abbildung 4.66 als ein Hinweis auf eine mehr oder weniger frontale Abwärtsverdrängung des Sickerwassers deuten.

Für die Interpretation der Tonlamellen an der Basis des Lysimeters sei auf den Umstand hingewiesen, dass hier bei 10 bis 12 Vol.-% Poren mit statischer Wasserfüllung ca. 22 % Poren mit Luftfüllung vorlagen, und dass dieses Verhältnis auch während des Fließ-Gleichgewichts-Zustandes nicht wesentlich anders gewesen sein dürfte. Es muss hier unten zu einem Luftstau – möglicherweise über einer geschlossenen Zone tragender Menisken zur aus Kies bestehenden Unterlage – gekommen sein.

Abb. 4.69B blendet die Lage der aktiven Abflusszellen unterhalb der gebänderten Basalschicht des Lysimeters ein. Man erkennt daran die starke flächenmäßige Differenzierung der Abflussmengen. Da im oberen Teil des Lysimeters keine sichtbaren Befunde eines präferentiellen Wasserfließens und keine lamelläre Ausbreitung des eindringenden Wassers zu erkennen gewesen sind, sondern vielmehr der Eindruck einer frontalen Abwärtsverdrängung vorherrschte, lag folgende Annahme nahe: Durch die mögliche Ausbildung einer abdichtenden Wasserlamelle an der Grenze Sand/Kies kommt es erst in den untersten Abschnitten des Lysimeters zu Lufteinschlüssen, damit zu einer starken lateralen Wasserbewegung in Wasserlamellen und damit erst hier in dieser Tiefe zur Ausbildung eines präferentiellen Wasser-Abflusssystems an dafür günstigen Stellen.

Die „Maserung“ der Aufsichtsfläche in 80 cm Tiefe (Abb. 4.69A) kam dadurch zu Stande, dass beim Einfüllen des Sandes eine schwach wellige Oberflächenstruktur entstanden war, der Schnitt aber in horizontaler Ebene angelegt worden ist. Die Tonbänder folgten aber den Wasserlamellen und diese wiederum den Sedimentstrukturen, was den „Maserungs“-Effekt auslöste. Die Struktur der „Maserung“ ist in Abbildung 4.70 sowohl durch die Aufsicht als auch durch den vertikalen Schnitt durch die basale Sandschicht zu erkennen.

Abb. 4.69: Tonbänder (Aufsicht auf Schicht IX in 80 cm Tiefe)

Abb. 4.70: Tonbänder: Entstandene Strukturen in 70 bis 80 cm Tiefe
(Größenvergleich: 1 DM-Münze Ø 23 mm)

Abb. 4.71: Tongehalte der Tonsuspensionen ausgewählter 1 dm³-Sandblöcke der 0,9 m³-Sandsäule (gewonnen durch Zugabe von 1l H₂O demin. zu den vorher getrockneten Sandblöcken)

4.5.6 Interpretation

Der Versuch III brachte Messergebnisse und Beobachtungen, die zunächst widersprüchlich erschienen. Die visuellen Befunde, die Verteilung des infiltrierenden Tones und die Gleichmäßigkeit der Verteilung des statisch gebundenen Wassers in den oberen 7 dm der Sandfüllung des Lysimeters sprachen für das – hypothetisch erwartete – frontale Eindringen des Wassers und die Vorstellung einer dem piston flow entsprechenden vertikalen Verdrängung der Luft ohne erkennbare Präferenz von Leitbahnen.

Die flächenmäßige Differenzierung der Tages-Abflussraten in den Auslässen und besonders das zeitliche Pendeln der Abflussraten der Abflusssutzen-Gruppen lieferten dagegen doch wieder eindeutige Hinweise auf ein präferentielles Fließen. Kann dieser Widerspruch aufgelöst werden?

Eine mögliche Antwort ergibt sich aus den Abschnitten 4.5.4 und 4.5.5. Danach war das Fließgeschehen in den oberen 70 bis 80 cm offenbar von einem durch frontale Abwärtsverdrängung mit piston flow gekennzeichneten Aufbau eines recht einheitlichen Wasser transportierenden Porenleitsystems beherrscht. Die laterale Differenzierung des Wasserflusses in Form eines dispersiven präferentiellen fingerförmigen Fließens erfolgte erst in den unteren 10 bis 15 cm der Sandsäule, wobei die ausschlaggebende Bedingung möglicherweise eine geschlossene Front von Wassermenisken an der Grenzschicht Sand/Kies war, die als Luftventil wirkte.

Versuch III lieferte damit gewissermaßen ein Zweizonen-Modell, das auf der einen Seite die Existenz von Bedingungen für frontale Abwärtsverdrängung in feinen Sanden aufzeigt, auf der anderen Seite aber auch die recht weittragenden disproportionierenden Störungen des Wasser- und Stofftransportes durch Meniskenlamellen bildende Sedimentstrukturen zu beachten zwingt.

5 Ergebnisse – Deutung – Kritik – Schlussfolgerungen

5.1 Wasserlamellen

Wasserlamellen entstehen beim absteigenden, durch Druck- und Saugkräfte hervorgerufenen vertikalen Eindringen von Wasser in trockenen Sand. Über den dazu erforderlichen Grad der Trockenheit des Sandes lassen die durchgeführten Untersuchungen keine bindende Aussage zu, da sie nur mit lufttrockenem Sand durchgeführt worden sind. Es dürfen jedoch zumindest keine Wasserlamellen existieren, und die Porenluft muss großräumig zusammenhängend vernetzt sein.

Lässt man den Sand nicht austrocknen, wie das sonst durch die Wurzelausbreitung und Transpiration der Pflanzen geschieht, kann das einmal angelegte Lamellensystem dauerhaft bestehen bleiben. Das ist offenbar auch noch bei einer Erniedrigung des statischen Wassergehalts auf zwei Drittel der Fall.

Die Form, die Lage und die wechselseitige Anordnung der Lamellen im Verband des Sandkörpers unterliegt – abgesehen von feinstrukturellen Vorgaben – weitgehend dem Zufall. Nach der Austrocknung eines vorher im Befeuchtungsgang trockenen Sandes erzeugten Lamellensystems wird bei der Wiederbefeuchtung meist ein völlig anders strukturiertes System von Lamellen und vertikalen Fließbahnen erzeugt, sofern nicht beim ersten Mal durch vom Wasser mitgeführte und in den ersten Lamellen abgesetzte Kolloide, z.B. Tonminerale, eine Festlegung der Orte für die Anlage von Wasserlamellen stattgefunden hat (siehe Tonbänder!).

In den hier vorgestellten Versuchen und dem daraus entwickelten Anschauungsmodell A (Abb. 3.13) folgt die Anordnung der infiltrativ gebildeten Wasserlamellen der Schichtungsstruktur des Sandes. Obwohl dieser vor der Einfüllung in die Lysimeter durch die Siebung in Kornfraktionen aufgetrennt worden war, die gegenüber dem natürlich gekörnten Sand relativ eng begrenzt worden waren, z.B. 630 – 355 μm , gelang es nicht, damit homogene Sandpackungen zu erzielen. Beim Einfüllen fand immer eine – wenn auch schwache – sedimentäre Entmischung der Körner statt. Sie führte selbst bei einem sehr verlangsamten Einfüllen zu einer dünnsschichtigen Gliederung der geringmächtigen Sedimentlagen in feiner- und grobkörnigere Zonen.

Diese sind gemäß Strukturmodell A die Ursache dafür, dass sich die entstehenden Wasserlamellen – häufig unter Überspringung mehrerer Sedimentlagen – in ihrer Lage an diese Schichtgrenzen halten und sie damit – sei es in horizontaler oder aber auch in stärker geneigter (nicht senkrechter) Anordnung – nachzeichnen. Das Modell versucht auch zu erklären, wie die sedimentäre Korngrößendifferenzierung einzelner Sedimentlagen die Verteilung des Wassers in wassergesättigte Docht- und Einstauzonen und in mit okkludierter Luft erfüllte Zwischenlamellen bestimmt.

Viele andere Versuche zur Herstellung homogener Sandpakete sind fehlgeschlagen. So führt z.B. das Verrühren von geschichtet eingefülltem Sand dazu, dass die Sedimentlagen zwar zerbrochen werden, aber als Bruchstücke in dem neuen Sandkörper erhalten bleiben, wodurch bei der Infiltration von Wasser eine wirre Anordnung von Lamellen entsteht. Das sind Erscheinungen wie sie in Sanden, die durch pleistozäne Kryoturbation beeinflusst sind, häufig beobachtet werden können. Möglicherweise könnten mit einem sehr großen Aufwand durch sehr feine Unterteilungen der Siebfraktionen hinreichend gleichkörnige Sandmaterialien erzeugt werden, die sich beim Befüllen des Lysimeters nicht mehr sedimentär entmischen.

5.2 Fließen von Wasser, Lösungen und Suspensionen

Grundsätzlich werden zwei Arten des Strömens von Wasser beobachtet:

1. Vertikal: Von oben oder von der Seite zuströmende Flüssigkeit lässt die vorgebildeten Wasserlamellen anschwellen bis deren hydrostatischer Druck groß genug ist, um den Widerstand der tragenden Menisken an ihrer Basis örtlich zu überwinden, in Schloten durch die lufthaltigen Zwischenlamellen zu brechen und die darunter liegende Wasserlamelle anschwellen zu lassen. Dieser Vorgang ruft eine zeit beanspruchende „Wellenform“ der Abwärtsbewegung hervor und ist damit die Ursache für einen gegenüber dem statischen Wassergehalt wesentlich höheren dynamischen Wassergehalt im Zustand des Fließgleichgewichts.

2. Horizontal oder mit Neigungswinkel: Mit dem Anschwellen der Lamellen nimmt deren laterale Leitfähigkeit zu. Bei hohen Durchsatzraten der Flüssigkeit oder höheren Widerständen an der Untergrenze der Wasserlamelle zur luftführenden Zwischenlamelle hin, können erhebliche Raten des Flusses seitlich zu neuen Sickerzungen abgeleitet werden.

Eine die Erscheinungen des Fließens zusammenfassende Modellvorstellung ist das Modell B in Abb. 3.35. Schon dicht unterhalb der Sandoberfläche sorgen die bei Befeuchtung des trockenen Sandes entstehenden Wasserlamellen für eine laterale Disproportionierung des gleichmäßig auf die Oberfläche des Sandes aufgetragenen Niederschlagswassers. Dies führt an den Stellen, wo das Wasser nach der Erstbefeuchtung lateral lamellenförmig zusammenströmt, zur Ausbildung von vertikalen Dränungen. Diese sind – wenn nicht zwischenzeitlich eine Austrocknung erfolgt – während der fortgesetzten Beregnung lagestabil, können aber nach einer Austrocknung der Lamellen an sehr verschiedenen Stellen neu ausgebildet werden.

Die dem Modell beigegebene Beschreibung der Phänomene -A- bis -H- und die damit verbundene Übersicht über die verwendeten Begriffe beleuchtet auch die Erscheinung des lateralen Flüssigkeitstransportes in besonders gut leitenden Wasserlamellen und zwar tiefer unterhalb der Sandoberfläche. Dies kann zur Entstehung neuer seitlich versetzter konkurrierender Sickerzungen führen. Insgesamt entsteht dadurch ein Wasserleitsystem, das hier mit dem Begriff „Kaskaden-Fließsystem“ belegt worden ist.

Dies hat für das in den Hauptversuchen überraschenderweise anhand der Abflussraten der Abflusstutzen im Lysimeterboden beobachtete „Pendeln“ der Wasseraustritte Bedeutung.

Selbst bei konstanten Regenraten, besonders aber bei deren Variation beim Ablaufenlassen des Wassers nach Beregnungsende wird einmal die eine, einmal die andere Dränung aktiv.

Eine Erklärung dafür liefert die am Anfang genannte Abhängigkeit der Disproportionierung des Gesamtflusses in Vertikal- und Lateralfluss von Stauphänomenen, die unter anderem auf den Durchsatzraten der Flüssigkeit beruhen.

5.3 Statische und dynamische Wasserkapazität

Die im Zuge der Befeuchtung trockenen Sandes von oben her entstehenden Systeme von Wasserlamellen-Kaskaden führen bei den gewählten Sandkörnungen immer zu Lagen eingeschlossener Luft – wobei die Schwierigkeit besteht, deren Luftdruck zu messen. In einem Fall ließ sich eine Druckerhöhung in „Luftkissen“ nachweisen.

Wie frühere Versuche mit unter Wasser sedimentiertem Sand gezeigt haben, bilden sich aber auch Wasserlamellen beim Ablaufenlassen des Wassers heraus während Luft einströmt.

Im Zustand des Fließgleichgewichts zwischen Beregnungs- und Abflussraten wie auch im Zustand nach freiem Ablaufen des Wassers ist in den durchgeführten Versuchen mit Beregnung die Wasser-Haltefähigkeit stets geringer als sie z.B. bei der Vorbereitung von Ψ - Θ -Charakteristika nach Tauchsättigung und anschließendem Ablaufenlassen des Wassers aus den Stechzylinderproben ist.

Es ist schon darauf hingewiesen worden, dass infolge der Zeitabhängigkeit des vertikalen Fließvorganges die dynamischen „Fließgleichgewichts“-Wasserkapazitäten mit den Wasserdurchsatzraten steigen. Die Darstellung der Tages-Zufuhrdaten und der Tages-Abflussraten zeigt aber, dass auch bei konstanter Beregnung intermediär dynamische Wasservorräte auf- und abgebaut werden. Dies kann als ein weiterer Hinweis darauf dienen, dass das im Sand hergestellte Fließsystem aus Wasserlamellen und Dränzungen einem kurzfristigen Wechsel seiner Inanspruchnahme durch absickerndes Wasser unterliegt.

Wenn nach dem Ende der Beregnung beim freien Abfließen des Wassers plötzlich überproportionale Raten des Abfließens beobachtet werden, kann dies versuchsweise damit erklärt werden, dass komprimierte Luftpakete durch Aufhebung der umschließenden Wassermäntel druckentlastet werden und infolgedessen ihre wassertragenden Funktionen aufgeben.

Tensionsverteilungen des Speicherwassers wurden nicht vorgenommen, doch kann die Tiefenverteilung der Wassergehalte nach dem freien Ablauf Hinweise geben. Im groben Mittelsand ist keine kapillare Sättigungsbeziehung zur Abflussbasis zu erkennen. Das gesamte im Boden gehaltene Wasser dürfte tensionslos sein, d.h. keine negativen, höchstens positive Tensionen aufweisen. Bei der feineren Sandfraktion, die zudem Feinsand und Schluff enthält, ist dagegen eine klare Höhenabhängigkeit des kapillaren Poren-Füllungsgrades mit Wasser gegeben, was auf einen höheren Anteil von kohärenten Kapillaren hinweist.

Trotzdem „behindern“ diese Kapillaren nicht die Ausbildung von Wasserlamellen. Beide Phänomene können also in dem selben Bodenmaterial nebeneinander auftreten. Dabei wird mit zunehmender Feinheit des Sandes das Phänomen der Lamellenbildung abnehmen.

5.4 Stofftransport

Im Wechsel von Austrocknung, Wiederbefeuchtung und Durchfluss unterliegt der Transport ionar und kolloidal gelöster Stoffe einer vielfältigen Differenzierung.

1. Beim Eindringen in den trockenen Sand entsteht eine bestimmte Zahl von lateral wachsenden Lamellen, die als „tot“ bezeichnet werden können, weil sie später durch keinen der beiden Lösungsströme vertikal oder lateral durchflossen werden. Die infiltrierten Solute werden an Ort und Stelle konserviert. Sie können durch eindringende Pflanzenwurzeln entzogen werden, oder durch Diffusion zu den Durchfluss-Kaskaden hin wandern. Die Diffusionswege sind jedoch in Leitsystemen wie in den hier vorgestellten so lang, dass bei den saisonal kurzen Phasen des natürlichen Boden-Wasserhaushaltes dadurch kein ins Gewicht fallender Konzentrationsausgleich zwischen den „toten“ und bewegten Teilen des Wassernetzwerkes bewerkstelligt wird.

Man weiß bislang recht wenig über die Tiefe der Ausschöpfung von Lamellenwasser in Sanden unter landwirtschaftlichen Kulturen. Es ist aber denkbar, dass nach einer tiefgreifenden Austrocknung auch unterhalb oder in tieferen Abschnitten des Wurzelraums (ET-Zone) „tote“ Wasserlamellen neu entstehen. Deren Solutfracht muss dann als eine Dauerlast betrachtet werden. Die in den in dieser Arbeit bei der Gewinnung der Modellsande angetroffenen Cl⁻-Grundbelastungen und die nach der bis zur Chloridfreiheit des Sickerwassers betriebenen Durchspülung des Sandes im Sand verbliebenen Cl⁻-Mengen müssen als ein Resultat der Totlamellenbildung angesehen werden.

2. Werden im stationären Fließzustand, d.h. im annähernden Zustand der Gleichheit von Beregnungs- und Abflussraten ionare (Cl⁻, NO₃⁻) oder feinkolloidale (Farbstoff Amaranth) Tracer in Form von Pulsen dem Regenwasser zugesetzt, werden in der Lysimeter-Abflusslösung typische Erscheinungen des dispersiven Stofftransports in Zusammenhang mit „preferential flow“ beobachtet. Der Scheitelpunkt der Austrittskonzentration wird rasch, d.h. nach einem steilen Ansteigen der Konzentration erreicht. Danach weisen lange „Konzentrationsschleppen“ auf eine dispersive Verdrängung hin.

Solche Angaben sind auf den Gesamtabfluss am Lysimeterboden bezogen. Da aber in den hier angestellten Versuchen die Lysimeterbasis in zahlreiche Abflussauffänger untergliedert ist, lässt sich hier folgende Interpretation des dispersiven Transports geben: Unter Zugrundelegung des Kaskadenmodells lassen sich zahlreiche lateral stark divergierende und anastomosierende Fließbahnen denken, die allein aufgrund einer unterschiedlichen Länge und verschiedener Leitwiderstände in den individuellen Bahnen zeitliche Verzögerungen in der Weitergabe der Tracerpulse verursachen, nicht aber eine Abschwächung der Ausgangskonzentration.

Beachtlich sind in diesem Zusammenhang die nach dem Ende der Beregnung erforderlichen Zeiten für den freien Abfluss bis zum Erreichen eines statischen Endwassergehaltes. Er korrespondiert sowohl im Hinblick auf den Wasser- wie den Solutgehalt nicht mit der 3-Tagesvorgabe für die „Feldkapazität“.

Der finale statische Zustand ist dadurch charakterisiert, dass – bis auf die Basis der Lysimeter, wo über den basalen tragenden Menisken Wasserstau herrscht – unter einem allgemeinen internen Druckausgleich auf $\Psi = 0$ das Restwasser überwiegend in den vorher durchflossenen Wasserlamellen gespeichert bleibt, bei denen der hydrostatische Auflastdruck nun nicht mehr ausreicht, um Wasser durch die Luftkissen der Interlamellaren zu pressen.

Die Verlagerung grobdisperser Kolloidalsubstanz - wie silikatischem Ton - folgt den Transportwegen der Solute. Er wird jedoch in den hier durchgeführten Experimenten nur dort in lamellenförmiger Anreicherung sichtbar, wo bei starker Sickerwasserbewegung viel Ton zugeführt wird und sich die Suspension lateral ausbreiten kann.

Bedenkt man den Umstand, dass alle mit reinem Wasser oder ionar-feinkolloidalen Soluten erzeugten Fließstrukturen mit der nächsten Austrocknung wieder völlig aufgehoben werden und bei Wiederbefeuchtung gänzlich neue Fließsysteme entstehen, dürften in der Natur eigentlich keine stärker ausgeprägten Tonlamellen in Erscheinung treten. Dass dies jedoch der Fall ist, lässt sich aufgrund der hier angestellten Untersuchungen nur so beantworten, dass der als „Tracer“ im Sickerwasser mitgeführte Ton die Wasserlamellen nicht nur markiert, sondern auch für den nächsten Befeuchtungsgang lagemäßig vorbestimmt.

6 Zusammenfassung

An zwei durch Absiebung aus pleistozänem Vorschütt sand gewonnenen Kornfraktionen, grobem Mittelsand 630 - 355 μm Durchmesser und feinem Mittelsand < 355 μm Ø inklusive etwas Feinsand und Schluff, wird in rechteckigen Glaslysimetern unterschiedlicher Größe (in den Hauptversuchen annähernd 1m³) der durch Beregnung des Sandes ausgelöste Prozess des Aufbaus eines Wasserleitsystems und dessen quantitatives Funktionieren untersucht. Die Böden der großen Lysimeter sind mit zahlreichen Abflusssutzen versehen, die in separate Sammelgefäße münden, um die laterale Differenzierung des Abflusses zu erfassen. Der Sand wird mit einer Füllmaschine im trockenen Zustand in dünnen Schichten gleichmäßig eingefüllt, die Regenraten mit einer Beregnungsmaschine gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt.

In einer Reihe von Vor- und Begleituntersuchungen mit kleineren Lysimetern mit von Hand-Befüllung und –Beregnung wird der ersten Aufgabe nachgegangen, den Aufbau eines Wasserleitsystems zu verfolgen, das aus horizontalen Wasserlamellen und vertikalen Dränzungen besteht, die sich zusammengenommen zu einem kaskadenförmigen Leitbahnsystem für Wasser und Lösungen vereinigen. In zwei Modelldarstellungen wird zum einen der Mechanismus der Lamellenbildung in Anlehnung an die Schichtfugen des Sandes dargestellt und die Funktion der Lamellen bei deren vertikaler und lateraler Durchströmung beim Durchfließen von Wasser behandelt, zum anderen die Konnektion der Lamellen und Dränzungen zu einem Kaskaden-Fließmodell behandelt.

In mehreren Ansätzen wird die Abhängigkeit der Lamellen- und Dränzungen-Bildung, Lage, Dicke, Neigung, Schwellen und Schrumpfen beim Durchstrom von Wasser und die Abstandsgröße von der Schichtung und Körnung des Sandes, die Frage des lateralen Lamellenwachstums und die Bedeutung der Diffusion für den Stofftransport untersucht, die als gering eingeschätzt werden muss.

Es wird zwischen „toten“ und durchstömungsaktiven Lamellen unterschieden, wobei erstere in der Phase der Befeuchtung des trockenen Sandes entstehen und später nicht mehr an der Durchströmung von Wasser teilnehmen, so dass sie mit ihren Soluten als isolierte Körper bis zur nächsten Austrocknung durch Wurzeln im Sand verbleiben. Nach einer solchen evapotranspirativen Trocknung des Sandes entstehen bei einer erneuten Befeuchtung die Lamellen- und Dränzungen-systeme meist an völlig neuen Stellen – es sei denn, dass vom Wasser mitgeführter und an den Wasserlamellen abgesetzter Ton die Stellen für eine erneute Wasserlamellenbildung vorgibt.

Die mit ionaren (Cl, NO₃) und feinkolloidalen Tracern (Amaranth) sowie Tonsuspensionen durchgeführten Pulsversuche zeigen die charakteristischen Erscheinungen des dispersiven Stofftransportes in Zusammenhang mit präferentiellern Fluss. Dieser wird im wesentlichen durch die verschieden langen Fließwege des lateral stark differenzierten Flüssigkeitsleitsystems bedingt.

Neben diesen Ergebnissen werden darauf aufbauende Ergebnisse und Phänomene für die Übertragung ins Gelände behandelt, wie die Frage der dynamischen und statischen Wasserkapazität, des pendelnden Abflussgeschehens und der möglichen Ansätze für eine quantitative Erfassung des Wasser- und Stoffhaushaltes von Sandböden.

7 Literatur

- BECKER, K.W., B. MEYER u. W. MUCH, 1997: Versickerungsverhalten von Ackerböden auf glazialen Vorschüttssanden
Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 85, I, 63 – 66
- COREY, J.C. und J.H. HORTON, 1968: Movement of water tagged with ^2H , ^3H und ^{18}O through acidic kaolinitic soil
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 32, 471 - 475
- DEURER, M., 2000: The dynamics of water and solute flow in the unsaturated zone of a coniferous forest: Measurement and numerical simulation.
Horizonte, Herrenhäuser Forschungsbeiträge zur Bodenkunde, Bd. 2, Der andere Verlag, Osnabrück
- DIJKERMAN, J.C., CLINE, M.G. und G.W. OLSON, 1967: Properties and genesis of textural subsoil lamellae
Soil Science, 104, 7 - 16
- GERNANDT, P., 1998: Räumliche Differenzierung der Sickerwasserströme in Sandmodellen
Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 88, 363 - 366
- GERNANDT, P., K.W. BECKER u. B. MEYER, 2001: Horizontale Differenzierung des vertikalen Wasserflusses in groben Mittelsanden in einem Modelllysimeter
BAL-Bericht 9. Lysimetertagung, 157 - 158
- GERNANDT, P. und B. MEYER, 2001: Wasser- und Stofftransport in Sanden. Erkenntnisse aus Modellversuchen in Glaslysimetern
Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 96, I, 73 -74
- KURTZ, L.T. und S.W. MELSTED, 1973: Movement of chemicals in soils by water
Soil Science, 115, 231 - 239
- KUTILEK, M. und D.R. NIELSEN 1994: Soil hydrology: textbook for students of soil science etc.
Catena Verlag, Cremlingen
- MEYER, B., und K.W. BECKER, 2001: Kaskadenfluss in Böden und Folgen für die Anwendung der Lysimetertechnik
BAL-Bericht 9. Lysimetertagung, 205 - 206
- MEYER, B., 2002: mündliche Mitteilung
- MIYAZAKI, T. et al., 1993 : Water flows in soils
Marcel Dekker, Inc., New York Basel, Hong Kong
- MOSCHREFI, N., 1967: Modelluntersuchungen über die Ursachen, Größen und Wirkungen der Wasserbewegung im Boden bei ungesättigtem Feuchtezustand II: Experimentelle Herstellung von Infiltrationstonlamellen (-Bändern) in Modellböden mittels Wasserbewegung im ungesättigten Feuchtezustand
Dissertation, Fakultät f. Agrarwissenschaften, Universität Göttingen
- MUCH, W., 1996: Wasserversickerung in Ackerböden aus Sand: Chlorid-Tracerversuche auf drenthezeitlichen Vorschüttssanden
Diplomarbeit (unveröffentlicht), Inst. f. Bodenwiss., Universität Göttingen
- MÜSSEMEIER, A., 1996: Die vertikale Wasserverdrängung in schluffigen Sandackerböden, ermittelt mit Chloridmarkierung im Wasserschutzgebiet Hagen, Kreis Hannover
Diplomarbeit (unveröffentlicht), Inst. f. Bodenwiss., Universität Göttingen
- RITSEMA, C.J., 1998: Flow and transport in water repellent sandy soils
III.Hochschulschrift: Wageningen, Landbouwniv., Proefschr., 1998

- SCHLINDWEIN, S.L., 1992: Dispersiver Tracer- und Austauschionentransport bei geringem ungesättigtem Flux durch Aggregat-Packungen des Basalt-Latossollo-Roxo Südbrasi-
liens
Göttinger Bodenkundliche Berichte Bd. 101, Selbstverlag Institut für Boden-
wissenschaft der Universität Göttingen, Göttingen
- SCHMALZ, B. und B. LENNARTZ, 1999: Untersuchungen zur Variabilität des Wasserflusses in einem Sand-
modell
Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 91, I, 242 - 245
- SIEBNER, C., 1995: Lysimeterversuche zum Einfluss verschiedener Vegetationsformen auf den
Wasser- und Nährstoffhaushalt von Sandböden der Colbitz-Letzlinger Heide
Diplomarbeit (unveröffentlicht), Inst. f. Bodenwiss., Universität Göttingen
- SIEBNER, C., K.W. BECKER u. B. MEYER, 1997: Beobachtungen zum dispersiven Wasser- und Soluttrans-
port in Sandböden
Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 85, I, 167 - 170
- WALTHER, W., G. STRAUCH, K.-C. KERSEBAUM, F. REINSTORF u. W. SCHÄFER, 2002: Zum Kenntnis-
stand über Umsetzung von Nährstoffen in der Dränzone und im
Grundwasser über deren Novellierung 2. Teil: Einsatz von
Markierungsstoffen und mathematischen Modellen zur Beschreibung von
Transport und Umsatz von Makronährstoffen in der wasserungesättigten
Zone und im Grundwasser
Landnutzung und Landentwicklung 43, 97 – 102
- WEILER, M.H., 2001 Mechanisms controlling macropore flow during infiltration
Diss., Technische Wissenschaften ETH Zürich, Nr. 14237
URL: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=diss&nr=14237>

Lebenslauf

Geburtsdatum: 25.01.1968

Geburtsort: Göttingen

Schulbildung:	1974 - 1978	Albani-Grundschule in Göttingen
	1978 - 1984	Personn-Realschule in Göttingen
	1984 - 1987	Otto-Hahn-Gymnasium in Göttingen

Wehrdienst:	1987 - 1988	Grundwehrdienst im Pionierbataillon 2
-------------	-------------	---------------------------------------

Hochschulausbildung:	1988 - 1996	Geographiestudium / Georg-August-Universität in Göttingen Abschluss: Diplom-Geograph
	1998 - 2003	Promotionsstudium / Georg-August-Universität in Göttingen Abschluss: Dr.sc.agr.

Tätigkeiten während und nach des Studium:	<ul style="list-style-type: none">- NLfB: Praktikum im Rahmen der bodenkundlichen Landes- aufnahme im Bereich Wieren (1992)- Büro für Boden- und Wasser-Bewertung in Gillersheim Praktikum und Mitarbeit (1992 – 2000)- Inst. f. Bodenwissenschaft in Göttingen Wissenschaftlicher Mitarbeiter (1998 – 2002)
---	--