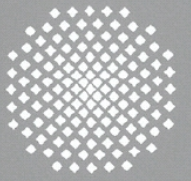
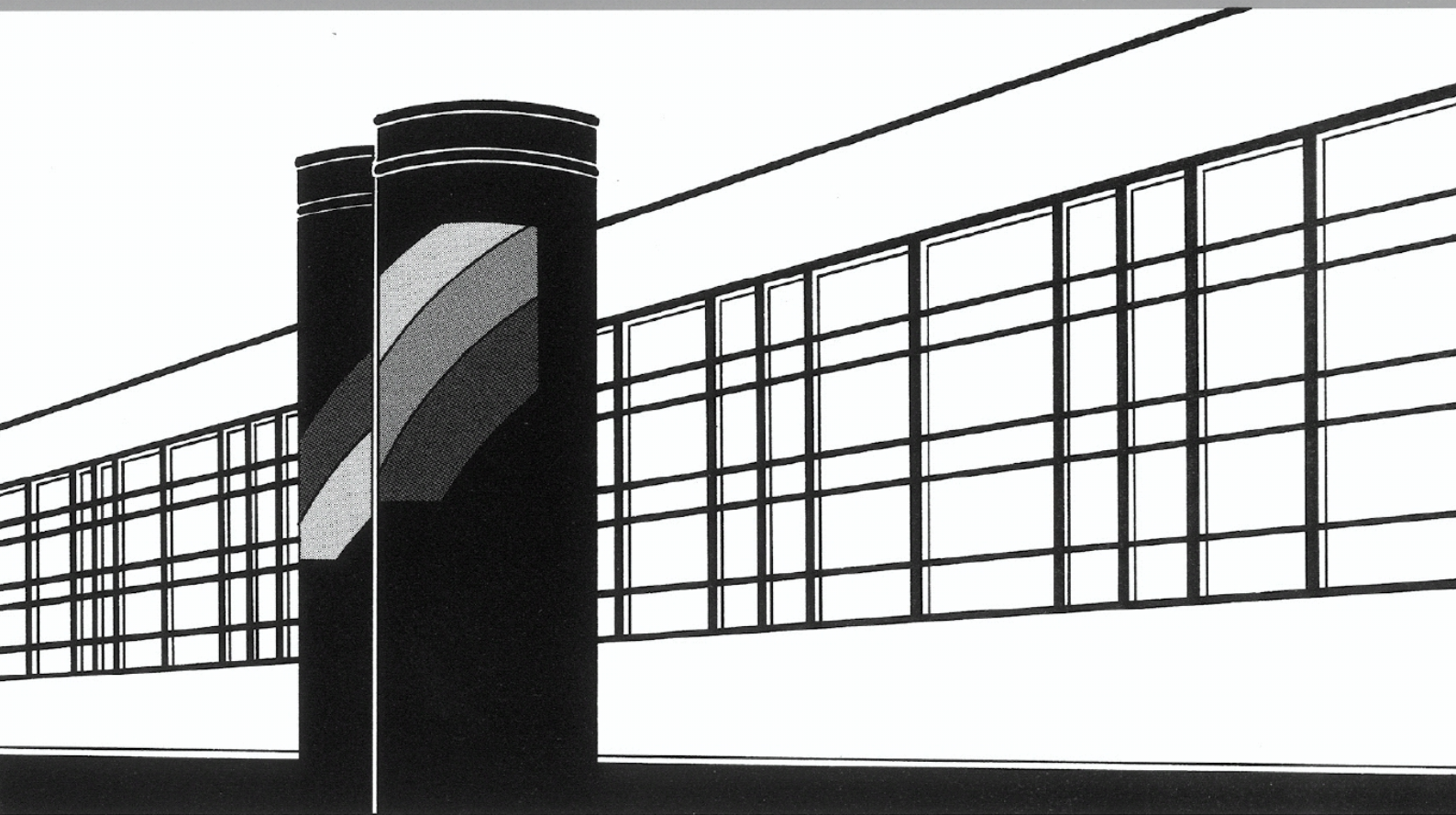


Universität Stuttgart



Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung

Mitteilungen



Heft 245 Kai Germer

Wasserinfiltration in die ungesättigte Zone
eines makroporösen Hanges und deren
Einfluss auf die Hangstabilität

Heft 245 Wasserinfiltration in die
ungesättigte Zone eines
makroporösen Hanges und
deren Einfluss auf die
Hangstabilität

von
Dr.-Ing.
Kai Germer

D93 Wasserinfiltration in die ungesättigte Zone eines makroporösen Hanges und deren Einfluss auf die Hangstabilität

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://www.d-nb.de> abrufbar

Germer, Kai:

Wasserinfiltration in die ungesättigte Zone eines makroporösen Hanges und deren Einfluss auf die Hangstabilität, Universität Stuttgart. - Stuttgart: Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, 2016

(Mitteilungen Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart: H. 245)

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2016

ISBN 978-3-942036-49-8

NE: Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung <Stuttgart>: Mitteilungen

Gegen Vervielfältigung und Übersetzung bestehen keine Einwände, es wird lediglich um Quellenangabe gebeten.

Herausgegeben 2016 vom Eigenverlag des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung

Druck: Document Center S. Kästl, Ostfildern

Wasserinfiltration in die ungesättigte Zone eines makroporösen Hanges und deren Einfluss auf die Hangstabilität

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Kai Germer

aus Braunschweig, Deutschland

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Durner

Tag der mündlichen Prüfung: 16.06.2016

Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung
der Universität Stuttgart
2016

Danksagung

Ich danke:

- Jürgen Braun für die langjährige gute Zusammenarbeit sowie für die engagierte Unterstützung und Betreuung meiner Forschungsarbeiten
- Prof. András Bárdossy und Prof. Wolfgang Durner für die Begutachtung der Arbeit und die Unterstützung in der Endphase der Erstellung der Doktorarbeit
- Prof. Reinhard Hinkelmann und Prof. Erwin Zehe für die langjährige Integration und freundliche Zusammenarbeit in der DFG finanzierten Forschergruppe "Großhang", in deren Rahmen die vorliegende Arbeit entstanden ist
- Jan Wienhöfer und Falk Lindenmaier für die freundschaftliche Zusammenarbeit und für die Einführung in das Untersuchungsgebiet "Heumöser" sowie Leopold Stadler für die vielen Diskussionen und Kooperationen
- Henning Eickhoff, Steffen Hägele, Oliver Trötschler und dem gesamten IWS-Werkstatt- und VEGAS-Team für die Unterstützung bei den experimentellen Aufbauten
- den vielen studentischen Hilfskräften, die bei der Durchführung der Experimente geholfen haben
- allen damaligen Kolleginnen und Kollegen und Freunden der VEGAS-Abteilung und der Abteilung Hydrologie und Geohydrologie für die gute Kollegialität und die schöne Zeit, die wir zusammen verbracht haben; insbesondere auch den Sekretärinnen dieser Abteilungen
- meinen Freunden und meiner Familie für die langjährige Begleitung und Unterstützung

Braunschweig, im August 2016

Kai Germer

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	XII
Abstract.....	XV
Kurzfassung	XIX
1 Einleitung	1
2 Bodensäulen-Experimente: Ermittlung von effektiven bodenhydraulischen Eigenschaften	11
2.1 Ziel und methodische Herangehensweise.....	11
2.2 Material und Methoden.....	13
2.2.1 Probennahmeort.....	13
2.2.2 Probennahme und Probenaufstellung im Labor.....	15
2.2.3 Gesättigte Durchflusseexperimente an quadratischer Bodensäule.....	17
2.2.4 Multi-Step-Outflow-Experimente an zylindrischer Bodensäule	21
2.2.5 Evaporationsexperimente an Bodensäulenteilstücken.....	32
2.2.6 HYPROP-Evaporationsexperimente an Kleinzylinder-Bodenproben.....	38
2.3 Ergebnisse	41
2.3.1 Gesättigte Durchflusseexperimente an quadratischer Bodensäule.....	41
2.3.2 Multi-Step-Outflow-Experimente an zylindrischer Bodensäule	47
2.3.3 Evaporationsexperimente an Bodensäulenteilstücken.....	66
2.3.4 HYPROP-Evaporationsexperimente an Kleinzylinder-Bodenproben.....	76
2.4 Gegenüberstellung und Diskussion der Ergebnisse der verschiedenen Methoden	83
2.4.1 Unterschiedliche Anfangswassergehalte	83
2.4.2 Makro- und Grobporenanteil	84
2.4.3 Kurvenverschiebung per Hand aufgrund der Annahme von gleicher Matrixzusammensetzung der Proben.....	87
2.4.4 Nachteil MSO-Methode mit nur einem Tensiometer	89
2.4.5 Einfluss der Probenlänge bei der Evaporations-Methode.....	90
2.4.6 Vergleich der ermittelten Durchlässigkeitskurven	91
2.5 Bodensäulen-Experimente: Zusammenfassung und Ausblick	97
2.5.1 Zusammenschau der wesentlichen Erkenntnisse und Interpretationen	97
2.5.2 Zusammenfassung und Ausblick.....	110

3	Makroporenfluss-Experimente: Ermittlung von Makropore-zu-Matrix-Wassertransfer	113
3.1	Einführung	114
3.2	Material und Methoden.....	118
3.2.1	Versuchsaufbau.....	118
3.2.2	Bodenphysikalische und -hydraulische Eigenschaften des benutzten Feinsandes.....	123
3.2.3	Versuchsdurchführung.....	125
3.2.4	Auswertungsmethodik	128
3.3	Ergebnisse und Diskussion	131
3.3.1	Laterale und vertikale Wasserausbreitung in Makropore und Matrix, erfasst mit Tensiometern und Intervallfotografie	131
3.3.2	Zusammenhang zwischen Makropore-zu-Matrix-Transfargeschwindigkeit und dem Matrix-Porenwasserdruck	150
3.3.3	Transfargeschwindigkeiten extrahiert aus Arbeiten anderer Autoren im Vergleich zu den hier ermittelten.....	157
3.4	Makroporenfluss-Experimente: Zusammenfassung und Ausblick.....	161
4	Böschungsbruch-Experimente: Porenwasserdruckabhängige Böschungsstabilität	165
4.1	Einführung.....	167
4.2	Material und Methoden.....	170
4.2.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	170
4.2.2	Versuchsvarianten.....	175
4.3	Ergebnisse	179
4.4	Diskussion.....	185
4.5	Böschungsbruch-Experimente: Zusammenfassung und Ausblick.....	188
5	Zusammenführung und Schlussfolgerung.....	191
	Literaturverzeichnis	i
	Anhang A: Probenaufstellung in der VEGAS Versuchshalle	ix
	Anhang B: Probenvorbereitung und Versuchsaufbau zu den K_s Messungen mit der quadratischen Bodensäule	x
	Anhang C: Probenvorbereitung und Versuchsaufbau zu den Multi-Step-Outflow Experimenten mit der zylindrischen Bodensäule.....	xii
	Anhang D: Probenvorbereitung und Versuchsaufbau zu den Evaporationsexperimenten.....	xvi

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1.1: Schematischer Längsschnitt (ca. 70 m lang) des oberen und mittleren Heumöser Hanges mit vereinfacht dargestellter Prozesskette von Niederschlag, über schnelle Makroporeninfiltration, über schnellen Druckübertrag in die Hangtiefe zur daraus resultierenden Hangbewegung (langsames Hangkriechen). 2
- Abb. 1.2: Aufbau der gesamten Arbeit schematisch zusammengefasst dargestellt; K_s = gesättigte hydraulische Durchlässigkeit, vs. = versus (= im Vergleich zu), MSO = Multi-Step-Outflow, EVA = Evaporation. 8
- Abb. 2.1: Übersichtskarte des Heumöser Hanges (eingenordet), der sich zwischen der Ortschaft Ebnit und dem Berg „Hohe Kugel“ befindet; der Bereich, in dem die Bodenproben entnommen wurden, befindet sich in einem steilen Bereich des Waldes im oberen Hangbereich und ist mit einem Quadrat (Bodensäulen Entnahmepunkt) markiert; zusätzlich dargestellt Bewegungsraten von verschiedenen Oberflächenbereichen (Abb. nach Lindenmaier et al., 2005). 13
- Abb. 2.2: Dreidimensionale Basisdarstellung als digitales Geländemodell (Luftbild, DGM) des Heumöser Hanges (Blickrichtung nach Südwest); das gesamte Untersuchungsgebiet ist mit durchgezogener Linie markiert; die Entnahmestelle der Bodenproben ist mit einem Quadrat gekennzeichnet (Abb. nach Jan Wienhöfer, pers. Mitt.; Copyright Luftbild: Geodaten-Land Vorarlberg). 14
- Abb. 2.3: Anlegen eines Bodenanschnitts zur Bodenprobenentnahme im steilen Bereich des Waldes, der in Abb. 2.2 mit einem Quadrat markiert ist. 14
- Abb. 2.4: Oben eine Fotoaufnahme des Bodenanschnitts während der Freilegung der Bodensäulen, die zylindrische Säule ist fertig freigegeben und mit den Stahl-Außenhüllenmodulen überzogen (oben links), 50 cm rechts davon findet gerade die Vorbereitung der Freilegung der quadratischen Bodensäule statt (grob freigegeben); unten links dargestellt die quadratische Bodensäule kurz vor dem Erreichen der exakten Abmessungen; unten rechts die mit Folien eingewickelte Säule mit einem übergestülpten Holzmodul (der sichtbare zwei Zentimeter-Spalt zwischen Holzmodul und Säulenaußenhülle wurde später mit Montageschaum gefüllt). 15
- Abb. 2.5: Schematischer Aufbau und Foto des Versuchsaufbaus für die wassergesättigten Durchflussexperimente an der quadratischen Bodensäule; über einen Konstant-Druck-Behälter wird das Wasser von unten nach oben durch die Probe gedrückt; an der Bodensäulenoberfläche kann das Wasser noch einige cm aufsteigen, bevor es seitlich kurz unter dem oberen Ende des Außenmoduls durch dessen Wand zum Abfließen gezwungen wird; kurz nach dem Ausfluss des Überstauwassers wird dieses durch eine Durchflusszelle geleitet, die mit einem Lichtleiterfluorometer verbunden ist; T-A bis T-D bezeichnen die vier installierten Tensiometer ;auf dem Foto ist unten in grau das nach außen hin wasserdicht befestigte Lochplattenmodul zu sehen; an der Bodensäulenoberfläche ist ein Wasserüberstau zu erkennen. 18
- Abb. 2.6: a) Herstellung der Hälften mittels Säge aus der Gesamtsäule, b) Hälften in der Durchflusssituation B (zur Orientierung: Seitlicher Holzgriff horizontal mit Pfeil darunter, der die laterale Durchflussrichtung hangabwärts anzeigt), zusätzlich gezeigt ein Rahmenaufsatz, der Überstau an der unteren Probenhälfte ermöglicht,

- c) Ablösung der Holzwandungen für den Umbau auf lateralen Durchfluss, d) Hälften in der Durchflusssituation C (zur Orientierung: Seitlicher Holzgriff vertikal). 19
- Abb. 2.7: Schematische Darstellung der Durchflusssituationen am Hang (Feld) und im Experiment in der Versuchshalle (Situation A bis C); entsprechend der Nummerierung und Richtung der Pfeile wurden die Messungen durchgeführt (bei Situation C wurden die Proben zum Experiment noch so gedreht, dass die Pfeile unten beginnen und Durchfluss von unten nach oben stattfand). 20
- Abb. 2.8: Schematische Darstellung und Foto des Versuchsaufbaus eines Multi-Step-Outflow-Versuchs. Die Bodensäule steht auf einem Podest und ist am unteren Rand über das Saugplattenmodul mit dem Wasserauffangbehälter (auf Waage stehend) verbunden; über die Vakuumpumpe wird ein Luftunterdruck erzeugt, der sich im System über den Auffangbehälter bis in den Hohlraum an der Unterseite der Saugplatte ausbreitet; zudem gekennzeichnet die Tensiometer (T-A bis T-D) und ein Druckaufnehmer am unteren Rand (P-UR). 23
- Abb. 2.9: Momentaufnahme zu den Aräometer-Messungen an den Bodenproben A bis D (entsprechend von oben nach unten im Bodenprofil), mit Färbungen des Schlammwassers von dunkelgrau nach hellgelb. 25
- Abb. 2.10: Kornsummenkurven von Bodenproben aus den Modulen A bis D. 25
- Abb. 2.11: Schematische Darstellung der Gesamtsäule (ABCD ca. 60 cm Höhe) wie sie für den Multi-Step-Outflow-Versuch in Phase eins verwendet wurde; nach Durchschnitt der Gesamtsäule dargestellt ihre Hälften (AB und CD, je ca. 30 cm Höhe) sowie ihre Viertelstücke (A, B, C und D, je ca. 15 cm Höhe) nach weiterer Halbierung, die in den Phasen zwei und drei nach jeweiliger Aufsättigung ebenfalls mit der MSO-Methode untersucht wurden. 28
- Abb. 2.12: a) Gesamtsäule mit Tensiometern, unterem Saugplattenmodul und den vier zusammengeschaubten Außenhüllenmodulen; b) eine Bodensäulenhälfte nach Aufschrauben und Durchschnitt zwischen den Außenhüllenmodulen B und C; c) zwei Bodensäulenviertel nach weiterem Durchschnitt zwischen den Modulen A und B sowie zwischen C und D. 28
- Abb. 2.13: Profilinformatoren von einem Hydrus-Projekt beispielhaft für das Modul C; Diskretisierung der Bodensäule mit 156 gleichverteilten Knoten im Profil. 30
- Abb. 2.14: Schematische Darstellung und Foto des Evaporationsexperimentes mit 15 cm hohen Bodensäulenviertelmodulen, stehend auf einer Plattformwaage und bestückt mit Tensiometern in zwei Höhen (V = Gesamtvolumen Probe, A = Grundfläche oben = Evaporationsoberfläche); Je zwei der vier Module wurden in der VEGAS-Versuchshalle aufgestellt und zeitgleich auf jeweils eigener Plattformwaage stehend der freien Evaporation ausgesetzt; die Tensiometer stehen waagrecht aus den Modulen heraus; rechts oben im Foto Tensiometerdatenerfassungs-Box und Computer mit angeschlossenen Waagen zur permanenten Gewichtswerteerfassung. 33
- Abb. 2.15: Links: Schematische Darstellung der HYPROP-Messapparatur, bestehend aus einem Messkopf mit zwei senkrecht ausgerichteten Tensiometern in zwei Höhen, stehend auf einer Waage; auf den Messkopf aufgesetzte zylindrische Bodenprobe mit einem Volumen (V) von ca. 250 cm³; die zur Atmosphäre hin offene obere

(Evaporations-)Bodenoberfläche hat eine Fläche (A) von ca. 50 cm ² ; rechts: Gesamter Versuchsaufbau der HYPROP-Messapparatur und Zubehör.	39
Abb. 2.16: Links: Bodenprobennahme mit einem Kleinzylinder (250 cm ³) in dem oberflächennahen Modulprobenbereich A am Heumöser Hang;rechts: Zylinderproben mit 250 cm ³ Volumen vom Heumöser Hang aus den Tiefen A bis D (von links nach rechts) stehend in einem Wasserbad zur Probenwiederaufsättigung (nach starker Austrocknung der Proben nach Durchführung von HYPROP-Messungen).....	40
Abb. 2.17: Verläufe der Porenwasserdruckverhältnisse in der Gesamtsäule während eines Durchflussexperimentes (Gesamtsäule vertikal, Situation A) und Uranindurchbruchskurve mit Einspeisung zum Zeitpunkt Null (c = Konzentration).	42
Abb. 2.18: Aufsicht auf die Bodensäulenoberfläche wenige Sekunden nachdem erste Uraninaustritte an der Oberfläche zu sehen waren; zur Verdeutlichung eine Nahaufnahme eines Uraninaustritts aus einer an der Probenoberfläche offenen Makropore (mitte unten).	46
Abb. 2.19: Uranin-Durchtrittskurven dargestellt als relative Konzentration bezogen auf die Zeit für alle fünf Versuchsvarianten (Anmerkung: Gesamtsäule vertikal = lange Säule, Teilsäulen mit ca. halber Länge der Gesamtsäule).....	46
Abb. 2.20: Probe ABCD: gemessene (meas) Verläufe der Porenwasserdrücke (A h bis D h gemessen mit den Tensiometern), untere Druckrandbedingungen (LB) und Probenentwässerungsmengen (kum. Ausfluss (out)) sowie die Fitting-Kurven (sim) auf Basis des Free-form Ansatzes; obere Abbildung: Gesamtversuch, mittlere Abbildung: Detailansicht mit Fokus auf a) „Initial“- Phase, b) „Perkolation“- Phase, c) „Drainage“- Phase und d) Beginn der „MSO“- Phase und untere Abbildung mit Fokus auf die Perkulationsphase.....	48
Abb. 2.21: Probe AB: gemessene und simulierte Verläufe der Porenwasserdrücke und des kumulativen Ausflusses sowie die unteren Druckrandbedingungen, die während des XMSO-Versuches herrschten.	49
Abb. 2.22: Probe CD: gemessene und simulierte Verläufe der Porenwasserdrücke und des kumulativen Ausflusses sowie die unteren Druckrandbedingungen, die während des XMSO-Versuches herrschten.	50
Abb. 2.23: Probe A: gemessene und simulierte Verläufe der Porenwasserdrücke und des kumulativen Ausflusses sowie die unteren Druckrandbedingungen, die während des XMSO-Versuches herrschten.	51
Abb. 2.24: Probe B: gemessene und simulierte Verläufe der Porenwasserdrücke und des kumulativen Ausflusses sowie die unteren Druckrandbedingungen, die während des XMSO-Versuches herrschten.	52
Abb. 2.25: Probe C: gemessene und simulierte Verläufe der Porenwasserdrücke und des kumulativen Ausflusses sowie die unteren Druckrandbedingungen, die während des XMSO-Versuches herrschten.	53
Abb. 2.26: Probe D: gemessene und simulierte Verläufe der Porenwasserdrücke und des kumulativen Ausflusses sowie die unteren Druckrandbedingungen, die während des XMSO-Versuches herrschten.	54

- Abb. 2.27: Verteilung der tiefenbezogenen gesättigten Durchlässigkeiten K_s im Bodenprofil einer fiktiv zusammengesetzten Gesamtsäule ABCD, abgeleitet aus der Perkulationsphase während der XMSO Versuche der Einzelmodule A, B, C und D („Falling Head“-Auswertung). Quadrate mit Messwerten entsprechen den ermittelten K_s -Werten in der jeweiligen Modulmitte (Tensiometerpositionen); zusätzlich deutet die gestrichelte Linie eine interpolierte mögliche Verteilung von Durchlässigkeiten im Profil an. 59
- Abb. 2.28: Mit Free-form ermittelte Retentions- und Durchlässigkeitskurven für alle Probenlängen, dargestellt mit 95% - Konfidenzintervallen (fehlen bei A und bei ABCD). 64
- Abb. 2.29: Invers mit Free-form ermittelte Retentionskurven (oben) und Durchlässigkeitskurven (unten) für alle Probenlängen in der Zusammenschau; auf Basis der mit der XMSO-Methode durchgeführten Bodensäulenexperimente; die Symbole an den Linien sind Markierungen zur Unterscheidung der Diagrammkurven, entsprechen aber auch Datenpunkten der Simulation, wobei insgesamt aber mehr Datenpunkte vorhanden waren, aber für eine besseren Übersichtlichkeit nur ausgedünnt gezeigt sind. 65
- Abb. 2.30: Visuelle Zustände, die die Entwicklung der Austrocknung der Modulproben A (vorne) und C (hinten) von Anfang bis Ende des Evaporationsversuches zeigen; Durchmesser eines Moduls ca. 30 cm. 67
- Abb. 2.31: Porenwasserdruckverläufe (Tensiometermessergebnisse) in drei Tiefen bei der Durchführungen eines erweiterten Evaporationsversuches mit Überstau (XEVA-Methode), beispielhaft für die Modulprobe A. 68
- Abb. 2.32: Verlauf von Porenwasserdrücken, Evaporationsrate und kumulativer Evaporation in den ersten 35 Tagen der Versuchsdurchführung; bei den Modulen B,C und D waren in den zwei Tiefen unten und oben je zwei Tensiometer installiert (z.B. T_oben_1_ und T_oben_2_), bei Modul A war je ein Tensiometer in den Tiefen unten, mitte und oben installiert; der tatsächliche Messverlauf der Tensiometermessungen ist für jedes Tensiometer mit feiner, schwarzer durchgehender Linie dargestellt, die zeitlichen Abschnitte mit sinnvollen Porenwasserdruckmessungen, die zur Auswertung herangezogen wurden, sind mit Symbolen und/oder farbig dargestellt; der Zeitpunkt Null entspricht dem Moment, in dem sich kein Wasserüberstau mehr über der Probe befindet (Null = Beginn der Phase b), grau hinterlegt Phase b1-Abschnitte; Anmerkung: Evaporationsraten bei Modul B und D im Bereich Tag 15 bis 17 interpoliert aufgrund von Datenausfall. 70
- Abb. 2.33: Die Verläufe der mittleren Evaporationsraten und der kumulativen Evaporation der vier Module über die Zeit in einem Vergleichs-Diagramm zusammengefasst. 71
- Abb. 2.34: Mit der Evaporationsmethode ermittelte Retentions- und Durchlässigkeitskurven für die Modulproben A bis D; graue Bereiche markieren Abschnitte in der hydraulischen Durchlässigkeitskurve mit sehr hohen und stark schwankenden unrealistischen Durchlässigkeiten; bei den Retentionskurven sind die einzelnen Messpunkte nicht dargestellt, sondern die nahaneinanderliegenden Messwerte als mit einer Linie verbunden dargestellt; bei den Durchlässigkeitskurven sind einzelne Messwerte dargestellt und zusätzlich eine Mittelwertslinie zu diesen Messpunkten. 75

- Abb. 2.35: Verlauf der Porenwasserdrücke, der Evaporationsraten und der kumulativen Evaporation für die HYPROP-Versuchsdurchführung an den Kleinzylinderproben A, B, C und D (in der Abbildung von oben nach unten dargestellt);
T = Tensiometer, kum. = kumulativ..... 78
- Abb. 2.36: Mittels HYPROP-Methode ermittelte Wassergehalts-Porenwasserdruck und Wassergehalts-Durchlässigkeits - Beziehungen für die Proben A bis D sowie hydraulische Funktionen über alle vier Proben zusammenfassend angepasst. 79
- Abb. 2.37: Mittels HYPROP-Methode ermittelte Wassergehalts-Porenwasserdruck und Wassergehalts-Durchlässigkeits - Beziehungen für die Probe A sowie angepasste hydraulische Funktionen, geschätzte Parameter (Tabelle oben) und statistische Analyse (oben rechts)..... 80
- Abb. 2.38: Mittels HYPROP-Methode ermittelte Wassergehalts-Porenwasserdruck und Wassergehalts-Durchlässigkeits - Beziehungen für die Probe B sowie angepasste hydraulische Funktionen, geschätzte Parameter (Tabelle oben) und statistische Analyse (oben rechts)..... 80
- Abb. 2.39: Mittels HYPROP-Methode ermittelte Wassergehalts-Porenwasserdruck und Wassergehalts-Durchlässigkeits - Beziehungen für die Probe C sowie angepasste hydraulische Funktionen, geschätzte Parameter (Tabelle oben) und statistische Analyse (oben rechts)..... 81
- Abb. 2.40: Mittels HYPROP-Methode ermittelte Wassergehalts-Porenwasserdruck und Wassergehalts-Durchlässigkeits - Beziehungen für die Probe D sowie angepasste hydraulische Funktionen, geschätzte Parameter (Tabelle oben) und statistische Analyse (oben rechts)..... 81
- Abb. 2.41: Oben: Retentions- und Durchlässigkeitskurven ermittelt an Modulprobe A mit der Evaporationsmethode (EVA) und der Multi-Step-Outflow-Methode (MSO) sowie für die Kleinzylinderprobe A (HYPROP-Methode); der maximale volumetrische Wassergehalt ergab sich hierbei aus der jeweiligen Methode (Ofentrocknung nach Evaporationsversuchsende); Unten: Zur besseren Vergleichbarkeit der Kurven wurde hier der maximale Wassergehaltspunkt bei den MSO- und HYPROP-Kurven frei verschoben, so dass die Retentionskurven im Bereich enge Grobporen bis Mittelporen (Porenwasserdruck ca. -100 bis -150 cm) übereinander liegen, dabei wurde das Durchlässigkeitskurven-Retentionskurven-Verhältnis der jeweiligen Methode zueinander immer beibehalten. 93
- Abb. 2.42: Oben: Retentions- und Durchlässigkeitskurven ermittelt an Modulprobe B (EVA und MSO) und Kleinzylinderprobe B (HYPROP); Unten: Die gleichen Kurven zu den B-Proben wie oben nur mit dem Unterschied, dass die Kurven für die MSO- und HYPROP-Methode durch Verschiebung des maximalen Wassergehaltspunktes im Bereich -50 cm bis -150 cm bei den Retentionskurven übereinander liegen..... 94
- Abb. 2.43: Oben: Retentions- und Durchlässigkeitskurven ermittelt an Modulprobe C (EVA und MSO) und Kleinzylinderprobe C (HYPROP); Unten: Die gleichen Kurven zu den C-Proben wie oben nur mit dem Unterschied, dass die Kurven für die MSO- und HYPROP-Methode durch Verschiebung des maximalen Wassergehaltspunktes im Bereich -50 cm bis -150 cm bei den Retentionskurven übereinander liegen..... 95
- Abb. 2.44: Oben: Retentions- und Durchlässigkeitskurven ermittelt an Modulprobe D (EVA und MSO) und Kleinzylinderprobe D (HYPROP); Unten: Die gleichen Kurven zu

- den D-Proben wie oben nur mit dem Unterschied, dass die Kurven für die MSO- und HYPROP-Methode durch Verschiebung des maximalen Wassergehaltspunktes im Bereich um -100 cm bei den Retentionskurven übereinander liegen. 96
- Abb. 3.1: Skizziertes dreidimensionales Versuchsschema zum Experiment „Makroporenfluss“; in der Mittelachse eines Zylinders ist eine gerade und vertikale Makropore in einem porösen Medium eingebettet, ausgehend von der Makropore kann Wasser radialsymmetrisch in die umgebende Matrix transferieren; ausschließlich die Makropore wird mit Wasser beschickt, am unteren Ende kann das Wasser frei aus der Makropore austreten (nicht aus der Matrix)..... 114
- Abb. 3.2: Unten links: Schematischer Aufbau des Versuchsstandes mit eingezeichneten Tensiometermesspunkten in den Abständen 2, 6, 14 und 30 cm zur Makropore und in sechs Tiefenniveaus von A bis F (ins Zweidimensionale an die Fensterfläche projiziert); oben links: Schematische Darstellung der tatsächlichen Tensiometerpositionen innerhalb eines Niveaus (Aufsicht); unten Mitte: Foto von der Einbaulage der Saugrohre am Grunde des Versuchs und Einblick über die Scheibe in den ungefüllten halbzyklindrischer Versuchsbehälter (Anmerkung: Horizontale Strebe in der Mitte zur Scheibenstabilisierung); oben Mitte: Aufsicht auf die Saugrohre; unten rechts: Sandgefüllter halbzyklindrischer Versuchsbehälter mit eingebauten Tensimetern (Tensiometer-Druckaufnehmer aus dem Mantel herausstehend, rechts); oben rechts: Foto: Aufsicht auf die tatsächliche Lage der Tensiometerschäfte innerhalb eines Niveaus während der Befüllprozedur entsprechend dem Schema in der Abbildung oben links. 121
- Abb. 3.3: Links: Detailaufnahme der künstlichen Makropore mit einem Durchmesser von einem Zentimeter bestehend aus zwei Schichten Drahtgewebe; rechts: Übergangsstelle der Makropore an der Grundfläche des halbzyklindrischen Versuchsbehälters direkt hinter der Scheibe vor der Befüllung des Versuchsbehälters..... 122
- Abb. 3.4: In dieser Bildreihe wird die Füllprozedur dargestellt, die mehrere Stunden dauerte; die Makropore war mit Klebeband an der Scheibeninnenseite fixiert, kurz vor einem Befüllungsschritt wurde das Klebeband auf einer Höhe von 5 bis 10 cm gelöst und die Sandfüllung wurde unter Wasser in der gleichen Höhe eingebracht, dieses sukzessive bis zum Erreichen einer 110-120 cm hohen Füllung. 122
- Abb. 3.5: Geräte, mit denen die Füllungsschichten verdichtet und bearbeitet wurden, links Nagelbrettstamper und rechts schwerer Stamper. 122
- Abb. 3.6: Kornsummenkurve für den GEBA-Feinsand basierend auf drei 250 cm³ Proben aus drei verschiedenen Tiefen (oben, Mitte, unten) aus dem Halbzyklindrischen Versuchsbehälter. 124
- Abb. 3.7: Retentionskurven und Durchlässigkeits-Wassergehaltsbeziehung für den verwendeten GEBA-Feinsand..... 124
- Abb. 3.8: Links: Lagerungsdichten im Profil, ermittelt an Kleinzyklindrischen Proben, die bei der Versuchsbehälterentleerung in sechs Tiefen gewonnen wurden; Mitte und rechts: Die sich für alle sechs Versuche durch Entwässerung über die Saugrohre ergebenden Porenwasserdruck- bzw. Wassergehaltsprofile (Anfangsbedingungen). 126

- Abb. 3.9: Entnahme der Sandfüllung nach dem letzten Versuch, bei dem zuerst blaugefärbtes Wasser und anschließend Klarwasser in die Makropore injiziert wurde, um die radialsymmetrische Wasserausbreitung in der Sandmatrix zu visualisieren. 128
- Abb. 3.10: Verläufe der Porenwasserdrücke gemessen an den 24 Tensiometern über die Zeit für alle Versuche (Q63 bis Q455) sowie die kumulativ injizierte Wassermenge und der kumulative Ausfluss; schwarze senkrechte Linien kennzeichnen den Beginn des Makroporenausflusses, teilweise graue Bereiche am Ende kennzeichnen Zeitabschnitte nach Injektionsende. 133
- Abb. 3.11: Fotos zu ausgewählten Stichzeiten, die die sichtbare Wasserfrontausbreitung an der Scheibe des Versuchsbehälters innerhalb der ersten 100 Minuten für alle Versuche zeigen. 134
- Abb. 3.12: Verhältnis von Beginn des Makroporenausflusses zur Injektionsrate des jeweiligen Versuches. 137
- Abb. 3.13: Veränderung der Ausflussraten über die ersten 500 Minuten der Versuchsdurchläufe; der jeweilige Ausfluss ist aufgeteilt in eine Phase mit schnellem Anstieg der Rate (Bereich A, links der Linie mit Pfeilenden) und in eine Phase mit schwachem Anstieg der Rate oder mit mehr oder weniger konstanter Ausflussrate (Bereich B, rechts der Linie mit Pfeilenden); Anmerkung: Bei Versuch Q63 begann der Ausfluss erst nach 508 Minuten. 137
- Abb. 3.14: Erstreaktionszeiten der Porenwasserdruckänderung, markiert als Zeitpunkte, an denen ein gemessener Tensiometerwert sich erstmalig und deutlich von seinem Anfangswert her gesehen erhöht; dabei sind Punkte eines Niveaus mit einer Linie „zusammenhängend“ dargestellt (beachte: abweichende Zeitachse für Versuch Q63). 141
- Abb. 3.15: Beispielhaft graphisch ermittelte Werte für die horizontale und vertikale Ausdehnung des Wasserausbreitungsbereiches für ausgewählte Zeitschritte für Versuch Q63. 143
- Abb. 3.16: Verlauf des Verhältnisses (d_{lat}/h_{in}) von lateraler (horizontaler) zu vertikaler Wasserausbreitung für die Versuchszeit bis zum Makroporenausflussbeginn für die Experimente Q63 bis Q455 (Anmerkung: Q145 und Verlauf bei Q63 > 60 Minuten nicht gezeigt). 143
- Abb. 3.17: Detaillierte Darstellung der Porenwasserdruckverläufe über die Zeit für die ausgewählten Versuche Q63 und Q285 in den Abständen 2, 4, 6 und 14 cm zur Makropore nach den sechs Tensiometerniveaus unterteilt; schwarze senkrechte Linien in den Diagrammen zu Niveau F markieren den Beginn des Makroporenausflusses. 146
- Abb. 3.18: Kumulativ dargestellt als durchgängige Linien Makroporenzufuhr (kum. MP_{in}), Makroporenausfluss (kum. MP_{out}) und der aus der Differenz dieser beiden abgeleitete Makropore zu Matrixzuzufuhr (kum. MX_{in}) sowie die dazugehörigen Flussraten (Linien und Symbole) für die Versuche a) Q63 (oben) und b) Q285 (unten). 147
- Abb. 3.19: Wasserausbreitungsflächen der Versuche Q63 und Q285 zu den Zeiten 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 und 200 Minuten adaptiert von den Fotoreihen; horizontale Pfeile

- zeigen die maximale Ausdehnungslänge von 49 cm nahe der Oberfläche nach 100 Minuten (t_{100}) an, die bei beiden Versuchen gleich war. 149
- Abb. 3.20: Verlauf der mittleren Makropore-zu-Matrix-Wassertransfergeschwindigkeiten über die Versuchsdauer von 500 Minuten für alle Experimente. 151
- Abb. 3.21: Zuordnung eines Matrix-Volumenanteils zu jedem Tensiometermesspunkt (hier je Tensiometer jeweiliger 2D Flächenanteil innerhalb der dick gestrichelten Umrandungen, wobei in der Berechnung für den mittleren Porenwasserdruckstatus je Tensiometer das Volumen einging, welches sich hinter jeder 2D Fläche als 3D-Halbkreis erstreckt); oben Gewichtung dieser Volumenanteile in Prozent innerhalb eines Abstandes zur Makropore in Bezug zur Gesamtmatrix für beide Ansätze. . 153
- Abb. 3.22: Makropore-zu-Matrix-Wassertransfergeschwindigkeiten in Relation zum Matrix-Porenwasserdruck, basierend auf dem sich erhöhenden Porenwasserdruck während des Versuchsverlaufs vom initial sehr trockenen Zustand zum durch den Makroporenfluss in die Matrix übergehende Wasser feuchter werdende Gesamtsystem; oben: Porenwasserdruck-Status der gesamten Matrix als gewichteter Mittelwert aus den Volumenanteilen je Tensiometermesspunkt (erster Ansatz); unten: Porenwasserdruck-Status der gesamten Matrix basierend auf einer höheren Gewichtung der makroporennaheren Tensiometermessungen (zweiter Ansatz), jeweils überliegend gezeigte dicke Linie als per Hand eingetragene Mittelwert-Trendlinie. 157
- Abb. 4.1: Der ca. 200 cm lange, 100 cm hohe und 80 cm breite Container für die Böschungsbruch-Experimente mit eingebauter Sandböschung; vorne: Fensterscheibe mit vorgelagerten Scheibenstabilisierungstreifen; oben: Auflastsystem mit Hydraulikzylindern und Auflastplatte. 173
- Abb. 4.2: Rückansicht des Containers mit Konstant-Wasserdruck Behältern (KDB) und Drucktransmittern für die Messung des Porenwasserdrucks (P1 bis P6). 174
- Abb. 4.3: Im Bereich der Hydraulikzylinder fixierte Ultraschall-Abstandsmesser (US) zur Messung der Lastverschiebung (US rechts und US links) und zur Kontrolle und Regulierung der senkrechten Hydraulikzylinderstellung (US oben und US unten). 174
- Abb. 4.4: Anfangsbedingungen für die Experimente A) Fall A, statischer Grundwasserspiegel, B) Fall B, stationärer Wasserfluss, C) Fall C, initial statischer Grundwasserspiegel; US = Messpunkt für Ultraschall-Sensor, l = links und r = rechts; Kreise mit Nummerierung von 1 bis 6 zeigen die Positionen der Porenwasserdruck Messpunkte an; Inj. = Position für die Wasserinjektion in das Drainagerohr über den hohen Konstant-Wasserdruck-Behälter bei Fall C; **q** = Auflast über Druckplatte. 178
- Abb. 4.5: Auflast, Porenwasserdrücke und Verdichtung zu den Böschungsbruchexperimenten a) A5, b) B2, und c) C3; US links und US rechts zeigen die Verschiebung der Referenzpunkte der vertikalen Abstandsmessungen, die mit den Ultraschallsensoren (US) durchgeführt wurden; h_{wl} und h_{wr} stehen für die linke und rechte Konstant-Wasserdruck-Randbedingung; P1 bis P6 kennzeichnen die Porenwasserdruckmessungen an den Piezometer-Löchern eins bis sechs und PInj kennzeichnet den Eindringdruck des Injektionswassers bei Fall C; cm WS = Zentimeter Wassersäule. 180

Abb. 4.6: Böschungskörper mit sichtbarem Scherband nach dem Versagen; der hier gezeigte Versuch stellt eine spezifische Demonstration eines Böschungsexperimentes dar und wurde nicht in die quantitative Auswertung mit einbezogen, da die gefärbten Sandschichten das Materialverhalten des Gesamtkörpers leicht veränderten.....	181
Abb. 4.7: Last-Verschiebungs-Diagramm für Fall A (Mittelwerte der Experimente A1-A5) und Fall B (Mittelwerte der Experimente B1-B3), endend mit der Last beim Böschungsversagen (q_f).	184
Abb. A.1: Zylindrische und quadratische Bodensäule aufgestellt auf einem Podest in der Technikum-Halle von VEGAS; die Podestplatte hat an vier Stellen Löcher ($D = 15$ cm), die es ermöglichten, die Säulen exakt so zu positionieren, dass ein Zugang zur jeweiligen Säulengrundfläche möglich war (siehe Locher jeweils hinten links der Säulen).	ix
Abb. A.2: Die ca. 60 cm hohe quadratische Bodensäule in Vorbereitung eines gesättigten Durchflussexperiments; in vier Tiefen sind Tensiometer installiert, deren Druckaufnehmer sich außerhalb der Säule befinden; die Tensiometerschäfte stecken innen bis ca. 8 cm in den Boden hinein.	xi
Abb. A.3: Schematische Darstellung und Foto des Versuchsaufbaus zum Multi-Step-Outflow-Versuch. Die Bodensäule steht auf einem Podest und ist am unteren Rand über das Saugplattenmodul mit dem Wasserauffangbehälter (auf Waage stehend) verbunden; über die Vakuumpumpe wird ein Luftunterdruck erzeugt, der sich im System über den Auffangbehälter bis in den Hohlraum an der Unterseite der Saugplatte ausbreitet; zudem gekennzeichnet sind die Tensiometer (T-A bis T-D) und ein Druckaufnehmer am unteren Rand (P-UR); rechts: aufgestellte Säule mit vier Tensiometern in vier Tiefen, entsprechend den vier aufeinander stehenden äußeren Mantelmodulen und unten in grau das angeschraubte Saugplattenmodul.	xiv
Abb. A.4: Links: Saugplattenmodul für die Befestigung am unteren Rand; rechts: sichtbare untere Grundfläche der Bodensäule (Bodensäule steht auf dem Kopf) mit Einschleimmschicht kurz vor dem Aufpressen des Saugplattenmoduls und der Befestigung am unteren Flansch.	xv
Abb. A.5: Detaildarstellung eines selbst konstruierten und verwendeten Tensiometers mit Konstruktionsdetails; Länge des Plexiglas-Zwischenstückes ca. 3 cm, es dient als Verbindung zwischen Druckaufnehmer und Schaft und ermöglicht aufgrund seiner Transparenz eine Luftblasenkontrolle; Edelstahlrohr mit 7 mm Außendurchmesser; $L =$ Länge und $D =$ Durchmesser.	xvi
Abb. A.6: Schematische Darstellung des Evaporationsexperimentes mit einem 15 cm hohen Bodensäulenviertelmodul, stehend auf einer Plattformwaage und bestückt mit Tensiometern in zwei Höhen ($V =$ Gesamtvolumen Probe, $A =$ Grundfläche oben = Evaporationsoberfläche).	xvii
Abb. A.7: In der VEGAS-Versuchshalle aufgestellte Bodensäulenviertelmodule während eines Evaporationsexperiments; die zwei 15 cm hohen Module wurden zeitgleich auf jeweils eigener Plattformwaage stehend der freien Evaporation ausgesetzt; die Tensiometer stehen waagrecht aus den Modulen heraus; rechts oben im Foto Tensiometerdatenerfassungs-Box und Computer mit angeschlossenen Waagen zur permanenten Gewichtswerteerfassung.	xviii

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Abmessungen und weitere Kennwerte der verwendeten Proben sowie die ermittelten Festsubstanzdichten des Bodens aus den Modulen A,B,C und D, mit denen die Kennwerte für die Module AB, CD und ABCD errechnet wurden (Bodenart nach Bodenkundliche Kartieranleitung 5. Auflage, KA5 (Ad-Hoc-AG Boden, 2005), dort Abbildung 17).	24
Tabelle 2.2: Initiale Parameter der bodenhydraulischen Eigenschaften entsprechend einem „Silty Clay Loam“ aus dem Hydrus 1-D Bodenkatalog für den Boden und angesetzte Werte für die Saugplatte, bezogen auf die Parameter, die für die van Genuchten/Mualem-Funktionen benötigt werden.....	31
Tabelle 2.3: Gemessene gesättigte hydraulische Durchlässigkeiten zu den fünf Versuchsvarianten; für die vertikalen Versuche ist das Ergebnis direkt aus dem Versuch abgeleitet, welcher auch jeweils die tatsächliche Probenlänge hatte (Gesamtsäule und Hälften); zusätzlich sind die Ergebnisse gezeigt, die sich aus dem Versuch mit Grundlage der Gesamtsäule ergaben unter Betrachtung der inneren Druckgradienten der Teilabschnitte von Tensiometer D nach C (unten), von Tensiometer C nach B (Mitte) und von Tensiometer B nach A (oben); Nr. = Nummer.	43
Tabelle 2.4: Porositäten für alle Probenlängen und aus diesen abgeleitete maximale Wassergehalte in cm (Eindimensional betrachtet) sowie die Entwässerungsmengen während der X-Phase und der MSO-Phase; Prozentangaben als Anteil in Bezug auf den maximalen Wassergehalt angegeben.....	55
Tabelle 2.5: Aufgeführt sind die K_s -Werte zu allen Modullängen, die mit zwei verschiedenen Methoden ermittelt wurden, sowie aus den Einzelmodulergebnissen (vier Viertelmodule A, B, C und D) fiktiv zusammengesetzten Durchlässigkeiten für ABCD (Werte in Klammern).	60
Tabelle 2.6: Wassergehaltsverluste aus den Modulproben in den aufeinanderfolgenden Phasen b, c und d während der Evaporationsexperimente und Abschätzung des Makroporenvolumenanteils am Gesamtporenvolumen durch Unterteilung der Phase b in b1 (Evaporation aus Bodenmakroporen heraus) und b2 (Evaporation aus Bodenmatrix heraus); Prozentangaben als Anteil vom maximalen Wassergehalt..	71
Tabelle 3.1: Parameter für die ermittelten Retentions-Wassergehaltsbeziehungen für den verwendeten Feinsand basierend auf dem "unimodal unconstrained“-Modell nach van Genuchten (1980); α , n und m = van Genuchten-Parameter, θ_r = Restwassergehalt, θ_s = Wassergehalt bei Sättigung.....	125
Tabelle 3.2: Liste der Versuchsvarianten mit Makroporen-Injektionsraten von 63 bis 455 cm ³ min ⁻¹	127
Tabelle 3.3: Verzeichnis der in dem Kapitel „Makroporenfluss-Experimente“ verwendeten Abkürzungen und Symbole.....	130
Tabelle 3.4: Detaillierte Datensätze der Experimente Q63 und Q285 für ausgewählte Stichzeiten von 0 bis 500 Minuten (zusätzlich zum Ausflussbeginn bei 508 Minuten für Experiment Q63) für die laterale Wasserausbreitung und die vertikale Wassereindringtiefe sowie die Abschätzung der Makropore zu Matrix Wasser-Transfergeschwindigkeit (MP-MX q_{transfer}), die auf Grundlage der Makroporen Zu-	

Ausflussdifferenz ($MP_{in} - MP_{aus} = MX_{in}$) und der abgeschätzten befeuchteten Makropore zu Matrix Grenzfläche (MP-MX A_{inter}) erstellt wurde.	148
Tabelle 4.1: Packungsparameter, Anfangsbedingungen (Wasserstände links h_{wl} und rechts h_{wr}) und Last (q), für Fall C die eingestellte Auflast (q_{max}) sowie die Versagensbelastungen (q_f) für die Fälle A und B und die gemessene vertikale Verschiebung; (cm WS = cm Wassersäule; n.a. = nicht anwendbar).	177

Abstract

Landslides represent a great danger in populated regions because often inhabited areas are directly affected. Also, the impact of this kind of natural hazard on infrastructure such as roads, rail and public utilities should not be underestimated and may cause damages to the society in mountain areas. On the one hand, activities in the context of landslides and mass movements focus on direct stabilization and prevention of landslides, for example deep drainage and elaborate engineering measures. On the other hand, and this is subject of this work, basic oriented research on process knowledge and hydrological triggers for landslides are of interest.

The Heumöser slope (Vorarlberg, Austria), a very slowly moving large slope (creeping slope), is a suitable study object at which a variety of hydrological processes take place and have been studied for several years. These studies led to the hypothesis that macropore flow through loamy soil evolving at Heumöser slope leads to rapid hydraulic changes in the interior of the slope. The hydraulic changes are particularly evident in strong pore water pressure increases (in a confined aquifer) leading to buoyancy forces deep in the slope which destabilize the slope, so that it moves down successively (movements of up to 10 cm a year).

The first goal of this study was to test whether the slope movement hypothesis which states that fast macropore flow leads to an increase of pore water pressure head in the depth of the slope and thus to slope destabilisation is valid or not. A second goal was to compare soil hydraulic properties obtained from multi-step-outflow and evaporation experiments.

First goal:

In the present study, three independent experiments were carried out to detect the slope movement hypothesis:

- Determination of effective soil hydraulic properties of large and small undisturbed, loamy and macroporous soil samples from Heumöser slope: "soil column experiments".

- Determination of macropore-matrix exchange processes in an idealized laboratory system: "macropore flow experiments".
- Investigation of the influence of different saturation conditions and dynamically increasing porewater pressure on the slope stability in an idealized laboratory system: "slope stability experiments".

Soil column experiments were conducted on undisturbed soil columns taken from the Heumöser slope to determine soil hydraulic properties: (1) Saturated flow experiments were performed to determine saturated hydraulic conductivity, and (2) the multi-step-outflow and evaporation-methods were applied to get water retention and hydraulic conductivity properties of the slope material. From these investigations the character of rainwater infiltration into the slope could be derived. This was done with a special focus on macropore infiltration and macropore flow.

The investigations of the soil columns showed that hydraulic conductivities change greatly depending on the saturation state. Thus, a saturated hydraulic conductivity with full macropore draining results in conductivities of 10^{-4} m s^{-1} to 10^{-5} m s^{-1} . And the conductivity falls dramatically with discharged macropores to 10^{-7} m s^{-1} and then with further desaturation of the matrix to the magnitude of 10^{-8} m s^{-1} . This means that high saturated hydraulic conductivities occur only when active macropore flow takes place. Therefore, only with macropore flow a pore water pressure increase at greater depths as described in the slope movement hypothesis can develop.

For the macropore flow experiments, a laboratory test set-up was developed to study macropore flow and in particular the transfer of water from macropores to surrounding matrix. The aim of this was, to estimate to which extent macropore flow can be reduced by matrix suction forces. The laboratory tests for macropore flow showed that under dry conditions of a sand matrix, macropore flow is absorbed laterally into the matrix. Thus macropore flow can be prevented and reduced. With high macropore infiltration rates and under wet matrix conditions, the macropore flow is fast and the matrix is mostly bypassed. The bypassed situation is assumed to be the most common at the natural slope.

For the slope stability experiments, another laboratory test setup was developed to investigate the water saturation-dependent stability of a slope at the meter scale. A scenario with rapid

increase of pore water pressure (similar to observed natural slope situations) was performed until a slope failure was provoked. With the laboratory tests for slope stability, it could be shown that under transient rapid pore water pressure increase a slope failure can be generated and hence with the simplified laboratory system, the part of the slope movement hypothesis which describes the slide initiation could be confirmed. Moreover, the analysis of experimental data showed significant pore water pressure reductions minutes before actually visible slope failure. This seems to be an effect of fine pore space changes and interrelated pore water redistributions, in times where the slope is still stable. Thus, these pore water pressure changes can be described in the present case as a precursor phenomenon for the slope failure event.

With the presented approach and the separation of investigations and experiments, hydrological aspects could be isolated and linked to confirm the slope movement theory.

In particular, the measurements at the original soil samples from Heumöser slope confirmed that the macropore flow can be so dominant that potentially fast porewater pressure head increase can be generated at depth. Nevertheless, macropore flow can generally be reduced, especially in dry matrix conditions. The reduction of macropore flow was shown by experiments with sand. The process of water transfer from macropore to surrounding matrix was clearly seen in sand. Nevertheless, it is assumed that what happens to water transfers from macropore to surrounding matrix in sand also occurs in clay, but in an attenuated form.

Second goal:

Moreover, with the soil column and soil sample experiments many methodological approaches were tested and compared. They gave varied conclusions about the quality of the estimated soil hydraulic properties. It was found that the two evaporation methods used are faster and more uncomplicated than the multi-step-outflow method. In particular, the evaporation-method with the HYPROP system proved to be very fast and comfortable, because here the data processing and evaluation is user-friendly integrated. The determined retention curves of all the methods are very similar. But a disadvantage of the evaporation-methods is, that they could not determine hydraulic conductivity and vague retention information at and near saturation. Moreover, it is also assumed that due to the high macroporosity of the slope soil, with the small cylinder samples as they were used with the HYPROP method, in the

pressure head range where coarse pores and macropores are relevant, can not be mapped representative. That means conversely, that in the specific situation of the Heumöser slope with macroporous and heterogenic behaviors the effective hydraulic properties can be described sufficiently only with larger samples as used in the large sample evaporation measurements and the multi-step-outflow measurements.

Kurzfassung

Hangrutschungen stellen in besiedelten Regionen eine große Gefahr dar, weil nicht selten direkt bewohnte Bereiche betroffen sind. Aber auch die Rutschungsauswirkungen auf die Infrastruktur wie Verkehrswege und Versorgungseinrichtungen können der Gesellschaft Schaden zufügen. Zum einen ergibt sich im Zusammenhang mit Hangrutschungen und allgemein Massenbewegungen das Betätigungsfeld der direkten Stabilisierung und Verhinderung von Rutschungen durch beispielsweise Tiefdrainagen und aufwendige ingenieurbauliche Maßnahmen. Zum anderen, und das ist Gegenstand dieser Arbeit, ergibt sich das Tätigkeitsfeld der grundlagenorientierten Forschung, um die Prozesse, die zu Hangrutschungen führen, besser verstehen zu können.

Mit dem Heumöser Hang in Österreich (Vorarlberg), einem sich sehr langsam bewegenden Großhang (Kriechhang), liegt ein Untersuchungsobjekt vor, an dem vielfältige hydrologische Prozesse stattfinden, die schon über mehrere Jahre hinweg untersucht wurden.

Die Untersuchungen resultierten in der Hypothese, dass sich am Heumöser Hang entwickelnder Makroporenfluss zu schnellen hydraulischen Veränderungen im Innern des Hangkörpers führe. Die hydraulischen Veränderungen zeigen sich insbesondere in starken Porenwasserdruckanstiegen (unter anderem in einem gespannten Grundwasserleiter), die teilweise in der Tiefe des Hanges zu Auftriebskräften führen, die den Hang destabilisieren, so dass dieser sich schubweise insgesamt etwa ein bis zwei Dezimeter im Jahr talwärts bewegt.

Zum Erarbeiten des Prozessverständnisses bezüglich des Zusammenhanges zwischen Infiltration und Hangstabilität wurden große Bodenproben im Labor untersucht und Experimente an zwei technischen Modellen durchgeführt.

Das erste Ziel der Arbeit war es, zu prüfen, ob die Hangbewegungshypothese, die besagt, dass schneller Makroporenfluss zu einer Erhöhung des Porenwasserdruck in die Tiefe des Hanges führt und damit den Hang destabilisieren kann, gültig sein kann oder nicht.

Ein zweites Ziel war es, die bodenhydraulischen Eigenschaften an den gewonnenen natürlichen Bodenproben zu ermitteln. Dabei wurde zusätzlich ein Methodenvergleich vollzogen,

indem an denselben Proben sowohl die Multi-Step-Outflow-Methode, als auch die Evaporationsmethode angewandt wurde.

Erstes Ziel: Überprüfung der Hangbewegungshypothese

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zum Nachweis der Hangbewegungshypothese drei voneinander unabhängige Untersuchungen durchgeführt:

- Die Untersuchung und Ermittlung von effektiven bodenhydraulischen Eigenschaften an großen und kleinen ungestörten, lehmigen und makroporösen Bodenproben vom Heumöser Hang: „Bodensäulen-Experimente“.
- Die Untersuchung und Ermittlung von Makropore-Matrix-Austauschprozessen in einem idealisierten Labor-System: „Makroporenfluss-Experimente“.
- Die Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Sättigungsverhältnissen und von dynamisch steigendem Porenwasserdruck auf die Böschungstabilität in einem idealisierten Labor-System: „Böschungsbruch-Experimente“.

Bei den Bodensäulen-Experimenten wurden an ungestörten lehmigen Bodensäulen-Proben (Durchmesser ≈ 30 cm und bis zu 60 cm hoch) und Kleinzylinderproben (Durchmesser = 8 cm und 5 cm hoch) vom Heumöser Hang bodenhydraulische Eigenschaften ermittelt, aus denen abgeleitet werden kann, wie das Eindringen von Niederschlagswasser in den Hang vonstattengeht. Dieses geschah unter besonderer Berücksichtigung von Makroporeninfiltration und Makroporenfluss. Zur Ermittlung der bodenhydraulischen Eigenschaften wurden an den gewonnenen Bodensäulen gesättigte Durchflussexperimente durchgeführt, sowie die Multi-Step-Outflow- und Evaporationsmethode angewandt, um Retentions- und Durchlässigkeitseigenschaften des Hanglehms zu bestimmen.

Die Untersuchungen an den Bodensäulen ergaben, dass sich je nach Sättigungszustand die hydraulischen Durchlässigkeiten stark verändern können. So zeigt sich eine gesättigte Durchlässigkeit (mit wassergefüllten Makroporen) von 10^{-4} m s^{-1} bis 10^{-5} m s^{-1} . Mit Entleerung der Makroporen fällt sie drastisch auf 10^{-7} m s^{-1} ab, um dann mit fortschreitender Entsättigung der Bodenmatrix in den Bereich von 10^{-8} m s^{-1} zu fallen. Außerdem konnte ein hohes laterales Fließpotenzial aufgrund von im Boden vorhandenen Makroporen und Rissen ermittelt werden. Das heißt, dass nur bei hohen Bodenwassersättigungen und durchflussaktiven Makropo-

ren sich hohe Durchlässigkeiten ergeben und sich nur mit Makroporenfluss der in der Hangbewegungshypothese behauptete Porenwasserdruckanstieg in der Tiefe des Hanges entwickeln könnte.

Bei den Makroporenfluss-Experimenten wurde ein Laborversuchsaufbau entwickelt, um Makroporenfluss und insbesondere den lateralen Übergang des Wassers von Makropore zu umgebender Matrix untersuchen zu können. Festgestellt werden sollte, inwieweit Makroporenfluss durch Matrix-Saugkräfte vermindert werden kann.

Der Versuchsaufbau bestand aus einem halbzylindrischen ca. 110 cm hohen Versuchsbehälter in dem eine einzelne vertikale Makropore in einer Sandmatrix eingebettet war. Variiert wurden bei den Versuchen die Infiltrationsraten, mit denen das Wasser von oben direkt und ausschließlich in die Makropore geleitet wurde.

Beim Laborversuch zum Makroporenfluss ergab sich die Erkenntnis, dass unter trockenen Matrixbedingungen der Makroporenfluss lateral in die Matrix „aufgesogen“ werden kann, so dass Makroporenfluss verhindert und vermindert werden kann. Bei feuchten Matrixbedingungen entsteht allerdings ein schneller Makroporenfluss, der die Matrix entsprechend einer Bypass-Situation umfließt. Die Bypass-Situation wird angenommen als die, die am natürlichen Hang am häufigsten vorliegt.

Bei den Böschungsbruch-Experimenten wurde ein Modellversuch in der Meterskala entwickelt und aufgebaut. Hierbei wurde aus dem gleichen Sandmaterial wie bei den Makroporenfluss-Experimenten zu jedem Versuchsdurchlauf eine ca. 100 cm hohe, ca. 80 cm breite und ca. 200 cm lange Böschung in einem Stahlcontainer aufgebaut. Die Böschungstabilität wurde unter verschiedenen Wassersättigungs- und Wasserflussbedingungen untersucht. Es wurde zusätzlich zu den inneren hydrologischen Bedingungen mit externen variablen Böschungslasten gearbeitet, um Hanggewicht (Korngerüst, Bodenfeuchte, Schnee,...) zu simulieren und um damit Böschungsbrüche (Hangversagen) erzeugen zu können.

Beim Laborversuch zur Böschungstabilität ergab sich die Erkenntnis, dass unter transientem schnellem Porenwasserdruckanstieg sich eine Scherfläche bilden kann und ein Hangversagen schlagartig einsetzen kann. Dies bestätigte in einem vereinfachten Laborsystem den Hangbewegungsteil der Heumöser Hang-Bewegungshypothese. Darüber hinaus ergab sich bei der Analyse der Experimentdaten, dass sich Minuten vor dem sichtbaren Hangversagen deutliche

Porenwasserdruckabsenkungen zeigten. Dies lässt sich auf vorgelagerte feine Kapillarraumveränderungen und Wasserumverteilungen im noch stabilen Korngerüst zurückführen. Somit kann diese Porenwasserdruckänderung im vorliegenden Fall als ein Precursor-Phänomen beschrieben werden.

Mit der vorgestellten Vorgehensweise und der Separierung der Untersuchungen und Experimente konnten für den Haumöser Hang relevante hydrologische und mechanische Teilaspekte erarbeitet werden, die verknüpft die Hangbewegungshypothese in weiten Teilen bestätigen können. Insbesondere bestätigten die Messungen an den originären Bodenproben vom Heumöser Hang, dass der Makroporenfluss so dominant sein kann, dass potentiell schneller Porenwasserdruckanstieg in der Tiefe erzeugt werden kann.

Dennoch kann ein Makroporenfluss generell insbesondere bei trockenen Matrixbedingungen vermindert werden. Die Verminderung des Makroporenflusses wurde anhand von Experimenten mit Sand gezeigt. Der Prozess des Wassertransfers von Makropore zu umgebender Matrix ist im Sand sehr deutlich zu sehen. Es ist davon auszugehen, dass das, was an Wassertransfer von Makropore zu umgebender Matrix im Sand geschieht, auch im Lehm geschieht, allerdings nur in abgeschwächter Form.

Zweites Ziel: Vergleich der bodenhydraulischen Eigenschaften ermittelt mit der Multi-Step-Outflow-Methode und Evaporationsmethoden

Darüber hinaus konnten bei Bodensäulen- und Bodenprobenexperimenten viele methodische Herangehensweisen getestet und verglichen werden. Weil im Vorfeld der Untersuchungen schon abgeschätzt wurde, dass nur mit größeren Proben eine für den Standort bessere Repräsentativität der Ergebnisse erhalten werden kann, wurde besonders viel Wert auf die Methodik der Großprobennahme gelegt. So ist in der vorgestellten Arbeit ein neuartiger Ansatz zur Großprobennahme entwickelt worden, bei dem die Proben ungestört frei gelegt wurden und mit Haushaltsfolie, Montageschaum und Außenmodulen eingehüllt wurden. Nur die Großprobennahme garantierte ein Mindestmaß an Erfassung von Heterogenitäten und Bodenstrukturen im Dezimeterbereich, wie z.B. Makroporen und Risse. Auch die laboratorischen Ver-

suchsaufbauten zur Anwendung der Multi-Step-Outflow- und Evaporationsmethode an den Großproben wurden einmalig größenangepasst entwickelt.

Die verschiedenen Methoden gaben vielfältig Aufschlüsse über die Güte der ermittelten hydraulischen Eigenschaften. Hierbei zeigte sich, dass die zwei verwendeten Evaporationsmethoden schneller und unaufwändiger sind als die Multi-Step-Outflow-Methode. Insbesondere die Evaporationsmethode unter Verwendung der standardisierten HYPROP-Anlage erwies sich als sehr schnell und komfortabel, weil hier die Datenverarbeitung und -auswertung benutzerfreundlich integriert ist. Die ermittelten Retentionskurven aller Methoden sind sehr ähnlich. Dem gegenüber steht aber der Nachteil der Evaporationsmethoden, dass sich bei Sättigung und nahe Sättigung keine Durchlässigkeitsinformationen ermitteln ließen. Darüber hinaus wird zusätzlich angenommen, dass sich aufgrund der hohen Makroporosität des Hangbodens mit den Kleinzylinderproben, wie sie bei der HYPROP-Methode verwendet wurden, der Retentionsbereich, bei dem Makro- und Grobporen relevant sind, nicht repräsentativ abbilden lässt. Das heißt im Umkehrschluss, dass sich nur mit den hier auch verwendeten größeren Proben die hydraulischen Eigenschaften unter den speziellen Bedingungen des Heumöser Hanges ausreichend beschreiben ließen.

1 Einleitung

Ausgangspunkt für die hier vorliegende wissenschaftliche Arbeit ist ein real existierender natürlicher Hang in Vorarlberg Österreich, Ortschaft Ebnit (Gemeinde Dornbirn). Ein dort befindlicher Hangbereich in der Lokation Heumöser auf einer Höhe von etwa 1360 m bis 940 m über Normalnull ist seit Jahrzehnten als langsam kriechender Hang bekannt. Der etwa 1800 m lange und 500 m breite Hang mit Neigungen von ca. 20° bis 75° bewegt sich oberflächlich mit Geschwindigkeiten im Bereich von Zentimetern und Dezimetern pro Jahr (Schneider, 1999; Depenthal und Schmitt, 2003; Lindenmaier et al., 2005; Wienhöfer et al., 2009 und 2011).

Von der geographischen Lage her gesehen liegt der Hangbereich in einer der ersten nördlichen Alpenketten und somit in einer Wetterzone mit hohen Niederschlagsraten sowohl ganzjährig gesehen (ca. 2100 mm a⁻¹) als auch ereignisbezogen (bis zu 100 mm in 48 Stunden) betrachtet. Durchschnittlich fallen ca. 1300 mm des Jahresniederschlags in den Sommermonaten April bis September.

Abschnitte im oberen und seitlichen Hangbereich sind steil (30° im Mittel und maximal 75°) und bewaldet. Das dort befindliche Bodenmaterial lässt sich überwiegend als Lehmtoneinstufen und ist auffällig stark mit Makroporen durchsetzt. Bei Freilegung der Humusaufgabe und bei Profilanschnitten konnten Schrumpfungsriss- und Spaltennetzwerke, sowie Wurzel- und Wurmgänge erkannt werden. Die Bodenschicht ist im Mittel weniger als 1 m mächtig und liegt auf einem Mergel-Festgesteinsuntergrund.

Eine Bohrung in der Mitte des Hanges bis ca. 28 m Tiefe zeigte den Mergel-Festgesteinsuntergrund ab einer Tiefe von ca. 22,5 m. In der gesamten Bohrung zeigten sich stark wasserundurchlässige, schluffige, tonige Materialschichten. Bei der Bohrung wurde in ca. 9 m Tiefe unter Geländeoberkante (GOK) ein gespannter Grundwasserleiter angebohrt. Während der Bohrung ist der Druckwasserspiegel auf ca. zwei Meter Tiefe unter GOK im Bohrloch angestiegen. Dieser starke Anstieg bestätigte einen hohen Porenwasserdruck in der Tiefe. Mit Piezometern wurden im Jahresverlauf Druckwasserspiegelschwankungen in den Bohrungen in den Bereichen von ca. 40 bis 100 cm Druck Wassersäule gemessen. Die Druckwasserspiegelschwankungen stehen vermutlich in enger Verbindung zum Niederschlagsabflussgeschehen des Hanges, denn schneller Anstieg des Drucks nach Niederschlägen wurde oft beobachtet (Wienhöfer et al., 2011). Die Bohrung wurde so ausgebaut, dass sie mit

einer Inklinometer-Kette bestückt werden konnte. Die Inklinometermessungen zeigten deutliche Verschiebungen in einer Tiefe von ca. 11 m unter GOK und zeigten somit den Scherzonenbereich.

Da sich das hydrologische System des Hanges zeitlich so zeigt, dass Starkregenereignisse meistens auch zu schnellen Abflüssen und zu Hang-Kriechfortschritten führen, wurde die Vermutung aufgestellt, dass hohe Niederschläge und Makroporenflüsse ein bestimmender und dominanter Bestandteil des Hangsystems sind.

Die Heumöser-Hangbewegungshypothese lautet: Schnelle Wasser-Infiltrationsprozesse über Makroporensysteme führen an dem natürlichen Hang zu schnellen Sickerwasserprozessen. Nach der Sickerwasserstrecke (hangabwärts oberhalb des Festgesteins) baut sich in der Tiefe des Hanges (im Mittelbereich) ein gespannter Grundwasserbereich auf, weil sich teilweise geringdurchlässige Schichten oberhalb dieses Bereichs befinden. Die zeitweise (Stunden bis Tage) Erhöhung des Porenwasserdruckes im grundwassergespannten Bereich, einhergehend mit Niederschlagsereignissen, lässt die Auftriebskräfte steigen, und eine langsame Rutschung (Hangkriechen) über Scherzonen wird ab Überschreiten der „hanghaltenden“ Kräfte ausgelöst. Zur Illustration der Hangbewegungshypothese folgende Abb. 1.1.

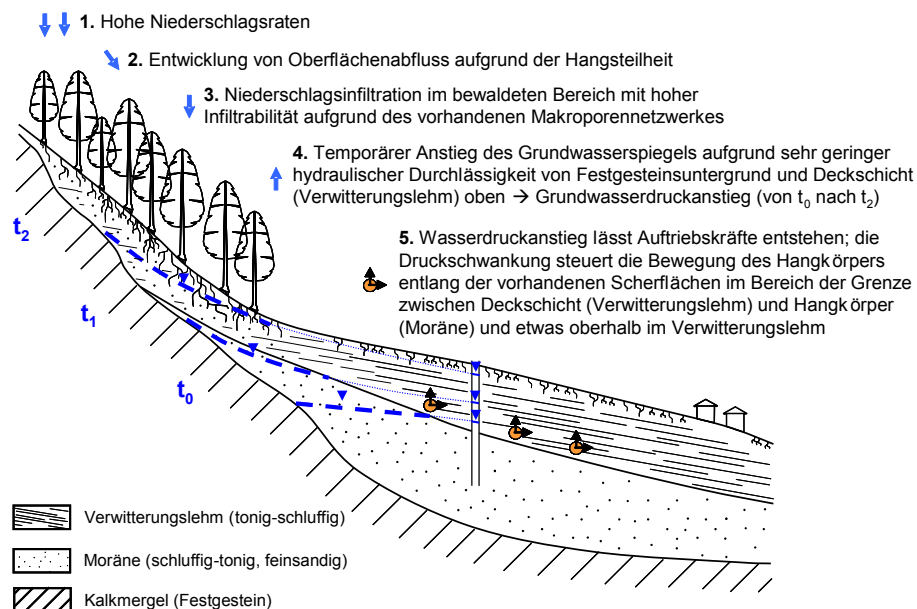


Abb. 1.1: Schematischer Längsschnitt (ca. 70 m lang) des oberen und mittleren Heumöser Hanges mit vereinfacht dargestellter Prozesskette von Niederschlag, über schnelle Makroporeninfiltration, über schnellen Druckübertrag in die Hangtiefe zur daraus resultierenden Hangbewegung (langsames Hangkriechen).

Diese Hypothese wurde in der hier vorliegenden Arbeit durch laboratorische Untersuchung von Hangbodenproben und Experimente auf der Technikskaala überprüft. Die Arbeit ist entsprechend zu dem in Abb. 1.2 gezeigtem Schema aufgebaut, welches die Ziele und die Experimente der vorliegenden Arbeit zusammenfassend zeigt und im Folgenden erläutert wird.

Den experimentellen Arbeiten (Kapitel 3 und 4) in der Technikskaala gingen Felduntersuchungen und Probennahmen an einem oberen und seitlichen Hangbereich des Heumöser Hanges voraus, um ungestörte Bodenproben für kontrollierte Laboruntersuchungen zu gewinnen (Kapitel 2).

Kapitel 2 befasst sich mit der Ermittlung von effektiven bodenhydraulischen Eigenschaften an großen ungestörten und makroporösen Bodenproben vom Heumöser Hang: „Bodensäulen-Experimente“.

Ziel war es, effektive bodenhydraulische Parameter und Eigenschaften von ungestörten Bodenproben zu ermitteln, das heißt die gesättigten und ungesättigten Durchlässigkeiten und die Wasserretentionseigenschaften. Mit diesen Parametern und Eigenschaften kann das potentielle Durchflussvermögen bei verschiedenen Sättigungsgraden an den Heumöser Hangflanken abgeschätzt und beschrieben werden. Die Hangflanken sind besonders makroporös und tragen gemäß der Hangbewegungshypothese zum schnellen Abfluss in die Hangtiefe bei und sind somit verantwortlich für einen schnellen Porenwasserdruckanstieg. Verständnis über das natürliche Makroporen-Durchflusssystem ist also unabdingbar für die Untersuchung der Hypothese.

Zuerst wurde eine Bodensäule mit quadratischem Querschnitt gewonnen (quadratische Bodensäule), um **gesättigte hydraulische Durchlässigkeiten** speziell unter Anwesenheit von Makroporen ermitteln zu können. Im Detail wurden hier Versuche an einer ca. 60 cm hohen und ca. 30 cm breiten ungestörten Bodensäule mit einem Volumen von ca. 54 dm³ durchgeführt. Diese Bodensäule wurde später in zwei etwa gleichgroße Quader halbiert, die dann sowohl vertikal als auch horizontal gesättigt durchströmt wurden, um Aussagen über richtungsabhängige Durchflusseigenschaften machen zu können. Die Durchflusseexperimente wurden mit Markierungsstoffzugaben ergänzt, um Fließpfade zu visualisieren und um Durchbruchkurven zu erhalten, die Rückschlüsse über das Porensystem ermöglichen.

Hierbei wurde den Fragestellungen nachgegangen: *Wie dominant ist der Makroporenfluss? Wie schnell kann das Wasser dort potentiell fließen? Sind die hydraulischen Durchlässigkeiten in vertikaler und lateraler Richtung hangabwärts unterschiedlich?*

Die zuvor kurz beschriebene Probennahme und Probenuntersuchung, mit der gesättigte hydraulische Durchlässigkeiten ermittelt wurden, um die genannten Fragestellungen beantworten zu können, ist keine Standardanwendung, sondern wurde speziell für die vorliegende Situation eigenständig entwickelt, denn es mussten relativ große Proben genommen werden, um die Makroporenstruktur ausreichend zu erfassen. Mit standardisierten Kleinprobenuntersuchungen wäre zu erwarten gewesen, dass keine ausreichende Repräsentativität der Probenstruktur erreichbar gewesen wäre. Die später beschriebene Probennahme und Probeneinfassung mit Holz, Montageschaum und Haushaltsfolie stellt eine einmalige Vorgehensweise dar.

Dann wurde eine Bodensäule mit kreisrundem Querschnitt (im Folgenden auch zylindrische Bodensäule genannt) gewonnen, um **Wasserretentionseigenschaften und ungesättigte hydraulische Durchlässigkeiten** mit verschiedenen Methoden und auf verschiedenen Skalen zu ermitteln. Im Detail wurden hier Versuche an bis zu 60 cm hohen ungestörten Bodenproben mit einem Durchmesser von ca. 30 cm und mit einem Volumen von bis zu 40 dm³ durchgeführt.

Diese Bodenproben wurden ausgehend von einem wassergesättigten Zustand schrittweise entwässert. Die gemessenen Porenwasserdrücke und Ausflüsse ermöglichten anschließend über inverse Anpassungsmethoden die Beschreibung von Retentionskurven (Wassergehalts-Porenwasserdruck-Beziehungen) und von ungesättigten hydraulischen Durchlässigkeitskurven (Wassergehalts-Durchlässigkeits-Beziehungen). Diese Entwässerungsmethode, bekannt unter dem Begriff **Multi-Step-Outflow-Methode**, im Folgenden MSO genannt, wurde sowohl an der ursprünglich ca. 60 cm hohen zylindrischen Bodensäule durchgeführt, als auch an durch Halbierung und Viertelung der Bodensäule entstandenen Teilstücken. Somit konnten effektive (gemittelte) Eigenschaften der Gesamtprobe mit ihren „lokalen“ tiefenabhängigen Teileigenschaften verglichen werden.

Zusätzlich wurden die Proben-Viertelstücke nach Wiederaufsättigung der Evaporation ausgesetzt und der Wasser-Gewichtsverlust, sowie die mittlere Porenwasserdruckänderung in der Probe über die Zeit erfasst. Mit dieser **Evaporationsmethode** (EVA) konnten wiederum Re-

tentions- und Durchlässigkeitskurven abgeleitet werden, die mit den MSO-Ergebnissen auf Übereinstimmung überprüft werden konnten.

Um die Vergleichsstudie zu erweitern, wurden zusätzlich vier „kleine“ 250 cm³ große Proben entsprechend den Tiefen der Viertelstücke der zylindrischen Bodensäule am Heumöser Hang entnommen und mit einer kommerziell erhältlichen Verdunstungsapparatur (Laborverdunstungsverfahren UMS **HYPROP**©) untersucht. Die Ergebnisse konnten mit denen der EVA- und MSO-Methode auf Übereinstimmung überprüft werden.

Hierbei wurde den Fragestellungen nachgegangen: *Welche effektiven bodenhydraulischen Eigenschaften sind am Heumöser Hang zu erwarten? Ist es möglich mit unterschiedlichen Methoden und Probengrößen übereinstimmende Eigenschaften zu ermitteln? Welches sind die Vor- und Nachteile der verwendeten Methoden? Wie ist das Verhältnis zwischen hydraulischer Matrixdurchlässigkeit (gemessen bei den MSO- und EVA-Experimenten) und Makroporösdurchlässigkeit (unter anderem abgeleitet aus der Gesamtdurchlässigkeit bei gesättigten Durchflussexperimenten bei der Bodensäule mit quadratischem Querschnitt)?*

Die genannte HYPROP-Methode ist eine vielfach verwendete Standardmethode zur Ermittlung von bodenhydraulischen Eigenschaften an Kleinzylinderproben. Zur Beantwortung der zuvor genannten Fragestellungen war es aber nötig, die Makroporösität des Hangbodens einzubeziehen und größere Proben zu untersuchen. Daher wurde eine einmalige Großprobenahme und Probenuntersuchung entwickelt. Die MSO- und EVA-Untersuchungen sind nach dem Prinzip etablierter Methoden erfolgt, allerdings ist die Anwendung dieser Methoden mit dem hier verwendeten Probentypen eine Einmaligkeit, denn mit den genannten Methoden wurden bisher überwiegend kleinere, sandigere, gestörtere, gepackte, künstlich poröse und unstrukturierte Proben untersucht. Die Herausforderung bestand also darin, große, stark tonhaltige und makroporöse Bodenproben zu untersuchen. Insbesondere die eigens entwickelte ungestörte Probennahme mit Außenhüllen aus Holz- oder Stahlmodulen, Montageschaum und Haushaltsfolie ist besonders erwähnenswert, ebenso wie die speziell in Eigenbau entwickelten Versuchsaufbauten mit weitgehend selbst konstruierter Messtechnik und dazugehörigen Datenerfassungssystemen.

Zur weiteren Annäherung an die Hangbewegungshypothese wurden vereinfachte Experimente auf der Technikkala durchgeführt. Es war nicht möglich, einen kompletten technischen Modellversuch zu entwickeln, der alle Aspekte der am Hang auftretenden Prozesse vereint und abbildet. Daher wurden die zwei wichtigsten Aspekte, der Makroporenfluss und die Deformationsprozesse, ausgewählt und separat voneinander und in vereinfachten experimentellen Aufbauten in der Meterskala systematisch untersucht.

Kapitel 3 beschreibt die Ermittlung von Makropore-Matrix-Austauschprozessen in einem idealisierten System: „Makroporenfluss-Experimente“.

Auf Basis eines einmalig entwickelten technischen Modellexperimentes wurden Makroporeninfiltrationsprozesse in einem halbzylindrischen ca. 110 cm hohen Versuchsaufbau genauer untersucht. Ziel der Untersuchungen war die Quantifizierung von Makroporendurchfluss- und ausfluss, sowie die Erfassung von Makropore-Matrix-Austauschprozessen in einem idealisierten System. Eine einzelne vertikale Makropore, die von oben her mit Wasser beschickt werden konnte, wurde hierzu in eine Sandmatrix eingebettet. Zu jedem Versuchsdurchlauf wurden „trockene“ Anfangsbedingungen in der Matrix hergestellt. Variiert wurden bei den Versuchen die Infiltrationsraten, mit denen das Wasser direkt und ausschließlich in die Makropore geleitet wurde.

Hierbei wurde den Fragestellungen nachgegangen: *Wie funktioniert Makroporendurchfluss in einem idealisierten System? Wie findet der Wassertransferprozess von Makropore zur umgebenen Matrix statt? Unter welchen Anfangs- und Randbedingungen kann sich Makroporendurchfluss bilden und somit z.B. Wasser beschleunigt in die Hangtiefe leiten und entsprechend der Hangbewegungshypothese schnell einen hohen Porenwasserdruck aufbauen? Andersherum stellt sich die Frage: Unter welchen Anfangs- und Randbedingungen kann Makroporenfluss verhindert oder vermindert werden durch Wasserübergang (Makroporenwasserverlust) in die umgebende Matrix?*

In Kapitel 4 wird der Einfluss von verschiedenen Sättigungsverhältnissen und von dynamisch steigendem Porenwasserdruck auf die Böschungsstabilität in einem idealisierten System untersucht: „Böschungsbruch-Experimente“.

Zur weiteren Überprüfung der Hangbewegungshypothese wurde ein Modellversuch in der Meterskala entwickelt und aufgebaut. Hierbei wurde aus dem gleichen Sandmaterial wie bei den Makroporenfluss-Experimenten zu jedem Versuchsdurchlauf eine ca. 100 cm hohe, ca. 80 cm breite und ca. 200 cm lange Böschung in einem Stahlcontainer aufgebaut. Die Böschungsstabilität wurde unter verschiedenen Wassersättigungs- und Wasserflussbedingungen untersucht. Es wurde zusätzlich zu den inneren hydrologischen Bedingungen mit externen variablen Böschungsauflasten gearbeitet, um Hanggewicht (Korngerüst, Bodenfeuchte, Schnee,...) zu simulieren und um damit Böschungsbrüche (Hangversagen) erzeugen zu können.

Hierbei wurde der Fragestellung nachgegangen: *Wie können verschiedene Sättigungsverhältnisse und dynamisch steigender Porenwasserdruck (entsprechend der Hangbewegungshypothese) die Böschungsstabilität beeinflussen?*

Die zwei entwickelten experimentellen Untersuchungsreihen zu Makropore-Matrix-Austauschprozessen (Makroporenfluss-Experimente) und die Böschungsbruch-Experimente haben den Charakter einer Grundlagenforschung und wurden nicht mit Materialien aus dem Heumöser Hang durchgeführt. Sie lieferten aber allgemein gültige Ergebnisse und auf den Hang übertragbare Erkenntnisse. Darüber hinaus konnte mit den Versuchen, die als Benchmarkversuche bezeichnet werden können, wichtige Datenreihen gesichert werden, die für die Validierung und Kalibrierung von numerischen Simulationsmodellen bereitstehen. Die Einmaligkeit dieser beiden entwickelten Experimenttypen liegt darin, dass hier auf einer relativ großen Skala, der Meterskala gearbeitet wurde, wodurch sich insbesondere die Makroporenfluss-Experimente von Vorgängerstudien abheben.

In Kapitel 5 werden die Einzelergebnisse aus den Kapiteln 2, 3 und 4 vor dem Hintergrund der Hangbewegungshypothese diskutiert und es wird aufgezeigt, unter welchen Bedingungen die Hypothese bestätigt werden kann. Zusätzlich werden die gewonnenen Ergebnisse zu den bodenhydraulischen Eigenschaften des Hangbodens, die mit verschiedenen Methoden und auf unterschiedlichen Skalen gewonnen wurden, diskutiert und die Vor- und Nachteile der Methoden herausgestellt.

Hypothese:

Kapitel 1

Schnelle Wasserinfiltration in das Makroporennetz und Abflüsse über die Makroporen im oberen Hangbereich induzieren

→ **Schnellen Porenwasserdruckanstieg im mittleren Hangkörper und resultierend**

→ **Destabilisierung des mittleren Hangkörpers durch Auftriebskräfte und resultierend**

→ **Abscheren bei Überschreiten der „hanghaltenden“ Kräfte (→ Hangkriechen)**

Kapitel 2

Bodensäulen-Experimente**Ziel:**

Ermittlung von effektiven bodenhydraulischen Parametern von großen und kleinen ungestörten und makroporösen Bodenproben.

Methoden:

Festpotential-Durchflussexperimente; Multi-Step-Outflow- und Evaporations-Experimente im Labor und inverse Parameterschätzung

Messergebnis:

- K_s vertikal vs. K_s lateral
- K_s Makroporen vs. K_s Matrix
- Bodenhydraul. Eigenschaften MSO vs. EVA
- Bodenhydraul. Eigenschaften Kleinprobe vs. Großprobe

Kapitel 3

Makroporenfluss-Experimente**Ziel:**

Ermittlung von Makropore-Matrix Austauschprozessen in einem idealisierten System.

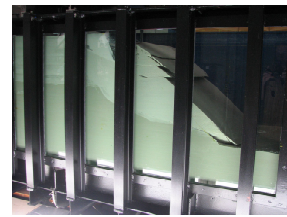
Methode:

Wasserinjektion mit verschiedenen Raten in eine künstliche, senkrecht und zentral angeordnete Makropore eingebettet in einer homogenen Sandmatrix, Messung von Makroporenausfluss und Porenwasserdruckänderungen in der Makroporenumgebung

Messergebnis:

Quantifizierung von Wasserübergang von Makropore zur umgebenden Matrix (Transferraten) und Charakterisierung lateraler dreidimensionaler Wasserausbreitungsmuster.

Kapitel 4

Böschungsbruch-Experimente**Ziel:**

Ermittlung des Einflusses verschiedener Sättigungsverhältnisse und dynamisch steigenden Porenwasserdruckes auf die Böschungsstabilität in einem idealisierten System.

Methode:

Hangversagen ausgelöst durch eine Kombination von Hangauflast und Wasserinjektion in den Hangkörper (Sand, teilgesättigt)

Ergebnis:

Im Ruhezustand wirken teilgesättigte Zustände durch Kapillarkräfte hangstabilisierend. Schneller (dynamischer) Wasserdruckanstieg kann zu schlagartiger Instabilisierung des Hanges führen.

Kapitel 5

Diskussion und Synthese zur Hypothese: Unter den Anfangs- und Randbedingungen hohe Wassersättigung im Boden, verbunden mit starkem Niederschlag, ist zu erwarten, dass schneller Makroporenfluss entsteht, wodurch schneller Druckanstieg potentiell Hanginstabilität erzeugt. Bei trockenem bis mittleren (geringgesättigten) Anfangsbedingungen im Boden und bei niedrigen Infiltrationsraten kann sich entwickelnder Makroporenfluss frühzeitig vom oberflächennahen Untergrund ganz oder teilweise aufgenommen werden, so dass ein schneller Wasserdruckanstieg verhindert oder abgeschwächt wird.

Diskussion zu Methoden- und Skalenvergleich zu „Bodensäulenexperimenten“: An den heterogenen und makroporösen Proben mit unterschiedlichen Abmessungen vom gleichen Probenahmeort sind mit verschiedenen Methoden im Bereich mittlerer Sättigungen weitgehend übereinstimmende bodenhydraulische Eigenschaften ermittelbar. Bei der Bestimmung der Eigenschaften nahe Sättigung ergaben sich Unsicherheiten bei allen Methoden. Die Evaporations-Methoden haben den Vorteil, dass sie schneller als die MSO-Methode durchführbar sind. Großproben sind bei den makroporösen Böden aufgrund ihrer besseren Repräsentativität zu bevorzugen.

Abb. 1.2: Aufbau der gesamten Arbeit schematisch zusammengefasst dargestellt; K_s = gesättigte hydraulische Durchlässigkeit, vs. = versus (= im Vergleich zu), MSO = Multi-Step-Outflow, EVA = Evaporation.

2 Bodensäulen-Experimente: Ermittlung von effektiven bodenhydraulischen Eigenschaften

2.1 Ziel und methodische Herangehensweise

Die in der Einleitung beschriebene Hangbewegungshypothese basiert auf der Annahme sehr schneller Infiltrationen in und durch Makroporen bei gleichzeitig geringer Retention des Wassers in die die Makropore umgebende Bodenmatrix.

Zur Überprüfung dieser Hypothese wurden in der hier vorliegenden Arbeit Methoden entwickelt und angewandt, bei denen der gesättigte Wasserdurchfluss an einer Bodensäulenprobe sowohl in vertikaler als auch in lateraler Durchflussrichtung bestimmt werden konnte, um gesättigte hydraulische Durchlässigkeiten (K_s -Werte) zu bestimmen. Diese Experimente zielen darauf ab, den Makroporenanteil am Durchfluss zu erfassen, denn es ist zu erwarten, dass bei Anwesenheit von Makroporen in lehmigem Material der Durchfluss fast ausschließlich aus Makroporenfluss besteht.

Weiter wurden die Multi-Step-Outflow und Evaporations-Methoden angewandt, um die ungesättigten Wasserretentions- und Wasserflussbedingungen zu bestimmen, um so eine deutliche Abgrenzung zwischen den „schnelleren“ Makroporenflüssen und den „langsameren“ mikroporösen Durchflüssen in der Bodenmatrix zu erhalten.

Es war davon auszugehen, dass zur Bestimmung der bodenhydraulischen Eigenschaften eines heterogenen und komplexen Hangabschnitts mit Baumbewuchs und starker Oberflächenreliefierung mit konkaven und konvexen Bereichen und mit steileren und flacheren Bereichen keine repräsentative Probe entsprechend eines repräsentativen Elementarvolumens (REV) zu entnehmen war. Die hier genommenen Säulenproben sind ca. 60 cm hoch und ca. 30 cm im Durchmesser. Diese Größe wurde gewählt, um zumindest ansatzweise repräsentative Proben zu erhalten. Bei der gewählten Probengröße ergeben sich somit zumindest etwas „gemittelte“ Eigenschaften im Vergleich zu dem, was bei Kleinstproben zu erwarten wäre. Noch größere Proben zu nehmen, wurde nicht angedacht, weil im steilen und schwer zugänglichen Bereich die Proben auch rein handwerklich/technisch noch bewegbar und tragbar für die Probennehmer sein mussten.

Das Kapitel gliedert sich wie folgt: Zuerst werden der Probennahmeort und die Probennahme erläutert (Kapitel 2.2.1 und 2.2.2). Die Kapitel 2.2.3 bis 2.2.6 beschreiben jeweils den Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung und die Auswertungsmethoden:

2.2.3: Gesättigte Durchflusseexperimente (K_s)

2.2.4: Multi-Step-Outflow - Experimente (MSO)

2.2.5: Evaporations - Experimente (EVA)

2.2.6: Kleinzylinderproben - Evaporationsexperimente (HYPROP)

Die im Kapitel 2.3 gewonnenen Erkenntnisse über die gesättigten und ungesättigten bodenhydraulischen Parameter werden nochmals vergleichend und zusammenfassend in den Kapiteln 2.4 und 2.5 behandelt.

2.2 Material und Methoden

2.2.1 Probennahmeort

Das Untersuchungsgebiet „Heumöser Hang“ befindet sich nahe der Ortschaft Ebnit in Österreich (Gemeinde Dornbirn in Vorarlberg). In Abb. 2.1 ist das Untersuchungsgebiet Heumöser Hang abgegrenzt dargestellt. Die Abgrenzungen entsprechen dem abgeschätzten oberflächlichen hydrologischen Hangeinzugsgebiet. Von West nach Ost erstreckt sich der Hang auf über 1800 m und liegt in einer Höhe von ca. 1350 m bis 950 m über Normalnull. Oberflächliche Bewegungen wurden per „global positioning system“ (GPS) im Bereich von bis zu mehr als 10 cm a⁻¹ gemessen (Depenthal und Schmitt, 2003; Lindenmaier et al., 2005). Insbesondere die westlichen, steilen Waldbereiche sind aber unbewegt. In diesen Waldbereich befindet sich überwiegend lehmiger Boden (Schneider, 1999). An Schürfen wurden hier besonders deutlich Makroporen und Makroporensysteme in Form von Rissnetzwerken, Wurm- und Wurzelgängen erkundet (Wienhöfer et al., 2009; Lindenmaier, 2008). Die Entnahmestelle für die ungestörten Bodenproben (Bodensäulen) ist in Abb. 2.1 mit einem Quadrat markiert und befindet sich in einem unteren (unbewegten) Bereich des Waldes kurz vor dem Übergang zum unbewaldeten (bewegten) Mittelbereich des Hanges.

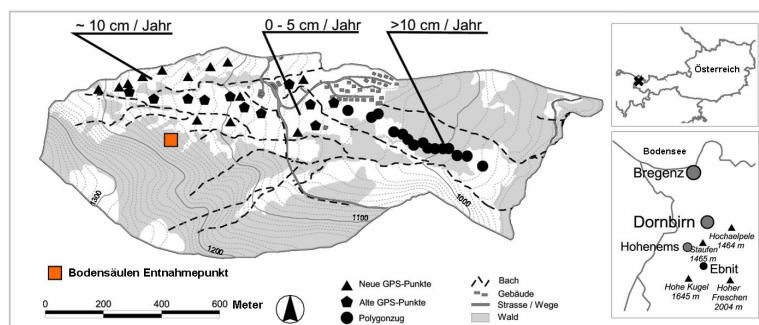


Abb. 2.1: Übersichtskarte des Heumöser Hanges (eingenordet), der sich zwischen der Ortschaft Ebnit und dem Berg „Hohe Kugel“ befindet; der Bereich, in dem die Bodenproben entnommen wurden, befindet sich in einem steilen Bereich des Waldes im oberen Hangbereich und ist mit einem Quadrat (Bodensäulen Entnahmepunkt) markiert; zusätzlich dargestellt Bewegungsraten von verschiedenen Oberflächenbereichen (Abb. nach Lindenmaier et al., 2005).

Zur Verdeutlichung der räumlichen Lage des Probennahmebereichs ist in Abb. 2.2 eine dreidimensionale Geländedarstellung aufbereitet. Auf dem Foto in Abb. 2.3 ist der Hangbereich zu sehen, in dem der Bodenanschnitt für die Probenentnahme durchgeführt wurde. In der gleichen Abbildung sind Gegebenheiten vor Ort wahrzunehmen, wie Baumbestand (Nadelbäume) und steiles Gelände.



Abb. 2.2: Dreidimensionale Basisdarstellung als digitales Geländemodell (Luftbild, DGM) des Heumöser Hanges (Blickrichtung nach Südwest); das gesamte Untersuchungsgebiet ist mit durchgezogener Linie markiert; die Entnahmestelle der Bodenproben ist mit einem Quadrat gekennzeichnet (Abb. nach Jan Wienhöfer, pers. Mitt.; Copyright Luftbild: Geodaten-Land Vorarlberg).



Abb. 2.3: Anlegen eines Bodenanschnitts zur Bodenprobenentnahme im steilen Bereich des Waldes, der in Abb. 2.2 mit einem Quadrat markiert ist.

2.2.2 Probennahme und Probenaufstellung im Labor

Die folgend beschriebene Probennahme folgt keiner standardisierten Methode, sondern ist speziell für die Fragestellungen dieser Studie einmalig entwickelt worden. Lediglich die Grundidee einer möglichst ungestörten Großprobennahme ist inspiriert vom Vorgehen der Probennahmen von Bouma und Dekker (1981). Zur Gewinnung der Bodensäulen wurde am Hang ein Bodenanschnitt als „Hantierzugang“ vorbereitet. Das Bodenmaterial wurde zuerst in Form eines Keils mit ca. 80 cm Höhe, ca. 120 cm Tiefe und ca. 40 cm Breite entnommen. Von diesem Anschnitt aus, den man waagrecht betreten konnte, wurden seitlich eine zylindrische und eine quadratische Bodensäule in einem Abstand von ca. 50 cm freigelegt (siehe Abb. 2.4).



Abb. 2.4: Oben eine Fotoaufnahme des Bodenanschnitts während der Freilegung der Bodensäulen, die zylindrische Säule ist fertig freigegeben und mit den Stahl-Außenhüllenmodulen überzogen (oben links), 50 cm rechts davon findet gerade die Vorbereitung der Freilegung der quadratischen Bodensäule statt (grob freigegeben); unten links dargestellt die quadratische Bodensäule kurz vor dem Erreichen der exakten Abmessungen; unten rechts die mit Folien eingewickelte Säule mit einem übergestülpten Holzmodul (der sichtbare zwei Zentimeter-Spalt zwischen Holzmodul und Säulenaußenhülle wurde später mit Montageschaum gefüllt).

Die Bodensäulen wurden sorgfältig auf ca. 60 cm Höhe und 30 cm Durchmesser (bzw. Seitenlänge) selbststehend freigelegt (freimodelliert). Dabei mussten je Säule ca. zwei bis drei Wurzeln mit Durchmessern von ca. 0,5 cm bis 2 cm an den Säulenaußenwänden abgetrennt werden, dieses so, dass die Wurzeln in der Säule verblieben und kein Bodenmaterial herausbröckeln konnte. Eine tiefere Probennahme war nicht möglich, weil bei ca. 60 bis 70 cm unter GOK der Festgesteinsuntergrund auftrat. Die Säulen wurden nach Erreichen der exakten Form und Abmessungen an den Außenwänden und an der Oberfläche straff mit handelsüblicher transparenter Haushaltfolie mehrfach umwickelt (siehe Abb. 2.4).

Anschließend wurden die Säulen mit Modulen überzogen, die den Transport ermöglichten und die später im Labor die wasserundurchlässige Außenhülle und den Säulen-Stabilisator darstellten. Bei der zylindrischen Säule wurden schrittweise Stahl-Module mit einer Höhe von 15 cm und einem Durchmesser von 34 cm übergestülpt. Der Spalt von zwei Zentimetern, der sich aufgrund der größeren Stahlmodule ergab, wurde mit handelsüblichem Dichtungs- und Montageschaum (Polyurethanschaum) gefüllt. Die Stahlmodule wurden über ein Flanschsyste mit Dichtungen fest verschraubt. Entsprechend dem Vorgehen bei der zylindrischen Säule wurden bei der quadratischen Säule zwei Holzmodule von je 34 cm Höhe und 34 cm Seitenlänge schrittweise der Probe übergestülpt und der zwei Zentimeter breite Spalt mit Montageschaum gefüllt.

Die Technik der Probennahme wurde inspiriert vom Vorgehen bei einer Probennahme, die Bouma und Dekker (1981) durchführten, wobei diese mit Gips als Spaltenfüller arbeiteten, wo hier Montageschaum genommen wurde und keine Folie verwendeten. Einen Tag später (nach Aushärtung des Montageschaums) wurden die Bodensäulen mit einer Säge am Grunde abgesägt und vorsichtig seitlich gekippt. An Bodengrundfläche und Bodenoberfläche wurden Holzdeckel angeschraubt. Der Luftraum zwischen Bodenoberfläche und Deckeln wurde mit ausgehärteten Montageschaumresten ausgefüllt, um eine Beweglichkeit der Bodensäulen beim Transport zu verhindern. Nach dem Transport wurden die Bodensäulen in der Technikum-Halle der Versuchseinrichtung für Grundwasser und Altlastensanierung (*VEGAS*) an der Universität Stuttgart aufgestellt. Eine Beschreibung dazu findet sich in Anhang A.

2.2.3 Gesättigte Durchflusseexperimente an quadratischer Bodensäule

2.2.3.1 Experimenteller Aufbau

Das Prinzip zur Messung von K_s unter konstanten Druck-Randbedingungen ist seit Jahrzehnten etabliert. Allerdings ist das hier vorgestellte Design des Versuchsaufbaus einmalig für die hier durchgeführten Experimente entwickelt worden. Das war notwendig, weil alle standardisierten Verfahren oder käuflich zu erhaltenen Komplettsysteme zur Ermittlung von K_s üblicherweise für deutlich kleinere Proben ausgelegt sind (z.B. 250 cm³ Zylinderproben).

Die quadratische Säule wurde mit einem Lochplattenmodul am unteren Rand bestückt (Details hierzu sind in Anhang B beschrieben) und daraufhin für die gesättigten Durchflusseexperimente in eine Konstant-Druck-Durchfluss-Situation eingebaut (siehe Abb. 2.5).

Hierbei wurde ein Konstant-Druck-Behälter ca. 100 cm über einer Podestplatte (\approx Unterseite der aufgestellten Säule) installiert. Dieser Behälter hat einen Zulauf, einen Auslauf und einen Überlauf. Der Auslauf ist über die unterseitige Öffnung des Lochplattenmoduls mit der Bodensäule verbunden. Da beim Überlauf in einer festgelegten Höhe das Wasser immer abfließt, ergibt sich bei konstanter Wasserzufuhr eine dauerhaft gleichbleibende Wassersäule als Druckrandbedingung. Die reine Bodensäule ist ca. 60 cm hoch. Da die zwei Holzmodule aber 34 cm hoch waren, steht das obere Holzmodul oben über die ursprünglich natürliche Bodenoberfläche heraus, was es ermöglicht, einen Überstau an der Bodenoberfläche zu erhalten. Kurz unterhalb des oberen Endes des oberen Holzmoduls ist dieses durchbohrt und ein Schlauch ($D = 0,4$ cm) führt in einen Auffangbehälter. In die Ausflusstrecke ist ein Lichtleiterfluorometer (Firma Hermess, Stuttgart, Deutschland) integriert, mit dem Markierungsstoffe (Uranin-Konzentrationen) in der wässrigen Lösung gemessen werden konnten. Das Schlauchende des Säulenausflusses hängt frei in den Auffangbehälter hinein, so dass hier mit einem Messbecher stichprobenartig die Durchflussrate bestimmt werden konnte.

In vier Tiefen sind Tensiometer (T-A bis T-D) installiert, die sowohl positiven als auch negativen Wasserdruck in der Einheit Zentimeter-Wassersäule (cm WS) messen können. Konstruktionsdetails und genauere Angaben zu den Tensiometern befinden sich in Anhang B. Ausgehend vom unteren Bodensäulenrand als Bezugsebene für die Tiefenabmessungen ($z = 0 =$ Grundfläche unten) befinden sich die Tensiometer in den Höhen: T-A = 56 cm, T-B = 46 cm, T-C = 22 cm und T-D = 12 cm.

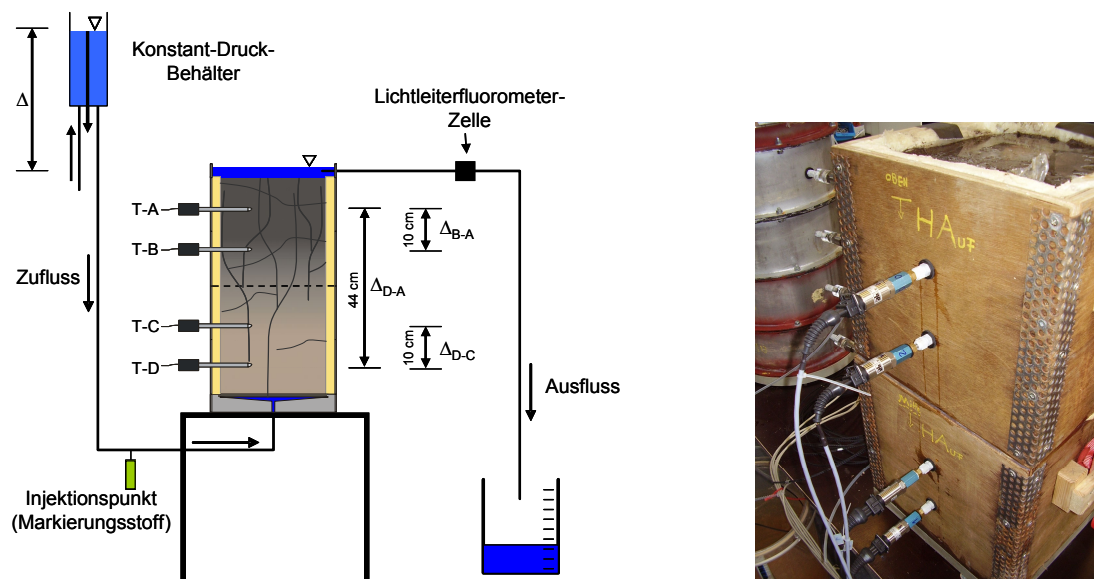


Abb. 2.5: Schematischer Aufbau und Foto des Versuchsaufbaus für die wassergesättigten Durchflussexperimente an der quadratischen Bodensäule; über einen Konstant-Druck-Behälter wird das Wasser von unten nach oben durch die Probe gedrückt; an der Bodensäulenoberfläche kann das Wasser noch einige cm aufsteigen, bevor es seitlich kurz unter dem oberen Ende des Außenmoduls durch dessen Wand zum Abfließen gezwungen wird; kurz nach dem Ausfluss des Überstauwassers wird dieses durch eine Durchflusszelle geleitet, die mit einem Lichtleiterfluorometer verbunden ist; T-A bis T-D bezeichnen die vier installierten Tensiometer; auf dem Foto ist unten in grau das nach außen hin wasserdicht befestigte Lochplattenmodul zu sehen; an der Bodensäulenoberfläche ist ein Wasserüberstau zu erkennen.

2.2.3.2 Versuchsdurchführung

Ziel der Untersuchungen an der Bodensäule mit quadratischem Querschnitt war die Ermittlung von gesättigten hydraulischen Durchlässigkeiten in vertikaler und lateraler Durchflussrichtung. Dabei wurden die Proben immer in einer Konstant-Wasserdruck-Situation von unten nach oben durchflossen. Die ursprünglich gesamte Bodensäule wurde nach Messungen der vertikalen Durchlässigkeit halbiert (siehe Abb. 2.6). Die Hälften wurden wiederum vertikal durchflossen. Anschließend wurden die Holzmodulwandungen der Hälften entfernt und so umgesetzt, dass die Probe so aufgestellt werden konnte, dass die vormals hangaufwärts gelegene Seite in der Konstant-Wasserdruck-Situation den unteren Rand bildete. Alter Montage-schaum wurde von den zum Durchfluss bestimmten Seiten entfernt und die sich neu ergebende

den Spalten wurden mit Montageschaum neu gefüllt. Die Tensiometer wurden entsprechend mit umgesetzt, so dass diese auch wie vorher 5 cm oberhalb und unterhalb der Probenmitte positioniert waren. Entsprechend der Halbierung waren je Hälfte nur noch in zwei Tiefen Tensiometer vorhanden, die später zur Berechnung des hydraulischen Gradienten benutzt werden konnten.

Somit gibt es fünf Messungen zur Erfassung des gesättigten Durchflusses: Drei Messungen in vertikaler Richtung und zwei Messungen in lateraler Richtung. Zur Verdeutlichung der Messungen sind die Durchflusssituationen in Abb. 2.7 schematisch dargestellt.

Nach Probentransport und -aufstellung in der VEGAS-Technik-Halle hatte die Probe einen feldfrischen Feuchtezustand. Die Anfangssituation entsprach einem Zustand, den man ungefähr als Feldkapazitätzustand bezeichnen konnte. Nach Befestigung des Lochplattenmoduls wurde die Bodensäule von unten her über den Konstant-Wasserdruckbehälter mit Leitungswasser aufgesättigt und kontinuierlich durchströmt. Sobald sich die Porenwasserdrücke nicht mehr veränderten (Konstantbleiben aller Tensiometermesswerte), wurde der Durchfluss per Hand mehrmals mittels Messbecher gemessen. Anschließend wurde Uranin als Markierungsstoff in der konstanten Durchflusssituation dem Durchflusswasser impulsartig zugegeben und dessen Konzentration am Ausfluss über die Zeit gemessen. Zusätzlich wurde die überstaute Bodensäulenoberfläche zeitweise gefilmt, um den Uraninaustritt visuell zu registrieren.

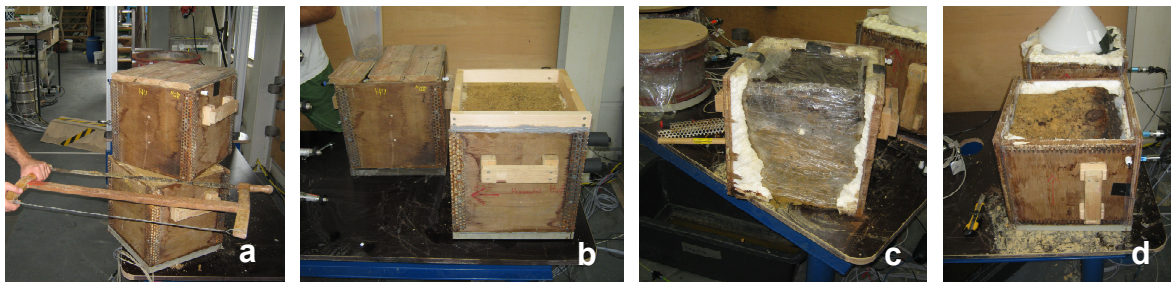


Abb. 2.6: a) Herstellung der Hälften mittels Säge aus der Gesamtsäule, b) Hälften in der Durchflusssituation B (zur Orientierung: Seitlicher Holzgriff horizontal mit Pfeil darunter, der die laterale Durchflussrichtung hangabwärts anzeigt), zusätzlich gezeigt ein Rahmenaufsatz, der Überstau an der unteren Probenhälfte ermöglicht, c) Ablösung der Holzwandungen für den Umbau auf lateralen Durchfluss, d) Hälften in der Durchflusssituation C (zur Orientierung: Seitlicher Holzgriff vertikal).

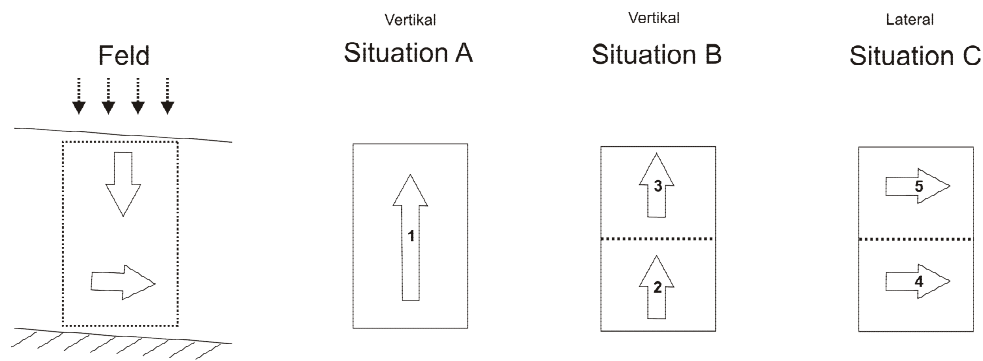


Abb. 2.7: Schematische Darstellung der Durchflusssituationen am Hang (Feld) und im Experiment in der Versuchshalle (Situation A bis C); entsprechend der Nummerierung und Richtung der Pfeile wurden die Messungen durchgeführt (bei Situation C wurden die Proben zum Experiment noch so gedreht, dass die Pfeile unten beginnen und Durchfluss von unten nach oben stattfand).

2.2.3.3 Auswertungsmethoden

Nach Einstellung der konstanten gesättigten Durchflussbedingungen von unten nach oben wurde der Volumenstrom Q [$\text{cm}^3 \text{d}^{-1}$] bestimmt. Bezogen auf die Querschnittsfläche A [cm^2] konnte die eindimensionale Fließgeschwindigkeit q [cm d^{-1}] bestimmt werden. Gleichzeitig wurden die Druckmessungen an den Tensiometern herangezogen, um die hydraulischen Druckgradienten i [cm cm^{-1}] zu bestimmen ($i = \Delta H / \Delta z$). Bei der Gesamtsäule wurde für die Berechnung von i der hydraulische Druckhöhenunterschied (ΔH) und der Abstand (Δz) zwischen der Position D (unten) und A (oben) gewählt, um die mittlere gesättigte Durchlässigkeit K_s [cm d^{-1}] zu ermitteln. Der Abstand zwischen Position D und A betrug 44 cm. Zusätzlich wurden an der Gesamtsäule die Gradienten der Abschnitte zwischen Tensiometer-Messposition D und C (untere Hälfte) sowie zwischen B und A (obere Hälfte) sowie zwischen C und B (mittlerer Abschnitt) in Relation zur konstanten Durchflussrate gebracht, um tiefenabhängig K_s bestimmen zu können. Der Abstand zwischen Position D und C sowie zwischen B und A betrug je 10 cm und zwischen C und B 24 cm.

Ausgehend von der „Darcy-Gleichung“

$$q = -K_s \frac{\Delta H}{\Delta z} \quad (1)$$

wurde zur Ermittlung der gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit folgende Formel verwendet:

$$K_s = \frac{Q \Delta z}{A \Delta H} \quad (2)$$

2.2.4 Multi-Step-Outflow-Experimente an zylindrischer Bodensäule

2.2.4.1 Versuchsaufbau

Das Prinzip von Multi-Step-Outflow-Experimenten (MSO) ist seit Jahren etabliert, allerdings bestehen keine vereinheitlichten Regelungen für einen generellen Versuchsaufbau. Überwiegend wurden bisher Untersuchungen an Kleinproben bis zu ca. 1000 cm³ beschrieben. In der hier vorgestellten Arbeit wurde explizit ein einmaliger Versuchsaufbau entwickelt, der den Großproben gerecht wurde. Die Einfassung der zylindrischen Bodensäule mit Stahlmantelmodulen, Montageschaum und Haushaltsfolie stellt eine methodische Neuerung dar. Durch die Modularität der Außenhülle (bestehend aus vier Einzelhüllmodulen aus Stahl) ergibt sich die Möglichkeit der Probenverkleinerung (Halbierung und Viertelung der Gesamtsäule). Diese technische Entwicklung stellt in dieser Größenordnung eine Einmaligkeit dar.

Der schematische Versuchsaufbau zu den MSO-Experimenten ist in Abb. 2.8 dargestellt. Die Vorbereitung der Probe und Details zu den verwendeten Komponenten des Versuchsaufbaus sind in Anhang C beschrieben. Am unteren Rand der Säule wurde ein Saugplattenmodul mit eingefasster poröser Membran befestigt. Bei vollständiger Sättigung hat die Platte einen Luft Eintrittspunkt von >1000 cm WS (Druck in Zentimeter-Wassersäule) und eine firmenseitig angegebene hydraulische Durchlässigkeit von ca. 5 cm d⁻¹. Bei der Befestigung der Saugplatte wurde originäres Bodenmaterial mit eingeschlämmt, damit ausreichend kapillarer Kontakt entstehen konnte. Durch diese Prozedur ist es nicht ausgeschlossen, dass Makroporen leicht verschlossen wurden. Unter der Saugplatte befindet sich ein Hohlraum.

An der Oberseite des Moduls wurde während eines Versuchsdurchlaufes die Säulenhülle um ein 5 cm hohes Randmodul erhöht und eine Platte aus Holz mit zwischengelagerter Folie als Evaporationsschutz aufgeschraubt. Der Evaporationsschutz wurde nur leicht befestigt, so dass sich noch ausreichend Luftdurchlass ergab, um einen Luftdruckausgleich zu ermöglichen.

Entsprechend den vier aufeinander stehenden äußeren Mantelmodulen wurden vier Tensiometer (T-A bis T-D) jeweils zentral in der Modul-Mitte horizontal eingefügt. Die Tensiometer

dienten in dieser Position der Erfassung des mittleren Porenwasserdrucks für das jeweilige Modul während des gesamten Versuchsablaufs.

Für die Bodenwasserlösung, die über die Saugplatte aus der Bodensäule abgesaugt wurde, wurde eine luftdichte Schlauchverbindungsstrecke zu einem Auffangbehälter geschaffen. In diese Schlauchstrecke unterhalb des Saugplattenmoduls wurde ein Drucktransmitter am unteren Rand (P-UR) integriert, der den dort herrschenden Druck (insbesondere Luftunterdruck als untere Randbedingung während des MSO-Versuchsdurchlaufs) in cm WS messen kann.

Der Auffangbehälter war luftdicht mit einer Vakuumpumpe verbunden und stand auf einer Waage, um die Ausflussmenge über das Gewicht über die Zeit zu erfassen.

Zur Steuerung des Unterdrucks wurde der Druckaufnehmer am unteren Rand (P-UR) als Referenzdruckaufnehmer verwendet. Sobald der gemessene Zielunterdruck (am Referenzdruckaufnehmer) erreicht war, schaltete sich die Vakuumpumpe ab und durch kleinste Undichtigkeiten im System sank der Unterdruck allmählich. Bei Unterschreiten des Zielunterdrucks um ca. 5 cm WS sprang die Vakuumpumpe wieder an und erhöhte den Unterdruck wieder bis zum Zielunterdruck. So konnte über eine lange Zeit (Tage und Wochen) bei kleinen Regulator-Schwankungen ein konstanter Unterdruck entsprechend der Zielvorgabe gehalten werden.

Nach Beendigung des MSO-Versuchs an der Gesamtsäule wurde diese halbiert und die Hälften nach Wiederaufsättigung wie zuvor die Gesamtsäule untersucht. Dabei wurde pro Probe ein Saugplattenmodul neu befestigt. Nach Untersuchungen der Hälften wurden diese wiederum halbiert, so dass sich vier Module mit ca. 15 cm Höhe ergaben, die wieder mit Saugplatten bestückt und untersucht wurden, wie oben beschrieben (Abmessungen und Kennwerte der Proben in Tabelle 2.1).

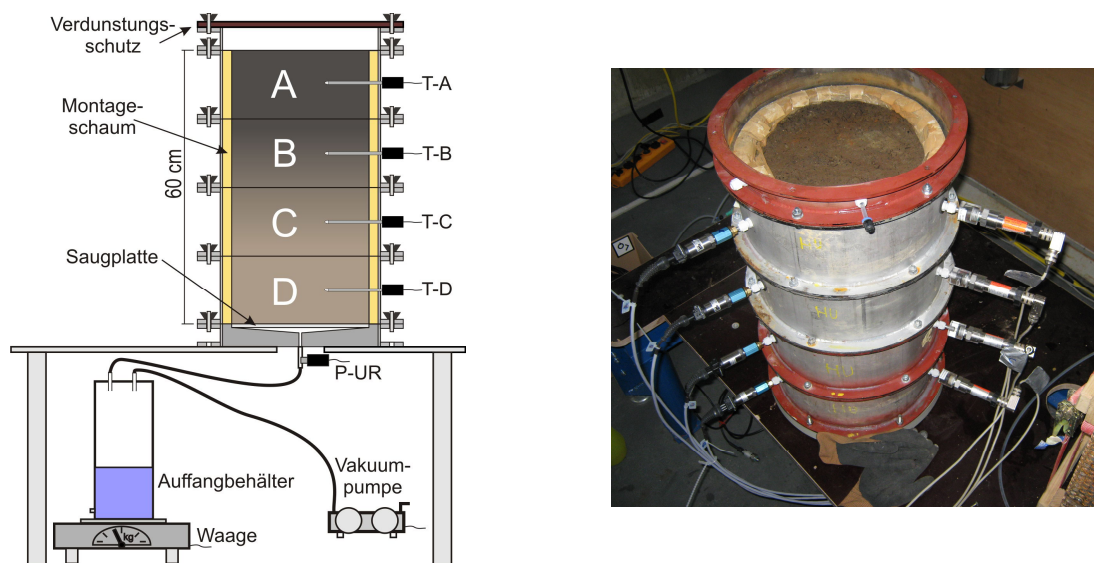


Abb. 2.8: Schematische Darstellung und Foto des Versuchsaufbaus eines Multi-Step-Outflow-Versuchs. Die Bodensäule steht auf einem Podest und ist am unteren Rand über das Saugplattenmodul mit dem Wasserauffangbehälter (auf Waage stehend) verbunden; über die Vakuumpumpe wird ein Luftunterdruck erzeugt, der sich im System über den Auffangbehälter bis in den Hohlraum an der Unterseite der Saugplatte ausbreitet; zudem gekennzeichnet die Tensiometer (T-A bis T-D) und ein Druckaufnehmer am unteren Rand (P-UR).

2.2.4.2 Bodenphysikalische Materialeigenschaften

Nach den MSO-Versuchen wurden die Viertel-Module in einer weiteren Versuchsreihe verwendet, bei der über eine Evaporationsmethode ebenfalls bodenhydraulische Eigenschaften ermittelt wurden (Kapitel 2.2.5). Nach der Evaporationsprozedur wurden die Proben bei 105°C für zwei Tage ofengetrocknet, um die Lagerungsdichten zu bestimmen. An nach der Ofentrocknung entnommenem Material wurden zusätzlich die Festsubstanzdichten und die Korngrößenverteilungen bestimmt. Die Feinkornbestimmung fand mit Aräometer statt. Eine Momentaufnahme dazu ist in Abb. 2.9 zu sehen und zeigt deutliche Unterschiede in der Farbe des Feinkornmaterials (A: schwarz-grau, B: leicht schwarz/leicht braun, C und D sehr ähnlich gelblich-braun). Die ermittelten Korngrößenverteilungen sind in Abb. 2.10 dargestellt und die prozentualen Anteile an Sand, Schluff und Ton sind in Tabelle 2.1 ausgewiesen. Es handelt

sich insgesamt um einen „Lehmton“ (Bodenartengruppe) bzw. um einen schwach schluffigen Ton (Bodenart Tu2 nach Bodenkundliche Kartieranleitung, Ad-Hoc-AG Boden 2005).

Die Festsubstanzdichte und die Lagerungsdichte nehmen mit der Tiefe zu. Bei Annahme von organischem „leichtem“ Material im Modul A mit „geringer“ mittlerer Festsubstanzdichte des Moduls von ca. $2,3 \text{ g cm}^{-3}$ und zusätzlich einem Auftreten von Makroporen ergibt sich eine hohe Porosität von 0,62. In der Tiefe (Modul C und D) wurden sehr hohe Festsubstanzdichten von ca. $2,9 \text{ g cm}^{-3}$ ermittelt, möglicherweise sind hier die Tonminerale besonders schwer. Dass die Werte dennoch realistisch sind, ergibt sich durch die Angaben von Kretz (1974-75) und von Hintermaier-Erhard und Zech (1997), bei denen Festsubstanzdichten für Tonminerale von bis zu $2,9 \text{ g cm}^{-3}$ angegeben werden. Die Porositäten lagen im unteren Bodenbereich somit bei ca. 0,61. Dies lässt sich hier aber eher auf den hohen Feinmaterialanteil und damit auf viele Mikroporen zurückführen, denn beim Hantieren mit den Proben und am Profilanschnitt im Feld wurde visuell beobachtet, dass der Anteil der Makroporen in der Tiefe etwas geringer ist als im Oberboden.

Tabelle 2.1: Abmessungen und weitere Kennwerte der verwendeten Proben sowie die ermittelten Festsubstanzdichten des Bodens aus den Modulen A,B,C und D, mit denen die Kennwerte für die Module AB, CD und ABCD errechnet wurden (Bodenart nach Bodenkundliche Kartieranleitung 5. Auflage, KA5 (Ad-Hoc-AG Boden, 2005), dort Abbildung 17).

Experiment		Durchmesser	Länge	Quers.- fläche	Boden- volumen	Trocken- gewicht	Lagerungs- dichte	Festsubstanz- dichte	Porosität	Porenvolumen (max. Wasser)	Körnung			
Nr.	Name	D	L	$A_{\text{Säule}}$	V_g	m_f	ρ_b	ρ_f	n	V_p	Sand	Schluff	Ton	Bodenart
		[cm]	[cm]	[cm ²]	[dm ³]	[kg]	[g cm ⁻³]	[g cm ⁻³]	[-]	[dm ³]	[%]	[%]	[%]	KA5
1	ABCD	31,5	57,5	779,3	45,03	47,9	1,06	2,60	0,59	26,64	4,5	46,3	49,2	Tu2
2	AB	31	27,5	754,8	20,90	20,7	0,99	2,30	0,57	11,88	5,5	47,3	47,3	Tu2
3	CD	32	30	804,2	24,13	27,2	1,13	2,91	0,61	14,80	3,7	45,6	50,6	Tu2
4	A	30	12,5	706,9	8,84	7,6	0,86	2,26	0,62	5,49	8,4	49,3	42,3	Lt3
5	B	32	15	804,2	12,06	13,1	1,09	2,33	0,53	6,43	3,8	46,1	50,1	Tu2
6	C	32	15	804,2	12,06	13,2	1,10	2,92	0,63	7,54	4,4	48,0	47,6	Tu2
7	D	32	15	804,2	12,06	13,9	1,16	2,90	0,60	7,26	3,1	43,4	53,5	Tu2



Abb. 2.9: Momentaufnahme zu den Aräometer-Messungen an den Bodenproben A bis D (entsprechend von oben nach unten im Bodenprofil), mit Färbungen des Schlämwwassers von dunkelgrau nach hellgelb.

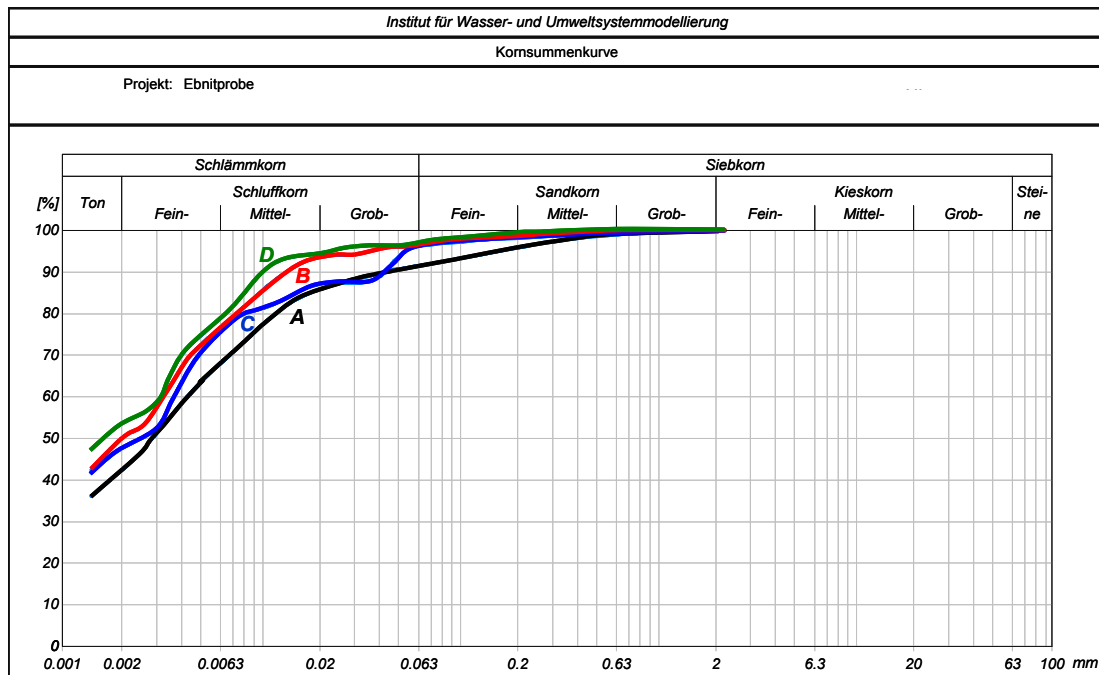


Abb. 2.10: Kornsummenkurven von Bodenproben aus den Modulen A bis D.

2.2.4.3 Versuchsdurchführung

Ziel der Untersuchungen an der Bodensäule mit kreisrundem Querschnitt war die Ermittlung von Parametern, mit denen sich Retentionskurven $h(\theta)$ und ungesättigte hydraulische Durchlässigkeitskurven $K(\theta)$ beschreiben lassen. Wobei h für Porenwasserdruck, K für hydraulische Durchlässigkeit und θ für volumetrischen Wassergehalt steht. Für die Gesamtsäule mit ihrer Höhe von ca. 60 cm und einem Durchmesser von 30 cm bedeutet dies, dass die Messprozedur sich auf die gesamte Probe bezieht. Somit kommen effektive (gemittelte) Parameterergebnisse zustande, die z. B. hilfreich sind für numerische Hanghydrologiemodelle, die nicht zu viele Eingangsparameter und räumlich detaillierte Informationen benötigen oder deren Anwender der Einfachheit halber nur wenige Parameter verwenden wollen. In der hier vorliegenden Arbeit wurden zusätzlich zu den Parametern der Gesamtsäule auch Parameter für ihre Teilstücke ermittelt, um tiefenbezogene Informationen zu erhalten und um das weite Spektrum von Parametern aufzuzeigen, welches sich hinter einem „effektiven“ Mittelwert verbergen kann. In Abb. 2.11 und Abb. 2.12 sind die verschiedenen Untersuchungsphasen und die untersuchten Bodenproben-Teilstücke schematisch und als Foto dargestellt. Insgesamt wurden entsprechend den verschiedenen Längen und Teilstücken sieben MSO-Versuche durchgeführt. Abmessungen und weitere Kennwerte zu den sieben Probenlängen sind in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Vor Beginn der ersten Untersuchung an der Gesamtsäule hatte diese einen feldfrischen Feuchtezustand. Über einen Konstant-Wasserdruck-Behälter wurde die Säule von unten über das Saugplattenmodul aufgesättigt. Dabei wurde etwas CaSO_4 zugegeben, um die Tonver Schlammung an der Probe zu verringern. Die Aufsättigung wurde gestoppt, sobald das Wasser an der Bodenoberfläche austrat und sich ein Überstau von 2 bis 6 cm ergab.

Anschließend wurde die Verbindung zum Konstant-Wasserdruck-Behälter gelöst und stattdessen die Verbindung zum Auffangbehälter hergestellt (siehe Abb. 2.8). Ausgehend von der Überstausituation konnte das Wasser der Schwerkraft folgend aus der Bodensäule hinaus in den Auffangbehälter fließen. Das Schlauchende im Auffangbehälter befand sich einige Zentimeter unter der Oberfläche der Saugplatte (= unterer Rand der Bodensäule), so dass hier eine hängende Wassersäule bestand, die einen leichten Unterdruck erzeugte. Zugleich bestand aber zu Beginn des Auslaufens aufgrund der kompletten Wassersättigung der Probe und des

Überstaus eine stehende Wassersäule, die beim Ausfluss die Wirkung einer fallenden Druckwassersäule hatte. Das „freie“ Ausfließen besteht aus zwei zeitlichen Abschnitten.

Im ersten Abschnitt fließt Wasser entsprechend der Menge des Überstaus aus, bis dieser verschwunden ist (Perkolationsphase). Im zweiten Abschnitt, der Drainagephase, wird die Probe sukzessive teilentleert (vermutlich erst Makroporen, dann weite Grobporen und dann teilweise enge Grobporen).

Der zeitliche Abschnitt des „freien“ Ausflusses konnte über die gemessene Ausflusskurve beobachtet werden. Der Endpunkt dieses zeitlichen Versuchsabschnittes (freier Ausfluss) wurde gewählt zu dem Zeitpunkt, zu dem nur noch minimale Ausflüsse beobachtet wurden und die Porenwasserdrücke in der Probe (gemessen über die Tensiometer) konstant waren. Dies konnte bis zu fünf Tage dauern. Dieser Zustand entsprach nahezu einem statischen Ruhezustand leicht im Ungesättigten, den man ähnlich einem Feldkapazitätzustand beschreiben kann.

Dieser Vorlauf zum eigentlichen MSO-Experiment ging später mit in die Gesamtauswertung zu den bodenhydraulischen Eigenschaften ein und stellt somit eine Erweiterung der Methode im Bereich hoher Wassersättigung dar. Diese Gesamtprozedur ist als XMSO-Methode (Extended-Multi-Step-Outflow-Methode) von Durner und Iden (2011) beschrieben worden.

Ausgehend von diesem leicht ungesättigten Zustand begann das MSO-Experiment. Es wurden direkt aufeinanderfolgend Entwässerungsstufen von -150 cm (10 Tage), -300 cm (10 Tage), -500 cm (7 Tage) und -600 cm (30-67 Tage) gewählt. Aufgrund des lehmigen Materials wurden hier bewusst lange Stufen und hohe Unterdrücke verwendet, um eine möglichst starke Entwässerung zu erzwingen. Im Vergleich zu den meisten anderen in der Literatur beschriebenen MSO-Studien sind die hier gewählten Entwässerungsschritte deutlich länger und auch stärker negativ als üblich, so dass man sagen kann, dass es sich hier nicht um ein Standardvorgehen handelt, sondern um eine spezielle auf das lehmige Material und auf die Probengröße angepasste Entwässerungsstrategie. Nach Abschluss der -600 cm Stufe wurde das Vakuum aus dem System gelöst und es herrschte noch für einige Tage am unteren Rand atmosphärischer Luftdruck. Anschließend wurde mit den gleichen Unterdruckstufen die gesamte XMSO-Prozedur an den Säulenhälften und den Säulenvierteln vollzogen.

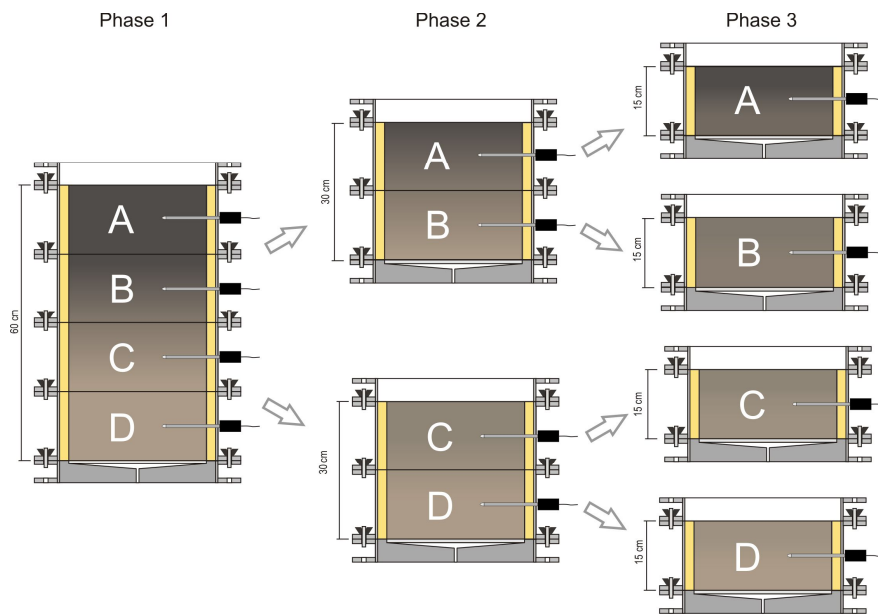


Abb. 2.11: Schematische Darstellung der Gesamtsäule (ABCD ca. 60 cm Höhe) wie sie für den Multi-Step-Outflow-Versuch in Phase eins verwendet wurde; nach Durchschnit der Gesamtsäule dargestellt ihre Hälften (AB und CD, je ca. 30 cm Höhe) sowie ihre Viertelstücke (A, B, C und D, je ca. 15 cm Höhe) nach weiterer Halbierung, die in den Phasen zwei und drei nach jeweiliger Aufsättigung ebenfalls mit der MSO-Methode untersucht wurden.

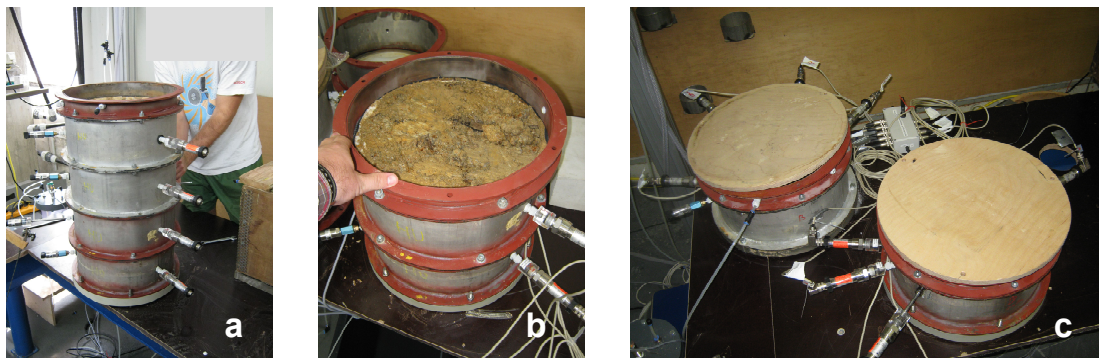


Abb. 2.12: a) Gesamtsäule mit Tensiometern, unterem Saugplattenmodul und den vier zusammenschraubten Außenhüllenmodulen; b) eine Bodensäulenhälfte nach Aufschauben und Durchschnitt zwischen den Außenhüllenmodulen B und C; c) zwei Bodensäulenviertel nach weiterem Durchschnitt zwischen den Modulen A und B sowie zwischen C und D.

2.2.4.4 Auswertungsmethoden

Die Fließprozesse in der zylindrischen Bodensäule wurden eindimensional betrachtet. Das heißt, dass die gemessenen Volumen-Ausflüsse Q_{aus} [cm³] auf die Querschnittsfläche der Säule $A_{Säule}$ [cm²] bezogen wurden ($A_{Säule} \approx 707$ cm² bis 804 cm², Detailwerte für Gesamtsäule, Säulenhälften und Säulenviertel siehe Tabelle 2.1) und sich dadurch in Form einer Längeneinheit darstellen lassen q_{aus} [cm]. Als Folge des freien Ausflusses und des Ausflusses während der Unterdruckstufen verändert sich das Porenwasserdruckprofil (bzw. das Sättigungsprofil) in der Säule über die Zeit. Ausfluss und Druckänderungen im System folgen Gesetzmäßigkeiten, die über die sogenannte „Richards-Gleichung“ beschrieben werden können:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

Wobei t [d] die Zeit ist, z [cm] die Tiefe ist und $C(h)$ [cm⁻¹] die Wasserkapazität (Ableitung der Retentionskurve $\theta(h)$) ist. Das heißt zusammengefasst, dass mit der Druckänderung am unteren Rand (Unterdruckstufen) Gradienten erzeugt werden, denen Fließprozesse mit Druck- und Wassergehaltsänderung im Bodensäulenprofil folgen.

Die in dieser Arbeit benutzte Software Hydrus 1D (Šimunek et al., 2008) ist ein numerisches Simulationswerkzeug für den eindimensionalen Wasser- und Stofftransport in der ungesättigten Bodenzone. Mit der Software ist es möglich, die gemessenen Daten für Ausfluss und Porenwasserdruck (Tensiometer) unter Vorgabe der zeitlichen Änderung der unteren Randbedingung (Unterdruckstufen) invers anzupassen. Die inverse Anpassung findet mithilfe einer Pedotransferfunktion statt und wird iterativ vollzogen, bis eine Anpassung der Daten bestmöglich ist, das heißt, wenn die Summe der Abweichungsquadrate zwischen gemessenen und simulierten Datenpunkten am geringsten war („Fittingprozedur“). Die zur bestmöglichen Datenanpassung gefundenen Parameter sind das Ergebnis der inversen Simulation. In einem ersten Schritt wurden die Daten nach dem Modell von van Genuchten/Mualem (van Genuchten, 1980) angepasst. Zur Verbesserung wurde in einem zweiten Schritt der Free-form-Ansatz nach Iden und Durner (2007) verwendet, mit dem meistens eine genauere Anpassung möglich ist.

Die Anwendung der Free-form-Methode baut auf einem Hydrus-Projekt auf und greift zur „Fittingprozedur“ selektiv auf die dort hinterlegten Messdaten sowie auf die Anfangs- und Randbedingungen zurück. Für die hier verwendeten Experimente wurden Hydrusprojekte wie folgt aufgesetzt: Für die Abmessungen der Bodenproben (Material 1) wurden die Längen der Bodensäulenhöhen [cm], die in Tabelle 2.1 angegebenen sind, verwendet. Die Tensiometermesspunkte wurden in den Hydrus Projekten als „observation points“ in den jeweiligen Tiefen integriert, in denen sie platziert waren. Zusätzlich wurde die Saugplatte am unteren Rand, die real eine Membrandicke von ca. 0,3 mm besitzt, in den Hydrus Projekten als zweites nicht real vorhandenes Material mit einer Dicke von 0,5 cm integriert (siehe Abb. 2.13). Die initialen Parameter der bodenhydraulischen Eigenschaften nach dem van Genuchten/Mualem-Ansatz sind in Tabelle 2.2 aufgeführt. Sowohl die hydraulischen Parameter von Boden und Platte wurden invers angepasst mit Ausnahme des Sättigungswassergehaltes θ_s , der entsprechend der Porosität festgelegt wurde. Die Free-form-Berechnungen wurden auf der Basis von einem Fünf-Knoten-Algorithmus ($r = 5$) durchgeführt.

Darüber hinaus wurde zum Vergleich neben der mit der Free-form-Methode ermittelten gesättigten hydraulischen Durchlässigkeit in einem weiteren Ansatz die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit ermittelt, indem die Perkolationsphase mit dem sinkenden Überstau als „Falling Head“-Versuch nach Kutilek und Nielsen (1994) ausgewertet wurde.

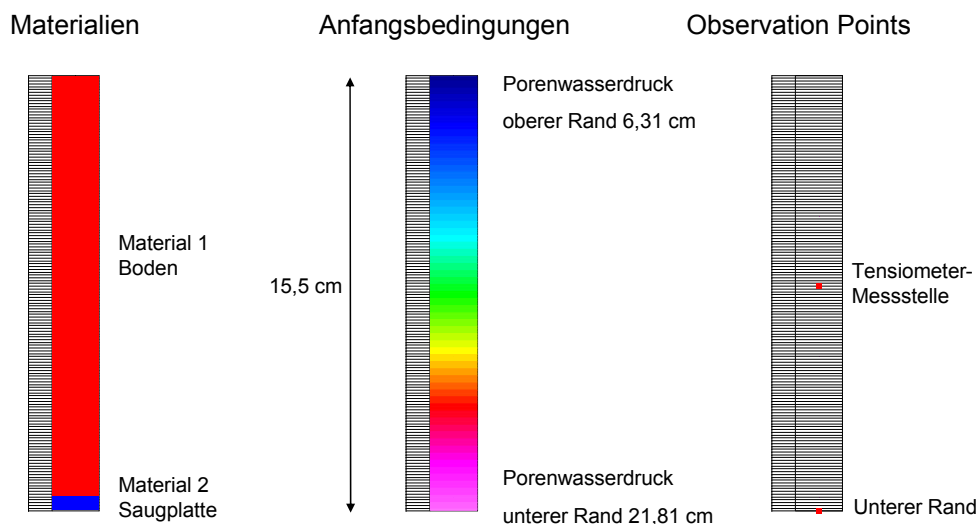


Abb. 2.13: Profilinformationen von einem Hydrus-Projekt beispielhaft für das Modul C; Diskretisierung der Bodensäule mit 156 gleichverteilten Knoten im Profil.

Tabelle 2.2: *Initiale Parameter der bodenhydraulischen Eigenschaften entsprechend einem „Silty Clay Loam“ aus dem Hydrus 1-D Bodenkatalog für den Boden und angesetzte Werte für die Saugplatte, bezogen auf die Parameter, die für die van Genuchten/Mualem-Funktionen benötigt werden.*

	θ_r	θ_s	α	n	K_s	I
	Rest- wassergehalt	Sättigungs- wassergehalt	Van Genuchten Formparameter Lufteintrittspunkt	Van Genuchten Form- parameter Korngrößenverteilung	Gesättigte hydraulische Durchlässigkeit	Tortuositätsfaktor
	[cm ³ cm ⁻³]	[cm ³ cm ⁻³]	[cm ⁻¹]	[-]	[cm d ⁻¹]	[-]
Material 1 Boden	0,089	0,53 bis 0,63*	0,01	1,23	1,68	0,5
Material 2 Saugplatte	0	0,5	1E-012	1,1	1,68	0,5

*entsprechend den Porositäten der Modulproben in Tabelle 2.1

2.2.5 Evaporationsexperimente an Bodensäulenteilstücken

In einer weiteren Versuchsphase wurden mit den am Ende der XMSO-Versuche vorhandenen Bodenproben-Viertel-Module (Modul A, B, C und D mit kreisrundem Querschnitt) Evaporationsexperimente durchgeführt. Mit den Evaporationsexperimenten an diesen Bodensäulenteilstücken war es wiederum wie bei den XMSO-Versuchen möglich, bodenhydraulische Eigenschaften zu ermitteln, allerdings eben mit einer anderen Methode. Somit wurden an exakt denselben Proben Retentions- und Durchlässigkeitskurven bestimmt, die für einen Vergleich zur Verfügung standen. Das bei der Evaporationsmethode angewandte Versuchsaufbau- und Auswertungsprinzip wurde von Schindler (1980) publiziert. Üblicherweise werden kleine Proben für die Untersuchungen verwendet. Die hier in dieser Studie vorgestellten Evaporationsversuche allerdings sind einmalig, da die Größe der Proben und die Makroporosität und der hohe Tongehalt des Bodens hervorstechen und ein solcher Probentyp in dieser Weise noch nicht untersucht wurde.

2.2.5.1 Experimenteller Aufbau

Bei der letzten XMSO-Phase war je Modul ein Tensiometer in zentraler Höhe vorhanden ($z = 7,5$ cm). Für die Evaporationsexperimente wurden die Module mit weiteren seitlichen Zugängen versehen, so dass nun je Modul in zwei bis drei Tiefen Tensiometer installiert werden konnten. Unter der Annahme, dass die jeweilige Boden-Zylindergrundfläche = unterer Rand (= Kontaktfläche zwischen Bodenzylinder und Saugplatte bei den MSO-Versuchen) der Höhe $z = 0,0$ cm entspricht, befanden sich in jedem Modul zwei Tensiometer in den Höhen $z = 3,75$ cm (T_unten_1 und T_unten_2) und zwei Tensiometer in der Höhe $z = 11,25$ cm (T_oben_1 und T_oben_2), das heißt, dass jeweils symmetrisch im Abstand von $3,25$ cm oberhalb und unterhalb der Probenmitte Tensiometer vorhanden waren (bei Modul B, C und D). Bei Modul A wurden insgesamt drei Tensiometer verbaut, ein Tensiometer unten (T_unten_A), ein Tensiometer oben (T_oben_A) und zusätzlich ein Tensiometer in der Mitte bei $z = 7,5$ cm (T_mitte_A). Die genauen Abmessungen der Proben sind in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Jeweils ein Bodensäulenviertelmodul wurde auf eine Plattformwaage positioniert (Details zur Waage in Anhang D). Die Waagen und Tensiomter waren permanent zur Datenerfassung mit einem Computer verbunden. Den 15 cm hohen Modulen wurde noch ein 5 cm hohes Modul aufgesetzt (runder Mantelrand). Es fungierte als obere Seitenbegrenzung, um einen späteren Wasserüberstau zu Beginn der Versuchsdurchführung zu ermöglichen. Das Gesamtsystem war nach oben hin offen zur Atmosphäre (*VEGAS* Versuchshalle), um eine freie Evaporation entsprechend der Experimentidee zu gestatten. In Abb. 2.14 ist der Versuchsaufbau schematisch und photographisch zu sehen. Mit zwei zur Verfügung stehenden gleichen Versuchsaufbauten konnten zwei von vier Bodensäulenteilstücke gleichzeitig der Evaporationsprozedur ausgesetzt werden.

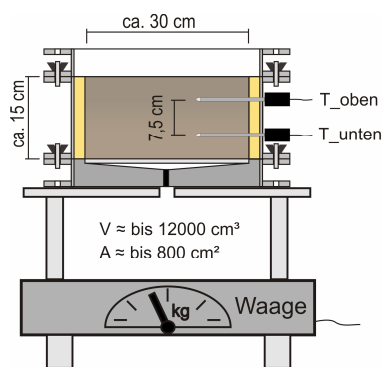


Abb. 2.14: Schematische Darstellung und Foto des Evaporationsexperimentes mit 15 cm hohen Bodensäulenviertelmodulen, stehend auf einer Plattformwaage und bestückt mit Tensiomtern in zwei Höhen (V = Gesamtvolumen Probe, A = Grundfläche oben = Evaporationsoberfläche); Je zwei der vier Module wurden in der VEGAS-Versuchshalle aufgestellt und zeitgleich auf jeweils eigener Plattformwaage stehend der freien Evaporation ausgesetzt; die Tensiomter stehen waagrecht aus den Modulen heraus; rechts oben im Foto Tensiomterdatenerfassungs-Box und Computer mit angeschlossenen Waagen zur permanenten Gewichtswerteerfassung.

2.2.5.2 Versuchsdurchführung

Für die Evaporationsexperimente standen zwei Plattformwaagen zur Verfügung, so dass zweimal nacheinander je zwei Bodenproben der Evaporation ausgesetzt waren (zuerst die Module A und C und dann die Module B und D). Durch das Nacheinander der zwei Messphasen ergaben sich für die Module unterschiedliche atmosphärische Randbedingungen, die die Evaporation beeinflussten. Ausgehend von einem trockenen Anfangszustand der Bodenproben, der dem Sättigungszustand am Ende der MSO-Prozedur entsprach, wurden die Proben über einen Zeitraum von ca. drei Tagen aufgesättigt, bzw. extra übersättigt, so dass sich ein wenige Zentimeter hoher Überstau ergab. Ausgehend von diesem Überstau-Anfangszustand wurden die Proben der Evaporation in der *VEGAS* Versuchshalle (mit schwankendem Raumklima; Temperaturschwankungen im Bereich von ca. 17°C bis 24°C und zusätzlich variablen Lichtbedingungen) überlassen.

Bei der Versuchsdurchführung ergeben sich vier wesentliche Phasen:

- a) die Evaporation des Überstaus,
- b) die Evaporation von Bodenwasser aus der Bodenprobe heraus mit funktionstüchtigen Tensiometern,
- c) die Evaporation von Bodenwasser aus der Bodenprobe heraus ohne funktionstüchtige Tensiometer und
- d) anschließende Ofentrocknung der Probe.

Das Datenerfassungsintervall für Probengewicht- und Tensiometermessungen lag bei 10 Minuten. Um die Evaporation zu beschleunigen, wurde neben den zwei Bodenproben ein Ventilator aufgestellt. Dabei war die Ventilatorausrichtung so gewählt, dass die Luft waagrecht in ca. 40 cm Höhe oberhalb der Proben vorbeigeblasen wurde. Eine Veränderung auf die Gewichtsmessung durch aufpressende Luft an der Probe wurde dadurch ausgeschlossen. Die Proben wurden der Evaporation insgesamt für ca. 35 Tage ausgesetzt (= Versuchsdauer). Der Luftstrom war aber über der Probe, die näher am Ventilator stand, stärker und somit musste bei dieser Probe (beim ersten Durchlauf Probe C und beim zweiten Durchlauf Probe D) jeweils mit einer höheren Evaporationsrate zumindest zu Beginn gerechnet werden.

Nach Abschluss der Evaporationsexperimente wurden die Module letztmalig feucht gewogen und dann samt Boden und Mantelhülle in einem Trockenofen für > 24 Stunden bei 105°C getrocknet, um das restliche in der Probe vorhandene Wasser zu verdampfen (Phase d: Ofentrocknung). Nach dem Trocknen wurde nochmals das Gesamtgewicht ermittelt. Der durch den Trocknungsvorgang stark geschrumpfte und verhärtete Boden konnte in einem Stück aus der Mantelhülle heraus genommen werden. Somit konnten Bodentrockengewicht und Mantelgewicht separat gemessen werden. Mit den Messwerten konnten die noch verbleibenden Wassermengen (= verdampfte Wassermenge) nach Abschluss des Evaporationsversuchs und die Lagerungsdichte (Trockenmasse pro Volumen) ermittelt werden.

In einem zusätzlichen Schritt wurden im Anschluss der Ofentrocknungen und Wägungen aus jedem Modul eine kleine Menge Bodenmaterial von ca. 500 g entnommen. Mit einem einfachen Zylinder wurden nach dem Pyknometerprinzip die Festsubstanzdichten dieser Bodenproben ermittelt. Aus Lagerungsdichte und Festsubstanzdichte ließ sich ein genaues Porenvolumen und die Porosität errechnen (siehe Tabelle 2.1).

2.2.5.3 Auswertungsmethoden

Bei den Evaporationsexperimenten kann zu jedem Zeitpunkt der Versuchsdurchführung der Wassergehalt (Gewichtsverlustmessung mittels Waage) und der mittlere Porenwasserdruck (Mittelwert aus oberem und unterem Tensiometer) in der Bodenprobe festgestellt werden. Die ursprüngliche Idee zur Versuchsdurchführung eines solchen Evaporationsexperiments wurde von Wind (1968) bekannt gegeben. Die hier in dieser Arbeit vorgestellte Methodik folgt weitgehend dem Ansatz von Schindler (1980) und Peters und Durner (2008a). Die Auswertung ist dennoch ausführlich dargestellt, da sie leicht von der der zuvor genannten Autoren abweicht, indem sowohl die Berechnung des mittleren Wassergehalts als auch des Porenwasserdruckes immer auf den mittleren Zeitpunkt zwischen zwei Messungen gelegt wurde.

Die Tensiometer T_{oben} und T_{unten} zur Messung von Porenwasserdruck h_{oben} und h_{unten} befinden sich in den Tiefen z_{oben} und z_{unten} . Zu einem beliebigen Zeitpunkt t_i ergeben sich $h_{\text{oben } i}$ und $h_{\text{unten } i}$ sowie ein mittlerer Wassergehalt $\bar{\theta}_i$ (Gesamtsäulengewicht auf Waage abzüglich Stahlmantel-, Messtechnik- und Bodenfestsubstanzgewicht). Aus $h_{\text{oben } i}$ und $h_{\text{unten } i}$ wird auf Basis des geometrischen Mittels \bar{h}_i ermittelt. Die gleichen Messungen werden an-

schließend zum Zeitpunkt t_{i+1} durchgeführt. Zum Zeitpunkt $t_{i+0,5} = t_i + (0,5 (t_{i+1} - t_i))$ werden dann der mittlere Wassergehalt $\bar{\theta}$ [-] auf Basis des arithmetischen Mittels und der mittlere Porenwasserdruck \bar{h} [cm] auf Basis des geometrischen Mittels ermittelt. Es werden folgende Formeln verwendet:

$$\bar{\theta}_{t_i} = \frac{M_{feucht_{t_i}} - M_{trocken}}{\rho V} \quad (4)$$

M_{feucht} = Gesamtgewicht inklusive der Bodenfeuchte [g]

$M_{trocken}$ = Gesamtgewicht abzüglich der Gesamtbodenfeuchte [g]

ρ = Festsubstanzdichte [g cm⁻³]

V = Probenvolumen = $\pi r^2 L$ [cm³]

r = Probenradius [cm]

L = Probenhöhe [cm]

$$\bar{\theta}_{(t=t_{i+0,5})} = 0,5 (\bar{\theta}_i + \bar{\theta}_{i+1}) \quad (5)$$

$$\bar{h}_{(t=t_{i+0,5})} = \sqrt{(\sqrt{h_{oben_i} \cdot h_{unten_i}}) \cdot (\sqrt{h_{oben_{i+1}} \cdot h_{unten_{i+1}}})} \quad (6)$$

Aus den Datenpaaren, bestehend aus mittlerem Wassergehalt und mittlerem Porenwasserdruck, ergeben sich Messpunkte, mit denen der Verlauf der Retentionskurve $h(\theta)$ abgebildet werden kann.

Bei den Evaporationsexperimenten können zu jedem beliebigem Zeitabschnitt Δt [d] der Versuchsdurchführung die Evaporation Q_{eva} [cm³ d⁻¹] (Gewichtsverlustmessung = $\Delta Wasserverlust$ [cm³] mittels Waage) und $\Delta h/\Delta z$ [cm cm⁻¹] (Porenwasserdruckunterschied zwischen oberem und unterem Tensiometer geteilt durch den Abstand zwischen den Tensiometern) in der Bodenprobe festgestellt werden. Bei Annahme, dass über die Schicht genau zwischen den Tensiometern (= mittlere Querschnittsfläche der Bodenprobe $A_{Bodenprobe}$ [cm]) die evaporierte Wassermenge zur Hälfte geflossen ist, ergibt sich $q = 0,5 q_{eva}$ [cm d⁻¹]. Es werden folgende Formeln verwendet:

$$Q_{eva(t=t_{i+0,5})} = \frac{\Delta \text{Wasserverlust}_{(t_{i+1} - t_i)}}{\Delta t_{(t_{i+1} - t_i)}} \quad (7)$$

$$q_{eva(t=t_{i+0,5})} = \frac{Q_{eva(t_{i+0,5})}}{A_{\text{Bodenprobe}}} \quad (8)$$

Durch Invertierung des Darcy-Gesetzes können Punkte auf der Kurve zur ungesättigten hydraulischen Durchlässigkeit $K(\theta)$ ermittelt werden:

$$K_{(t=t_{i+0,5})} = - \frac{q_{(t_{i+0,5})}}{\nabla H_{(t_{i+0,5})}} \quad (9)$$

wobei:

$$\nabla H_{(t=t_{i+0,5})} = \frac{\Delta h_{(t_{i+0,5})}}{\Delta z_{(\text{oben-unten})}} + 1 = \text{hydraulischer Gradient [-]} \quad (10)$$

2.2.6 HYPROP-Evaporationsexperimente an Kleinzylinder-Bodenproben

In einer zusätzlichen Versuchsreihe wurde an kleinen Bodenproben (250 cm^3) aus den vier Modultiefen A, B, C und D Evaporationsexperimente mit der HYPROP-Methode durchgeführt. Mit dieser Methode war es wiederum, wie bei den XMSO- und EVA-Versuchen, möglich, bodenhydraulische Eigenschaften zu ermitteln; allerdings mit einer anderen Methode. Somit wurde an Proben vom selbem Probenentnahmeort weitere Retentions- und Durchlässigkeitskurven bestimmt, die für einen Vergleich mit den Ergebnissen der anderen Methoden zur Verfügung standen.

Das HYPROP-Evaporationssystem zur Bestimmung von Retentionsvermögen und hydraulischen Durchlässigkeiten von „kleinen“ Zylinderbodenproben ist eine kommerziell erhältliche Messapparatur mit dazugehöriger Auswertungssoftware, die von der Firma UMS GmbH München (Deutschland) entwickelt wurde. Die verwendete Methode basiert hauptsächlich auf den Studien von Schindler (1980); HYPROP steht für „hydraulic properties“.

2.2.6.1 Versuchsaufbau

In Abb. 2.15 ist die Messapparatur schematisch dargestellt. Sie besteht aus einem Edelstahlzylinder mit 250 cm^3 Volumen, in dem sich die Bodenprobe befindet. Der Zylinder ist auf einen Messkopf mit zwei senkrecht stehenden Tensiometerschäften wasserdicht aufgesetzt. Die Tensiometerspitzen befinden sich 1,25 cm über und unter der Mitte der Probe. Das Gesamtsystem steht auf einer Waage. Die Bodenprobe ist am oberen Rand offen zur Atmosphäre für eine freie Evaporation.

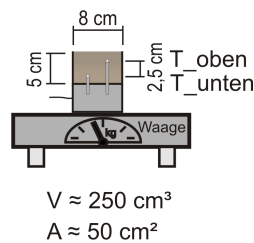


Abb. 2.15: Links: Schematische Darstellung der HYPROP-Messapparatur, bestehend aus einem Messkopf mit zwei senkrecht ausgerichteten Tensiometern in zwei Höhen, stehend auf einer Waage; auf den Messkopf aufgesetzte zylindrische Bodenprobe mit einem Volumen (V) von ca. 250 cm^3 ; die zur Atmosphäre hin offene obere (Evaporations-)Bodenoberfläche hat eine Fläche (A) von ca. 50 cm^2 ; rechts: Gesamter Versuchsaufbau der HYPROP-Messapparatur und Zubehör.

2.2.6.2 Versuchsdurchführung und Auswertungsmethoden

Versuchsdurchführung und Auswertung entsprechen weitgehend der Vorgehensweise, wie sie zu den Evaporationsexperimenten in Kapitel 2.2.5.2 und 2.2.5.3 beschrieben ist. Sie ist ausführlich in der Bedienungsanleitung zur Apparatur (UMS GmbH München, 2012, HYPROP® - Laborverdunstungsverfahren zur Bestimmung der pF-Kurve und der ungesättigten Leitfähigkeit) beschrieben. Der methodische Hintergrund basiert auf den Arbeiten von Wind (1968), Schindler (1980) und Schindler und Müller (2006). In Schindler et al. (2010a) und (2010b) wird die HYPROP-Messapparatur evaluiert und es werden Strategien aufgezeigt, mit denen der Messbereich hin zum Trockenen ($< -1000 \text{ cm}$ Porenwasserdruck) erweitert werden kann. Bei den hier verwendeten Proben wurden in einem weiteren Schritt die direkten „Datenpunkt-Kurven“ der Schindler-Auswertung auf Basis vom „Durner, dual van Genuchten“-Ansatz (Durner, 1994) für die Retentionskurve und auf Basis des „Peters-Durner II“-Ansatzes (Peters und Durner, 2008b) für die Durchlässigkeitskurve „angefittet“. Dazu wurde die Software HYPROP-Fit verwendet (Pertassek et al., 2011).

Für die Verwendung der HYPROP-Messapparatur wurden vier 250 cm^3 große Bodenproben am Heumöser Hang gewonnen. Die Proben wurden entsprechend den vier Modultiefen A bis D, wie sie im vorherigen Kapitel beschrieben wurden, in mittlerer Höhe des jeweils gedachten Moduls direkt beim Ausgraben der langen zylindrischen Bodensäule entnommen (Beispielhaft für Probe A in Abb. 2.16 dargestellt). Außerdem sind die verwendeten Bodenproben in Abb. 2.16 in einer Momentaufnahme zu sehen, bei der die Proben (A bis D) nach starker Austrocknung (nach Durchführung eines HYPROP-Messdurchgangs) einer Wiederaufsättigung unterzogen werden.

Der Wasserverlust durch die Evaporation und die Porenwasserdruckverhältnisse in der Bodenprobe wurden über die Versuchsdauer in einem Intervall von 1 und 10 Minuten erfasst (Dauerbetriebsmodus). Die vier Proben wurden zeitlich hintereinander in der HYPROP-Anlage durchgemessen.

Für die Berechnung des Anfangswassergehaltes der jeweiligen Probe wurde in der zur HYPROP-Messapparatur gehörigen HYPROP-Fit Software die optionale Anfangswassergehalts-Berechnung auf Basis des Bodentrockengewichtes gewählt. Und dieses unter Verwendung der ermittelten Festsubstanzdichten von den großen Modulproben laut Tabelle 2.1.



Abb. 2.16: Links: Bodenprobennahme mit einem Kleinzylinder (250 cm^3) in dem oberflächennahen Modulprobenbereich A am Heumöser Hang; rechts: Zylinderproben mit 250 cm^3 Volumen vom Heumöser Hang aus den Tiefen A bis D (von links nach rechts) stehend in einem Wasserbad zur Probenwiederaufsättigung (nach starker Austrocknung der Proben nach Durchführung von HYPROP-Messungen).

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Gesättigte Durchflusseexperimente an quadratischer Bodensäule

Exemplarisch werden in Abb. 2.17 die Verläufe der Porenwasserdruckverhältnisse in der Gesamtsäule während des Durchflusseexperimentes mit der Gesamtsäule (Situation A) gezeigt. Ausgehend von einem leicht ungesättigten Anfangszustand der Probe (ca. -5 cm Porenwasserdruck nahe dem unteren Rand und -30 cm nahe dem oberen Rand) wurde der Durchfluss von unten her initiiert. Nach ca. zwei Stunden stellte sich eine nahezu gleichbleibende Durchflussrate ein und die Veränderungen in den Porenwasserdrücken (Tensiometermessungen) waren nur noch minimal. Somit wurden stationäre Bedingungen angenommen und der Markierungsstoff impulsartig dazugegeben.

Die Durchflussrate betrug zur Zeit der Uranineinspeisung ca. $137,5 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ bei einer durchströmten Querschnittsfläche der Säulen von 841 cm^2 . Der Druckunterschied (Δh) zwischen Punkt T-D unten (Porenwasserdruck = 78 cm) und T-A oben (Porenwasserdruck = 26,5 cm) betrug 51,5 cm, der Abstand (Δz) zwischen den Punkten 44 cm und somit ein ΔH von 7,5 cm. Die errechnete Durchlässigkeit K_s betrug ca. 1381 cm d^{-1} .

In der Tabelle 2.3 sind die Ergebnisse für die Versuchsvarianten 1 bis 5 aufgeführt. Alle Durchlässigkeiten liegen in der Größenordnung von 10^{-4} m s^{-1} bis 10^{-5} m s^{-1} , was einer hohen bis extremen Durchlässigkeit entspricht. Die mittlere Durchlässigkeit für die Gesamtsäule betrug ca. 1381 cm d^{-1} mit ähnlich hoher Durchlässigkeit im unteren und oberen Abschnitt und mit einer sehr hohen Durchlässigkeit im mittleren Abschnitt. Nach Halbierung der Säule zeigten sich abweichende Durchlässigkeiten mit $396,7 \text{ cm d}^{-1}$ beim Unterteil und mit $966,6 \text{ cm d}^{-1}$ beim Oberteil. Somit kann aufgrund dieser Messungen der Unterteil als die „langsamere“ Schicht und der Oberteil als die „schnellere“ Schicht bezeichnet werden. Allerdings ist die höhere Durchlässigkeit des Oberteils aber ähnlich der Messergebnisse im oberen Abschnitt bei den Messungen der Gesamtsäule.

Die nach dem Umbau gemessenen lateralen Durchlässigkeiten liegen bei $200,8 \text{ cm d}^{-1}$ (Unterteil) bis $568,9 \text{ cm d}^{-1}$ (Oberteil) und sind somit jeweils ca. halb so hoch wie die vertikalen Durchlässigkeiten.

Die gemessenen Durchlässigkeiten der unteren und oberen Abschnitte der Gesamtsäule waren nicht die gleichen wie in den gleichen Abschnitten, die nur in den Hälften gemessen wurden. Das zeigt im allgemeinen die Variabilität der Durchlässigkeiten, die sich bei dieser Art von Messverfahren ergeben können, und könnte auch ein Effekt der Halbierung der Gesamtprobe sein, da die Konnektivitäten der Makroporen bei der Halbierung evtl. durch Bodenmaterialverschmierungen unterbrochen/verändert worden sein können und somit nicht ausgeschlossen werden kann, dass das das Strömungsregime möglicherweise veränderte.

Insgesamt erscheinen die Ergebnisse aus den Messungen bei den Hälften eher annehmbar, weil schon beim Freilegen/Ausgraben der Probe aus dem Hang es visuell möglich war Makroporen zu sehen. Es zeigte sich, dass die Makroporosität mehr oder weniger von oben nach unten hin abnahm und das passt zum Ergebnis der geringeren Durchlässigkeit in der unteren Hälfte.

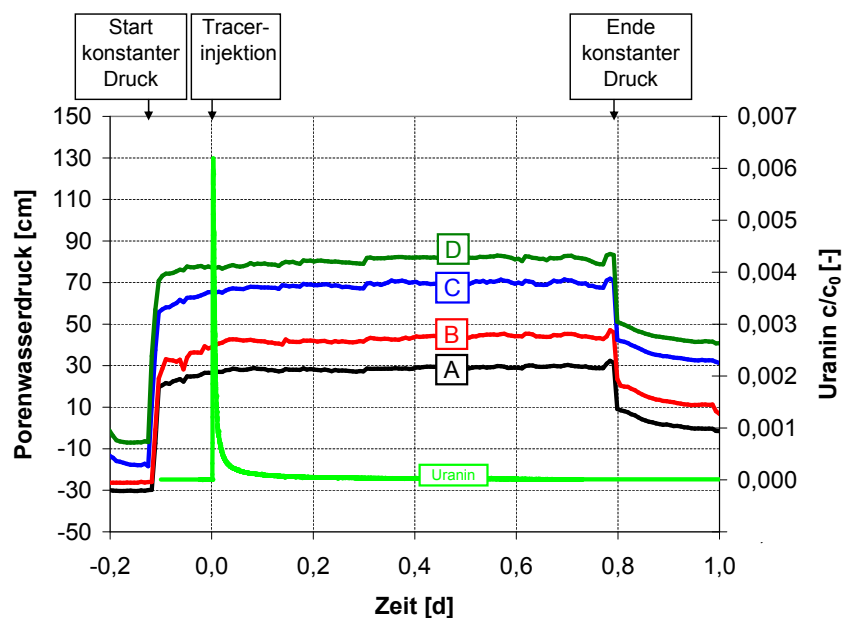


Abb. 2.17: Verläufe der Porenwasserdruckverhältnisse in der Gesamtsäule während eines Durchfluss-experimentes (Gesamtsäule vertikal, Situation A) und Uranindurchbruchskurve mit Einspeisung zum Zeitpunkt Null (c = Konzentration).

Tabelle 2.3: Gemessene gesättigte hydraulische Durchlässigkeiten zu den fünf Versuchsvarianten; für die vertikalen Versuche ist das Ergebnis direkt aus dem Versuch abgeleitet, welcher auch jeweils die tatsächliche Probenlänge hatte (Gesamtsäule und Hälften); zusätzlich sind die Ergebnisse gezeigt, die sich aus dem Versuch mit Grundlage der Gesamtsäule ergaben unter Betrachtung der inneren Druckgradienten der Teilabschnitte von Tensiometer D nach C (unten), von Tensiometer C nach B (Mitte) und von Tensiometer B nach A (oben); Nr. = Nummer.

Nr.	Situation	Probe	Flussrichtung	Berechnungsgrundlage	K_s		Kommentar
					[m s ⁻¹]	[cm d ⁻¹]	
1	A	Gesamtsäule	vertikal	Direkt von den Tensiometern der Gesamtsäule, Δz von D nach A	1,60E-04	1381,2	„effektives“ Ergebnis
				Δz von D nach C unterer Abschnitt	1,05E-04	905,5	
				Δz von C nach B mittlerer Abschnitt	3,27E-04	2825,2	
				Δz von B nach A oberer Abschnitt	9,40E-05	811,8	
2	B	Unterteil	vertikal	Direkt von den Tensiometern der unteren Hälfte, Δz von D nach C	4,59E-05	396,7	„langsamer“ Teil
3	B	Oberteil	vertikal	Direkt von den Tensiometern der oberen Hälfte, Δz von D nach A	1,12E-04	966,6	„schneller“ Teil
4	C	Unterteil	lateral	Direkt von den Tensiometern der unteren Hälfte, Δz von 10 cm in der Mitte der Probe	2,32E-05	200,8	„langsamer“ als vertikal
5	C	Oberteil	lateral	Direkt von den Tensiometern der oberen Hälfte, Δz von 10 cm in der Mitte der Probe	6,58E-05	568,9	„langsamer“ als vertikal

Die hohen Durchflussraten und die daraus resultierenden gesättigten Durchlässigkeiten im Bereich von 10^{-4} m s⁻¹ bis 10^{-5} m s⁻¹ sind überwiegend mit den Makroporen zu erklären, da bei dem untersuchten lehmigen Material ohne Makroporen, also nur mit Matrixporenraum, eine um zwei bis drei Größenordnungen kleinere Durchlässigkeit zu erwarten wäre.

Unter der Annahme allerdings, dass die gesamte Querschnittsfläche der Säule auch die Durchflussfläche ist, liegen die Durchflussraten eigentlich viel zu niedrig, da ja eigentlich nur der offene Makroporenflächenanteil die für den Durchfluss dominante Querschnittsfläche bildet. Abgeschätzt beträgt die an der Oberfläche offene Makroporenfläche ca. 2,5% der Gesamtoberfläche. Bei Annahme dieser Makroporen-Durchflussfläche von 21 cm² (0,025 x 841 cm²) ergibt sich für die Versuche an der Gesamtsäule eine reine Makroporenfließgeschwindigkeit von > 50000 cm d⁻¹, was einer Durchlässigkeit in der Größenordnung

von 10^{-3} m s^{-1} entspricht (extrem hohe Durchlässigkeit). Bei Übertragung der Ergebnisse auf die Hangsituation lässt sich somit sagen, dass, wenn sich hohe Wassersättigungen einstellen und die Niederschläge einen nahezu gesättigten Durchfluss im Makroporennetz erzeugen, mit schnellen und volumenreichen Wasserverlagerungen in die Tiefe zu rechnen ist. Noch weiter gedacht, ergibt sich beim Treffen dieses Wassers auf schon vorhandene Grundwässer eine „Aufstausituation“, die entsprechend der Hangbewegungshypothese dieser Arbeit zu steigenden Porenwasserdrücken führen kann.

Eingeschränkt wird die Wasserverlagerung in die Tiefe aber evtl. dadurch, dass die laterale Durchlässigkeit geringer ist als die vertikale (sowie es zumindest die hier an einer Einzelprobe gemessenen Durchlässigkeiten andeuten). Bei einem anzunehmenden starken Niederschlagsereignis ist bei hohen Sättigungen damit zu rechnen, dass schon direkt in den Makroporen ein Aufstau entsteht mit der Folge, dass sich sogar Zwischenabfluss oder Oberflächenabfluss (bei gefüllten Makroporen) bilden kann.

Ein weiterer Bestandteil der Auswertung zu den Bodensäulen mit quadratischer Querschnittsfläche bestand in der Interpretation der gemessenen Markierungsstoff-Durchbruchskurven. Durch filmisches Festhalten des Uraninaustrittes an der Oberfläche der Säulen konnte der Effekt des präferentiellen Makroporenflusses sehr gut und direkt abgelesen werden.

In Abb. 2.18 werden exemplarisch die Uraninaustritte an der oberen Säulenoberfläche gezeigt. Aufgrund des Überstaus kann man sehen, wie das Wasser direkt aus den Makroporen herausströmt. Es zeigte sich beim Austritt teilweise laminares Strömen, welches leicht in turbulentes Strömen überging, weil sich das Überstauwasser insgesamt zur Auslaufstelle hin bewegte und dadurch ein drehendes Strömungsmuster auftrat. Erst kurz nach dem Auslaufen über die Auslaufstelle erreicht das Wasser die Passierstelle für die Messung der Uraninkonzentration (Durchflusszelle des Lichtleiterfluorometers). Die zeitliche Verzögerung zwischen Austritt an der Oberfläche und Detektion betrug ca. 10 bis 15 Sekunden und ist entsprechend bei der Interpretation der Durchbruchskurven zu berücksichtigen.

In Abb. 2.19 sind die zu den fünf Versuchsvarianten gemessenen Uranin-Durchtrittskurven dargestellt. Die Kurven sind auf die Zeit bezogen und nicht auf Porenvolumina, da das Porenvoluminaverhältnis Makropore zu Mikropore nicht festgestellt wurde. Gemeinsam haben alle Kurven, dass sie steil zunehmen und langsam abnehmen, also nicht symmetrisch sind. Alle Durchbrüche sind sehr schnell, was sowohl den ersten Konzentrationsanstieg als auch das

Erreichen der maximalen Konzentrationsmessung betrifft. Alle Kurven zeigen deutliche Konzentrationsschwankungen, die sich als Mehrfachkonzentrationsspitzen dem allgemeinen Zu- und Abnahmeverlauf untergeordnet zeigen. Die Konzentrationsschwankungen lassen sich aufgrund des vermutlich vorhandenen heterogenen Makroporennetzwerkes mit seinen verschiedenen Durchmessern und Gewundenheiten der Fließwege erklären.

Neben den Gemeinsamkeiten ist insbesondere der Unterschied zwischen vertikalem und lateralem Uranin-Durchtritt zu erkennen. Die lateralen Durchbrüche kommen etwas später (maximale Konzentration 5 bis 10 Minuten nach Uranin-Injektion) als die vertikalen Durchbrüche (2 bis 5 Minuten nach Uranin-Injektion). Zusätzlich ist die relative Konzentration bei den lateralen Durchbrüchen deutlich höher als bei den vertikalen. Direkt vergleichbar sind die Versuche der kurzen Fließstrecke (Teilstücke mit etwa 30 cm bei Versuchsvarianten 2 bis 5), weil sie je in der gleichen Konstant-Wasserdruck-Situation eingebaut waren und fast die gleiche Länge besaßen. Bei Versuch 1 (Gesamtsäule) war über den Konstant-Wasserdruck-Behälter ein Druckgefälle eingestellt, welches später nicht genau bei den kürzeren Teilstücken hergestellt werden konnte. Dennoch ist zu erkennen, dass der Durchbruch des Uranins bei der Gesamtsäule später als bei seinen Teilstücken auftritt, was die längere Fließstrecke von etwa 60 cm wiedergibt.

Die gemessenen Durchbruchskurven lassen sich insgesamt als stark makroporenbeeinflusste Kurven interpretieren, da ein schneller Markierungsstoff-Durchbruch mit „Mehrfachpeaks“ registriert wurde, was typisch für heterogen-makroporöse Böden ist.

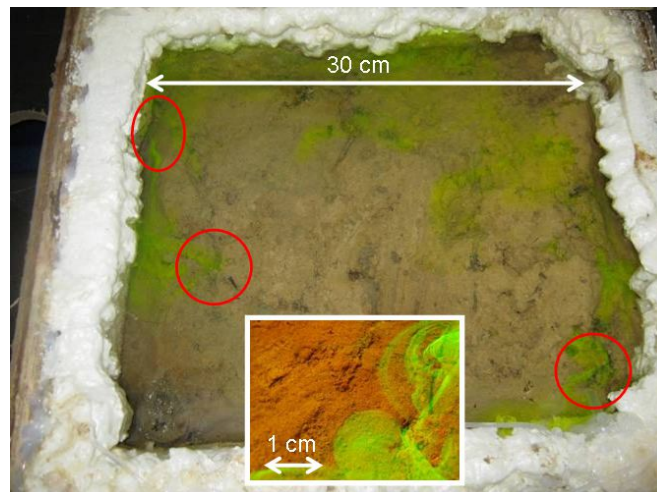


Abb. 2.18: Aufsicht auf die Bodensäulenoberfläche wenige Sekunden nachdem erste Uraninaustritte an der Oberfläche zu sehen waren; zur Verdeutlichung eine Nahaufnahme eines Uraninaustritts aus einer an der Probenoberfläche offenen Makropore (mitte unten).

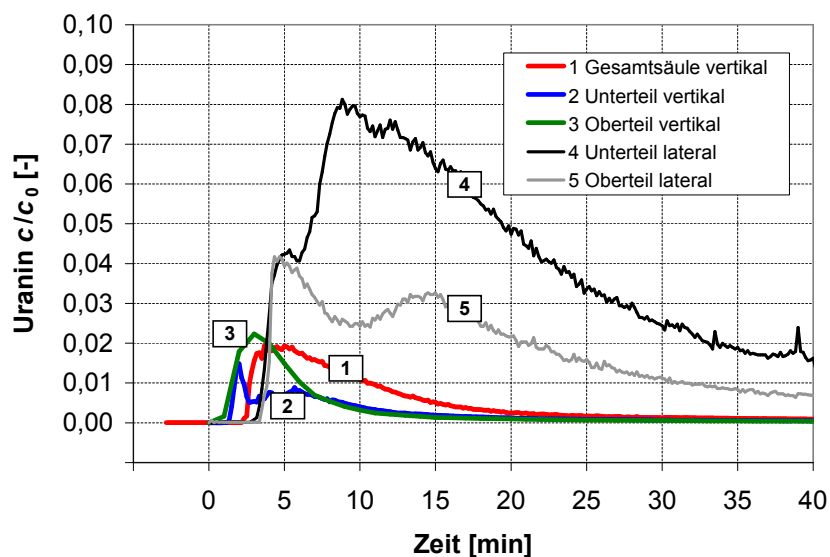


Abb. 2.19: Uranin-Durchtrittskurven dargestellt als relative Konzentration bezogen auf die Zeit für alle fünf Versuchsvarianten (Anmerkung: Gesamtsäule vertikal = lange Säule, Teilsäulen mit ca. halber Länge der Gesamtsäule).

2.3.2 Multi-Step-Outflow-Experimente an zylindrischer Bodensäule

2.3.2.1 Messungen und Simulationen

Gemessene und simulierte Porenwasserdrücke, untere Druckrandbedingungen sowie Probenentwässerungsmengen sind für die insgesamt sieben Probenvarianten in Abb. 2.20 bis Abb. 2.26 dargestellt.

- Ein Versuch begann mit einem Vorhandensein eines Überstaus von ca. 2 bis 6 cm (**Initialphase**).
- Ausgehend von diesem Zustand konnte die Probe über den unteren Rand mit leichtem Unterdruck (wenige Zentimeter hängende Wassersäule) und mit sinkendem Überstau gesättigt durchströmt werden (**Perkolationsphase**). Für die Massen-Bilanzierung, ausgehend von vollständiger Probensättigung, beginnt die Betrachtung in dem Moment, in dem der Überstau verschwindet und der Wasserspiegel quasi gleich der oberen Probenoberfläche ist. Zu diesem Zeitpunkt ist die maximale Probensättigung vorhanden.
- Weiter folgte die Probenentwässerung mit leichtem Unterdruck am unteren Rand (mit bis zu ca. -8 cm Druck durch hängende Wassersäule im Auslaufschlauch) mit zunehmend ungesättigten Verhältnissen im Boden (**Drainagephase**). Die Entwässerung findet erst schnell statt und nimmt dann sukzessive ab, bis nach einigen Tagen die „freie“ Entwässerung nur noch minimal ist. Der Zustand am Ende dieser „Auslaufphase“ kann verglichen werden mit einem Feldkapazitätzustand, bei dem insbesondere die Makroporen sowie Grobporen entwässert sind, aber Haftwasser noch vorhanden ist.
- Aus diesem quasi Feldkapazitätzustand heraus beginnt die Mehrschrittentwässerung, die bis zu 100 Tage andauerte (**MSO-Phase**).

Perkolationsphase und Drainagephase zusammen sind in der hier vorliegenden Arbeit definiert als die X-Phase, wobei das X vom englischen „extended“ für „erweitert“ hergeleitet ist und somit als erweiterter Vorlauf für die MSO-Phase zu betrachten ist.

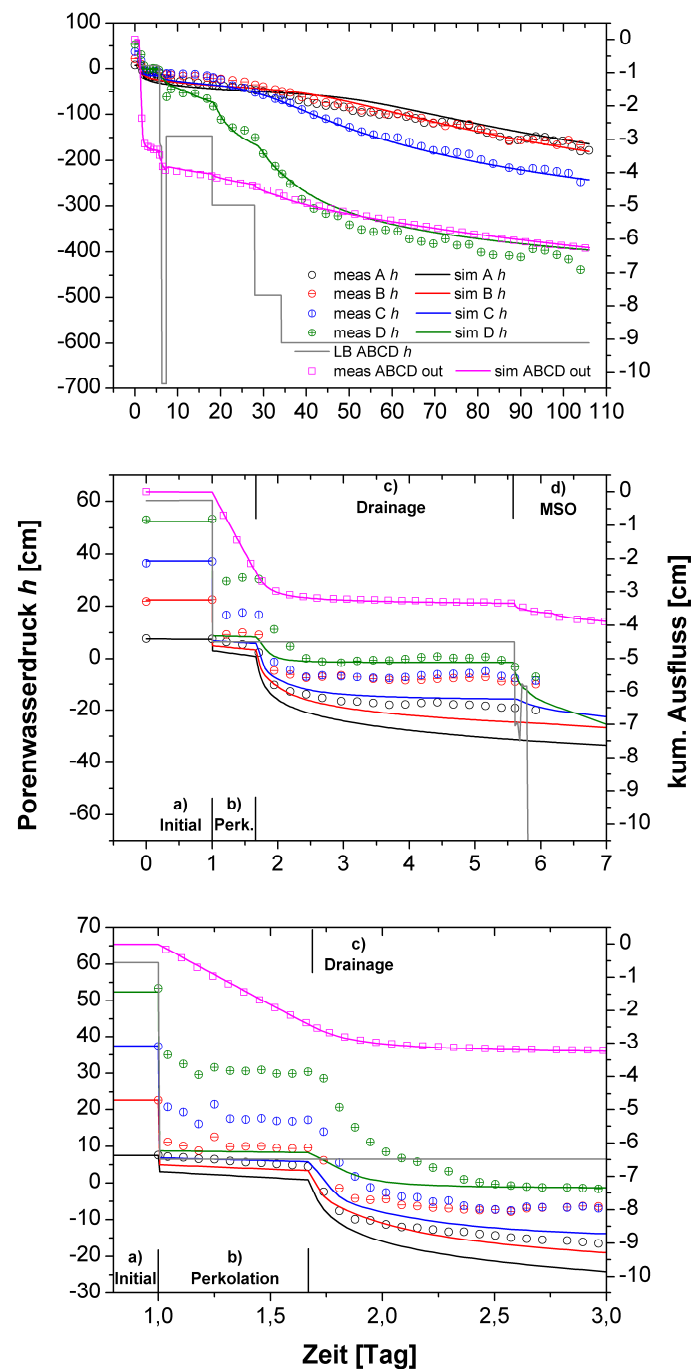


Abb. 2.20: Probe ABCD: gemessene (meas) Verläufe der Porenwasserdrücke (A h bis D h gemessen mit den Tensiometern), untere Druckrandbedingungen (LB) und Probenentwässerungsmengen (kum. Ausfluss (out)) sowie die Fitting-Kurven (sim) auf Basis des Free-form Ansatzes; obere Abbildung: Gesamtversuch, mittlere Abbildung: Detailansicht mit Fokus auf a) „Initial“- Phase, b) „Perkolations“- Phase, c) „Drainage“- Phase und d) Beginn der „MSO“- Phase und untere Abbildung mit Fokus auf die Perkolationsphase.

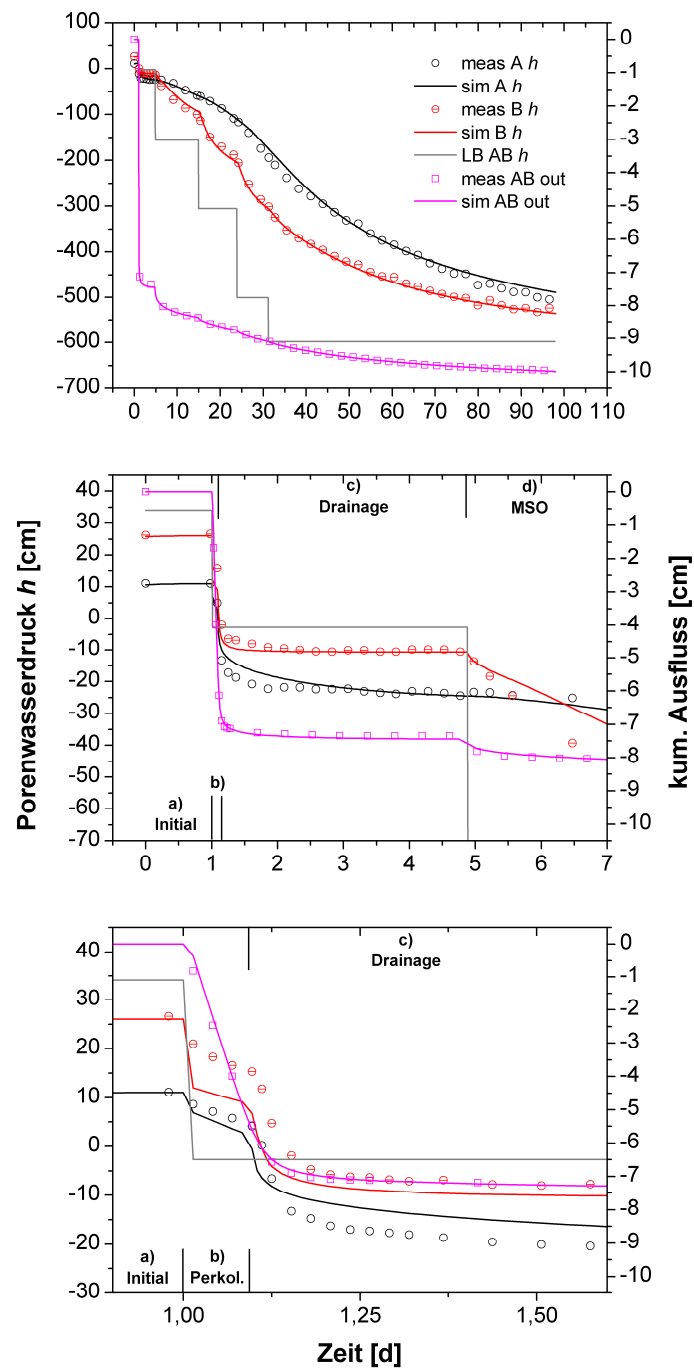


Abb. 2.21: Probe AB: gemessene und simulierte Verläufe der Porenwasserdrücke und des kumulativen Ausflusses sowie die unteren Druckrandbedingungen, die während des XMSO-Versuches herrschten.

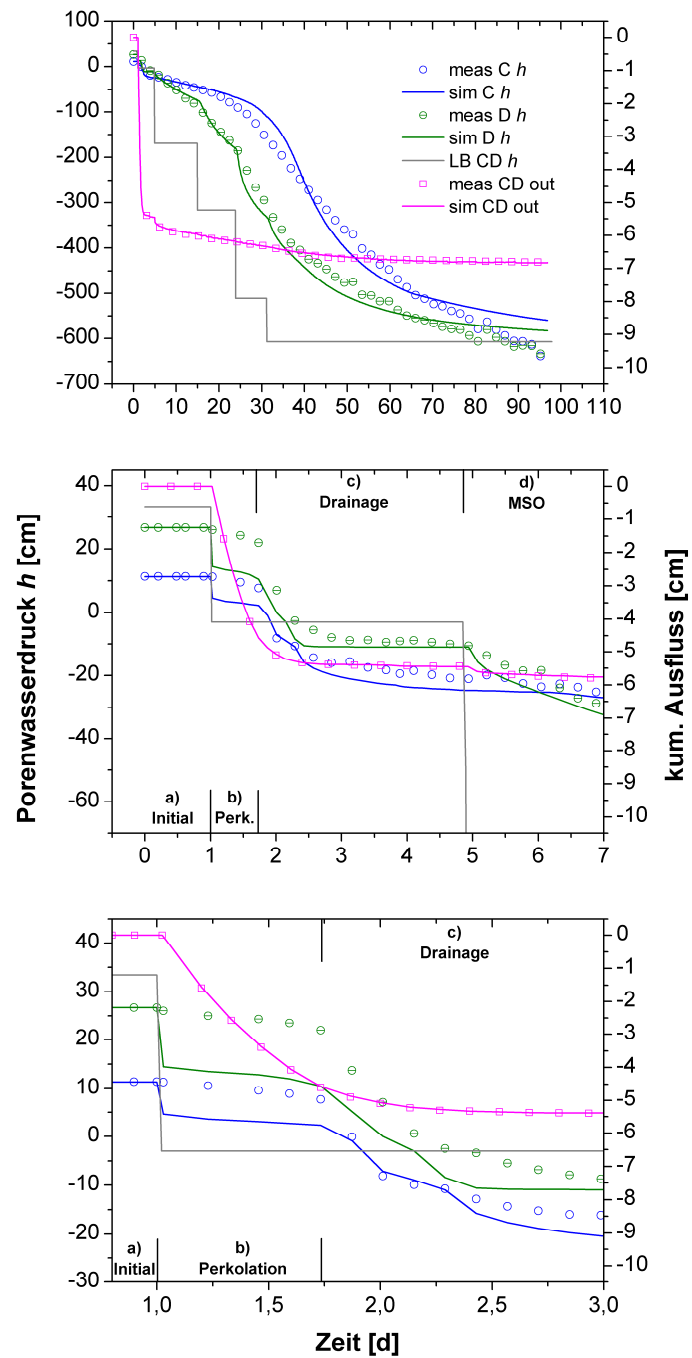


Abb. 2.22: Probe CD: gemessene und simulierte Verläufe der Porenwasserdrücke und des kumulativen Ausflusses sowie die unteren Druckrandbedingungen, die während des XMSO-Versuches herrschen.

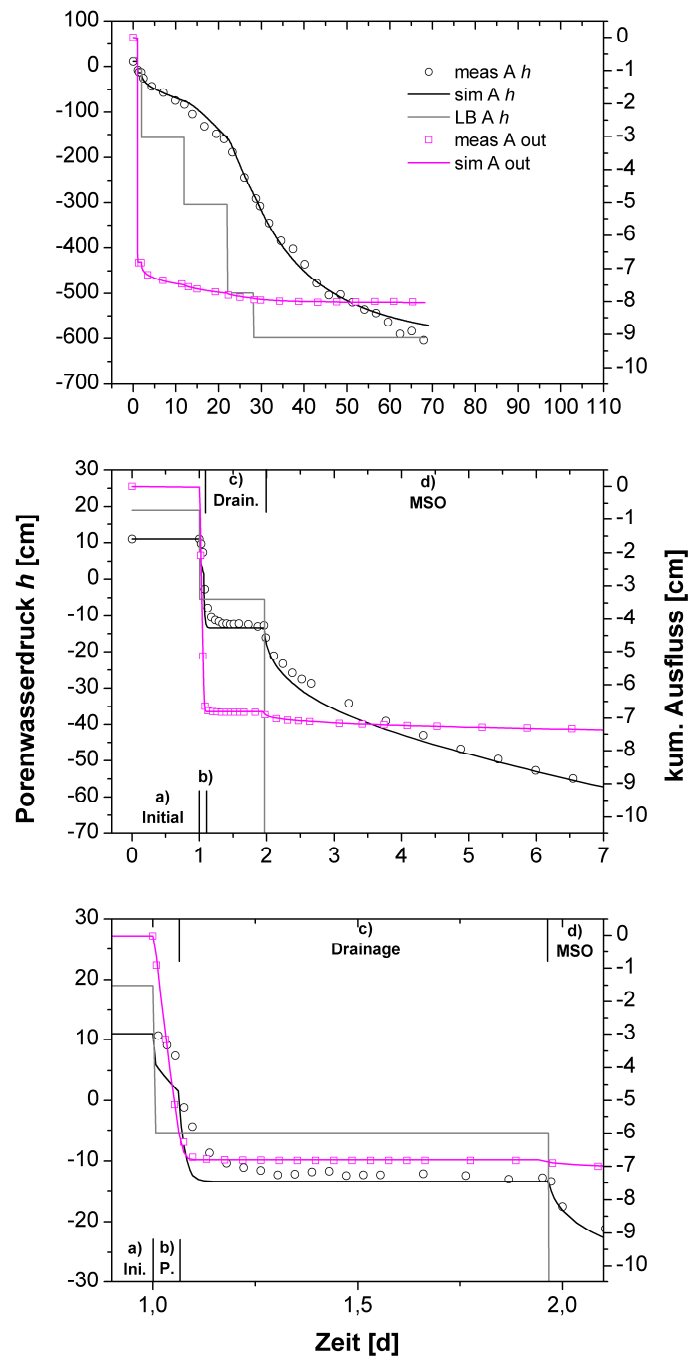


Abb. 2.23: Probe A: gemessene und simulierte Verläufe der Porenwasserdrücke und des kumulativen Ausflusses sowie die unteren Druckrandbedingungen, die während des XMSO-Versuches herrschten.

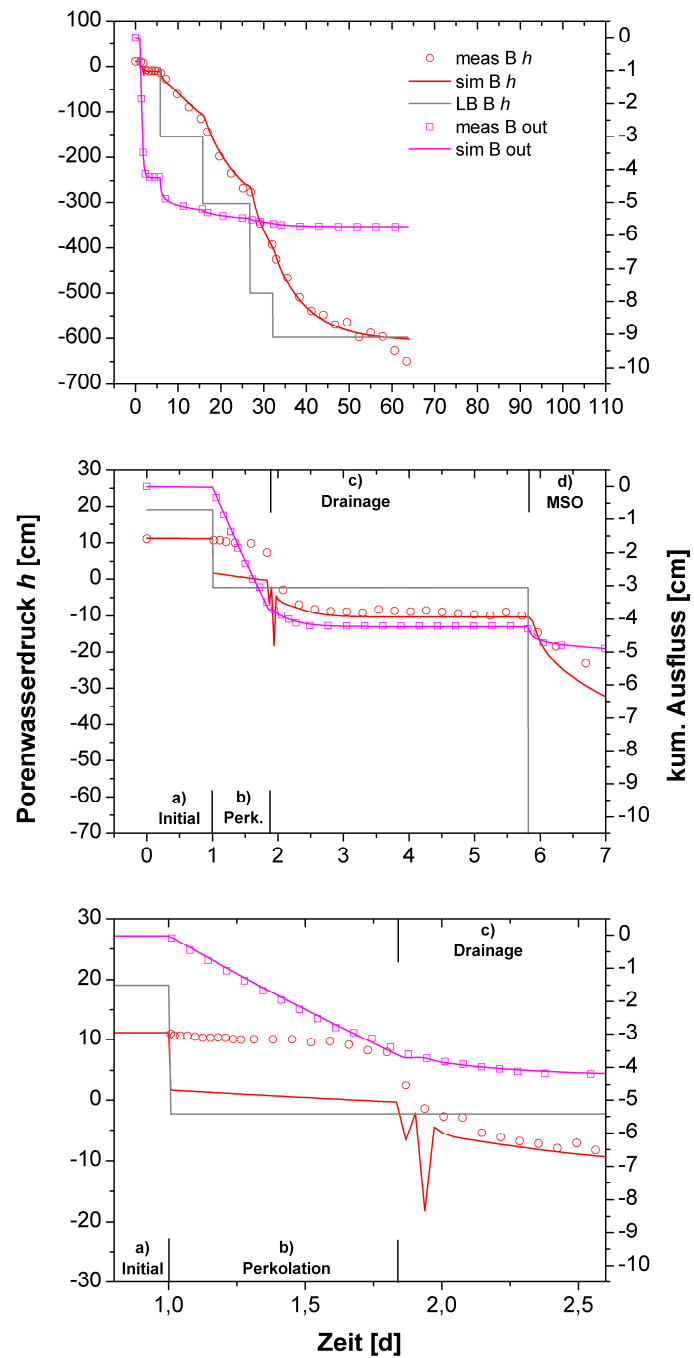


Abb. 2.24: Probe B: gemessene und simulierte Verläufe der Porenwasserdrücke und des kumulativen Ausflusses sowie die unteren Druckrandbedingungen, die während des XMSO-Versuches herrschten.

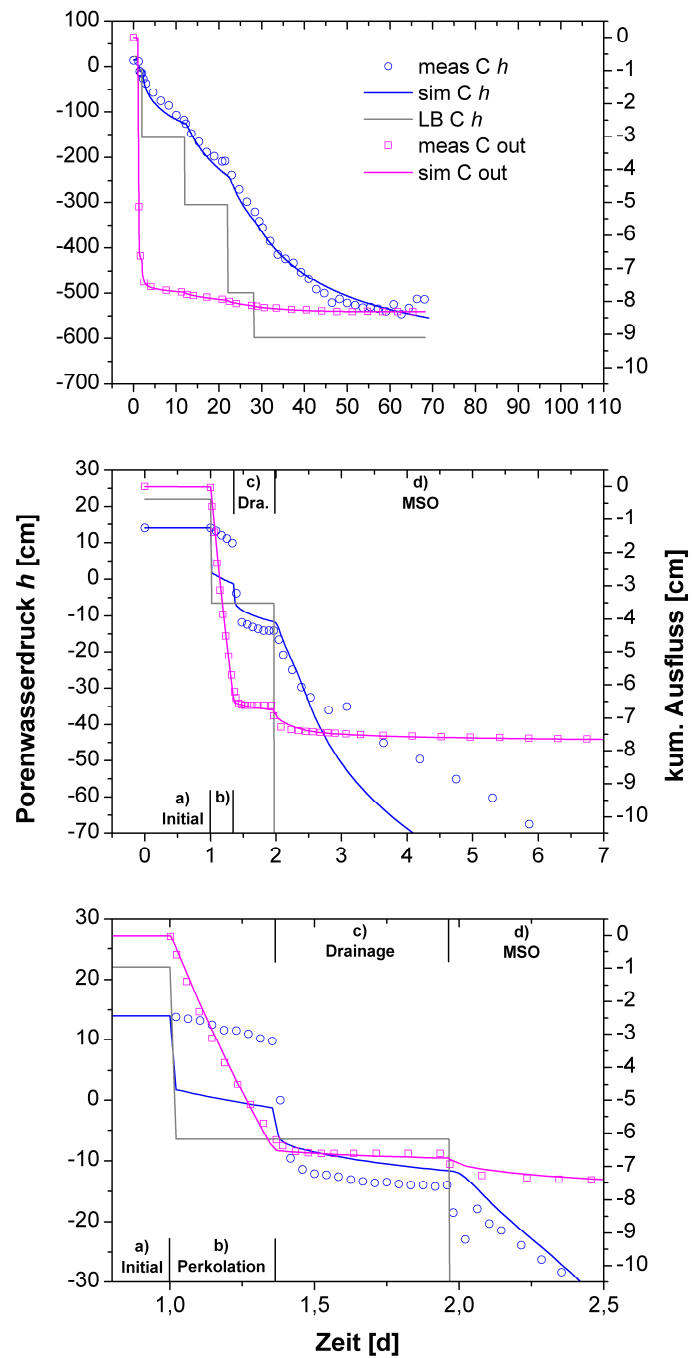


Abb. 2.25: Probe C: gemessene und simulierte Verläufe der Porenwasserdrücke und des kumulativen Ausflusses sowie die unteren Druckrandbedingungen, die während des XMSO-Versuches herrschten.

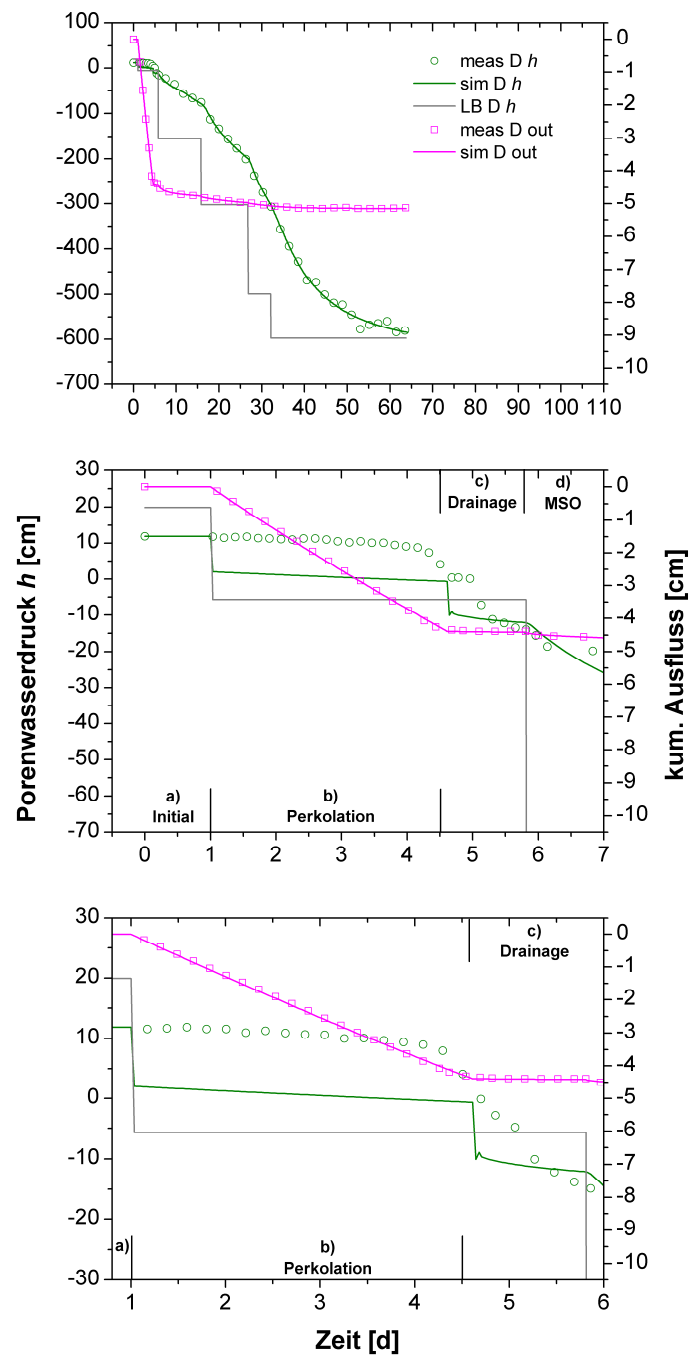


Abb. 2.26: Probe D: gemessene und simulierte Verläufe der Porenwasserdrücke und des kumulativen Ausflusses sowie die unteren Druckrandbedingungen, die während des XMSO-Versuches herrschten.

Die in allen Phasen über den unteren Rand geflossenen Wassermengen sind in Tabelle 2.4 aufgeführt. Unter Berücksichtigung des Porenvolumens (bzw. der Porosität), das auf Grund der gemessenen Lagerungs- und Festsubstanzdichten (nach Abschluss aller Versuche) errechnet wurde, ergab sich ein theoretischer Wert für einen maximalen Sättigungswassergehalt in der Probe. Da die Lagerungs- und Festsubstanzdichten nur an den vier Einzelmodulen A bis D gemessen wurden, wurden für die längeren Module (ABCD, AB und CD) die Kennwerte aus den vier Einzelproben durch Aufsummierung und Mittelung errechnet. Die durch Drainage und MSO-Prozedur den Proben entzogenen Wassermengen lassen sich gut anhand der vier Einzelmodule A bis D vergleichen, da alle vier Module etwa gleich groß sind und der gleichen zeitlichen Abfolge der MSO-Phasen unterworfen waren. Bei Modul A konnte 37% Wasser entzogen werden (bezogen auf den maximalen theoretischen Wassergehalt einer vollständig gesättigten Bodenprobe). Mit Zunahme der Tiefe konnte immer weniger Wasser entzogen werden, bei Modul D waren es 11%. Diese deutliche Abnahme lässt sich zum einen mit der Abnahme des Makroporenanteils erklären (Abnahme der Wassermenge in der Drainagephase von 22% auf 3% von oben A nach unten D). Zum anderen kann die Abnahme der Wasserentnahme aber auch mit der Zunahme der Festsubstanzdichte (vermutlich durch die Zunahme des Tonanteils) und somit einer Zunahme der Fein- und Feinstporen erklärt werden. Diese Poren wurden bei den gewählten Unterdruckstufen von bis zu -600 cm nur teilweise oder nicht zum Entwässern gezwungen und so blieb ein hoher Wasseranteil in der Probe zurück.

Tabelle 2.4: Porositäten für alle Probenlängen und aus diesen abgeleitete maximale Wassergehalte in cm (Eindimensional betrachtet) sowie die Entwässerungsmengen während der X-Phase und der MSO-Phase; Prozentangaben als Anteil in Bezug auf den maximalen Wassergehalt angegeben.

Experiment		Porosität	Wassergehalt									
Nr	Name	n	Maximaler (absoluter)	X-Phase Perkolation (Überstau)	X-Phase Drainage (freier Auslauf)		MSO-Phase		Drainage- und MSO-Phase		im Boden verbliebener	
		[-]	[cm]	[cm]	[cm]	[%]	[cm]	[%]	[cm]	[%]	[cm]	[%]
1	ABCD	0,59	34,19	2,53	0,83	2,4	2,91	8,5	3,74	10,9	30,45	89,1
2	AB	0,57	15,74	6,13	1,44	9,1	2,39	15,2	3,82	24,3	11,92	75,7
3	CD	0,61	18,40	4,05	1,40	7,6	1,37	7,4	2,77	15,1	15,63	84,9
4	A	0,62	7,76	5,13	1,71	22,0	1,19	15,3	2,89	37,3	4,87	62,7
5	B	0,53	7,99	3,48	0,81	10,2	1,45	18,1	2,26	28,3	5,73	71,7
6	C	0,63	9,37	6,31	0,42	4,4	1,59	16,9	2,00	21,4	7,37	78,6
7	D	0,60	9,02	4,15	0,25	2,8	0,74	8,2	0,99	10,9	8,04	89,1

Beim Gesamtmodul ABCD beträgt die anteilige Entwässerungsmenge in der Drainagephase nur 2,4% (bezogen auf den maximal möglichen Wassergehalt der Gesamtprobe). Das heißt, dass hier die untere Schicht der Probe (entsprechend Modul D) vermutlich als Ausflusswiderstand gewirkt hat und sich deshalb eine niedrige Entwässerung ergab. Auch während der MSO-Phase ergab sich bei Gesamtprobe ABCD eine niedrige Entwässerung, was sich einerseits aufgrund der geringdurchlässigen Schicht D ergab und andererseits vermutlich ein Effekt der Probenhöhe ist. Die Probenhöhe führt dazu, dass die Wirkung der Saugkraft ausgehend von dem Saugplattenmodul sich mit Entfernung zu sich selbst stark abschwächt, weil die hydraulische Matrixleitfähigkeit beim lehmigen Material insgesamt als gering angesehen werden kann. Das gleiche gilt für die Module CD und AB mit jeweils niedrigerer Entwässerung als die Entwässerung der jeweiligen Einzelmodule A und B sowie C und D zusammenbetrachtet. Auch hier ist vermutlich der untere Rand der jeweiligen Probe, also Schicht D bei CD und Schicht B bei AB mit jeweils geringerer Durchlässigkeit dominant bzw. limitierend für den Durchfluss.

Bevor die Simulationen mit Free-form durchgeführt wurden, wurden an den in Hydrus aufgesetzten Projekten auch mit Hydrus-1D inverse Anpassungsversuche gestartet. Hierbei wurden der „van Genuchten/Mualem“-Ansatz (van Genuchten, 1980) und der „Durner, dual van Genuchten“-Ansatz (Durner, 1994) zur Beschreibung der bodenhydraulischen Eigenschaften probiert. Bei beiden Ansätzen ergab sich eine gute Übereinstimmung von gemessenem zu invers angepasstem kumulativem Ausfluss, aber keine annähernd gute Übereinstimmung in der Anpassung der Porenwasserdrücke. Daher wurde der Free-form-Ansatz gewählt, weil zu erwarten war, dass damit bessere Anpassungsergebnisse erzielt werden können (wie z.B. die exzellenten Anpassungsergebnisse bei lehmigem Sand bei Schelle et al. (2010)).

In den Abb. 2.20 bis Abb. 2.26 werden die Messergebnisse (Porenwasserdruck und Ausfluss) und die jeweils dazugehörige Free-form-Simulationen so dargestellt, dass sowohl Überblick (X- und MSO-Phase) als auch Detailbetrachtungen (nur X-Phase) über die insgesamt sieben Versuche möglich sind. In der jeweiligen Gesamtbetrachtung der Versuche mit den Zeitdauern von bis zu 100 Tagen zeigt sich eine gute Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Ausflüssen und Porenwasserdrücken. Erst mit der detaillierten Betrachtung von Perkolations- und Drainagephase und dem Beginn der MSO-Phase zeigt sich eine deutliche Nichtübereinstimmung von gemessenen und simulierten Porenwasserdrücken, die Ausflüsse dage-

gen werden auch in diesen Phasen sehr gut simuliert. Auffällig ist, dass sich bei allen Experimenten eine starke Abweichung von gemessenen zu simulierten Porenwasserdrücken zu Beginn der Perkulationsphase ergibt. Mit Beginn der Perkulation sinken die gemessenen Porenwasserdrücke bei fast allen Proben langsam ab, bei ABCD und AB dagegen sinken die Drücke schlagartiger ab. Die simulierten Porenwasserdrücke dagegen zeigen in den ersten Minuten der Perkulationsphase immer eine schlagartige Abnahme. Diese Abnahme beträgt bei den Einzelmodulen A bis D bis zu 10 cm, bei Modul AB um bis zu 15 cm und bei Modul ABCD je nach Tensiometer um 2 cm bis 44 cm. Weiterhin auffällig ist, dass nach der simulierten Druckabnahme in den ersten Minuten der Perkulationsphase die Drücke teilweise bei der Simulation mit fast gleicher Steigung abnehmen wie bei den gemessenen Druckabnahmen; bloß mit dem Unterschied, dass sich die simulierten Drücke auf einem niedrigerem Niveau befinden, quasi parallel mit dem Abstand entsprechend dem anfänglichen schlagartigen Druckabfall (siehe hierzu z.B. Abb. 2.25 „meas C h“ vs. „sim C h“).

Zusammengefasst zeigt sich bei allen Versuchen, dass erst mit Beginn der MSO-Phase die an den Tensiometern erfassten Porenwasserdrücke (ca. im Bereich < -20 cm) gut simuliert werden konnten, während in der X-Phase zuvor, insbesondere in dem Perkulationsabschnitt, das Druckgeschehen nicht wiedergegeben werden konnte. Die Nichtübereinstimmung steht vermutlich im Zusammenhang mit den vorhandenen Makroporen. Grundsätzlich ist die Simulation darauf ausgelegt, die Fließprozesse in homogenen porösen Medien zu erfassen. Makroporen konnten nicht explizit berücksichtigt werden, weil es sich um eine eindimensionale Simulation handelt. Also funktioniert die Simulation gut, wenn die reine Bodenmatrix betrachtet wird, bei der ein annähernd gleichförmiges Porensystem angenommen werden kann und wenn eine vermutlich vorhandene Porenraumheterogenität im Bodenprofil vernachlässigt wird. Dieser Sachverhalt wird in den hier gezeigten Versuchen dadurch bestätigt, dass sich nach Entleerung der Makroporen zum Ende der Drainagephase die Porenwasserdrücke simulieren lassen, sobald nur noch Wasser in der (mehr homogenen) Matrix vorhanden ist.

In der Drainagephase hingegen ergibt sich die Situation, dass Makroporen schnell entleert werden können und Ausfluss am unteren Rand generiert wird. Gleichzeitig kann aber bei niedrigem „Wasserstand“ in einer Makropore oder bei leerer Makropore an einem Tensiometermesspunkt, z.B. einige Zentimeter entfernt von einer Makropore, noch eine sehr hohe Sättigung vorliegen, die aufgrund der geringeren hydraulischen Durchlässigkeit in der Matrix

erst langsamer abnimmt. Grundsätzlich kann man sich hier vorstellen, dass die Sättigung in der Matrix gegenüber der Makropore in der Drainagephase verzögert abnimmt. Die langsamen Wasserbewegungen in der Matrix sind dann sowohl vertikal als auch teilweise lateral zum absinkenden Makroporenwasserspiegel hin ausgerichtet. Bildlich gesehen kann man sich die Wasserverteilung in der Umgebung einer vertikalen Makropore ähnlich einem kleinen Grundwasserabsenkungstrichter (wie z.B. bei einem Brunnen-Pumpversuch) vorstellen. Und je nach dem, wie weit entfernt ein Tensiometermesspunkt von der Makropore ist, erfasst er unterschiedliche Drücke im gleichen Tiefenniveau. Nah an der Makropore sind etwas trockenere Verhältnisse (niedrigere Porenwasserdrücke) zu erwarten, entfernter der Makropore etwas feuchtere Verhältnisse (hohe Porenwasserdrücke). Das heißt, in solchen zeitlichen Versuchsabschnitten kann keine eindeutige Druck-Sättigungsbeziehung für die jeweilige Tiefe bzw. für die Gesamtbodenprobe hergestellt werden. Zusätzlich sind aber hingegen in der Drainagephase Effekte auf die Entwässerung der Makroporen durch die Saugplatte am unteren Rand vorhanden, wie z.B. ein kurzzeitiger Wasseraufstau auf der Platte, wenn diese einen Fließwiderstand erzeugt. Dieser Effekt des Fließwiderstandes würde somit den zuvor beschriebenen Einfluss eines absinkenden Makroporenwasserspiegels auf die Tensiometermessungen wieder abschwächen.

2.3.2.2 Gesättigte hydraulische Durchlässigkeit

Entsprechend den Nichtübereinstimmungen von Messung und Simulation der Porenwasserdrücke in der Perkolations- und Drainagephase ergab sich auch eine geringe Güte der mit Free-form geschätzten bodenhydraulischen Eigenschaften bei Wassersättigung und in Bereichen nahe Sättigung. Insbesondere die geschätzten K_s -Werte sind unsicher.

Deshalb wurden zum Vergleich in einem weiteren Ansatz die gesättigten hydraulischen Durchlässigkeiten ermittelt, indem die Perkolationsphase mit dem sinkenden Überstau als „Falling Head“-Versuch nach Kutilek und Nielsen (1994) ausgewertet wurde. Bei der „Falling Head“-Auswertung der Experimente ergibt sich eine effektive hydraulische Durchlässigkeit K_{eff} , die anteilig die Durchlässigkeit des Bodens K_s und der Platte K_{platte} beinhaltet. Für die Auswertung wurde K_{platte} analytisch ermittelt. Hierbei wurde aus den Messwerten für den Porenwasserdruck der Tensiometer und dem Druck am unteren Rand der Druckunterschied Plattenoberseite zu Plattenunterseite während der Perkolationsphase ermittelt. Unter Hinzu-

nahme des Ausflusses im gleichen Zeitabschnitt konnte für eine fiktive Plattendicke von 0,5 cm (wie bei den Hydrus/Free-form Simulationen verwendet) K_{platte} bestimmt werden. Unter Herausrechnung der Plattendurchlässigkeit konnte pro Einzelmodul K_s ermittelt werden. Die so ermittelten tiefenbezogenen Durchlässigkeiten sind in Abb. 2.27 dargestellt und linear verbunden, um anzudeuten, wie die Abnahme der Durchlässigkeiten mit der Tiefe aussehen könnte.

Anhand dieser Tiefenverlaufskurve wurden die mittleren Durchlässigkeiten für die Abschnitte entsprechend den Einzelmodulen A bis D abgeleitet und sind in Tabelle 2.5 aufgeführt. Im weiteren zeigte sich aber, dass Durchlässigkeitswerte für AB und CD aus entsprechend hintereinander geschalteten Einzel-Widerständen A und B sowie C und D errechnet, nicht der mit beiden Methoden ermittelte Durchlässigkeit entspricht. Allerdings ergibt sich bei gleicher Berechnung aus A, B, C und D zusammengesetzt zu ABCD bessere Übereinstimmung bei beiden Methoden (Werte in Klammern bei ABCD).

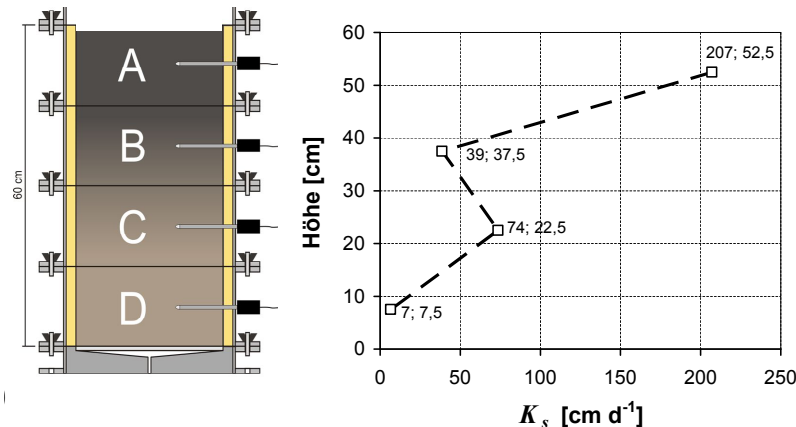


Abb. 2.27: Verteilung der tiefenbezogenen gesättigten Durchlässigkeiten K_s im Bodenprofil einer fiktiv zusammengesetzten Gesamtsäule ABCD, abgeleitet aus der Perkolationsphase während der XMSO Versuche der Einzelmodule A, B, C und D („Falling Head“-Auswertung). Quadrate mit Messwerten entsprechen den ermittelten K_s -Werten in der jeweiligen Modulmitte (Tensiometerpositionen); zusätzlich deutet die gestrichelte Linie eine interpolierte mögliche Verteilung von Durchlässigkeiten im Profil an.

Tabelle 2.5: Aufgeführt sind die K_s -Werte zu allen Modullängen, die mit zwei verschiedenen Methoden ermittelt wurden, sowie aus den Einzelmodulergebnissen (vier Viertelmodule A, B, C und D) fiktiv zusammengesetzten Durchlässigkeiten für ABCD (Werte in Klammern).

Methode:	K_s [cm d ⁻¹]	
	„Free-form“, alle Modulvarianten einzeln	„Falling Head“, alle Modulvarianten einzeln
ABCD	4,2 (2,8)	9,5 (19,4)
AB	105,3	362,0
CD	375,5	397,8
A	120,3	207,0
B	3,7	38,6
C	13,4	73,5
D	1	6,5

In der Tabelle 2.5 sind neben den mit der „Falling Head“-Methode ausgewerteten K_s -Werten auch die aus der „Free-form“-Methode ermittelten aufgelistet. Zum einen lässt sich im Vergleich der K_s -Werte der Einzelmodule erkennen, dass, grob betrachtet, die Durchlässigkeiten von oben nach unten stark abnehmen und in dem obersten Modul A deutlich höhere Durchlässigkeiten festgestellt wurden als in den darunter liegenden Bodenmodulen. Wobei die Abnahme bei Datensatz „Falling Head“ ausgehend von einer höheren hydraulischen Durchlässigkeit als beim „Free-form“-Datensatz beginnt. Zusätzlich zeigte sich das Modul B auffällig mit einer niedrigeren Durchlässigkeit als bei Modul C. Außerdem zeigte sich, dass der K_s -Wert für ein theoretisches Langmodul ABCD aus den wie Widerstände zusammengeführten Durchlässigkeiten der zwei Hälften AB und CD unter Berücksichtigung ihrer Länge nicht mit dem direkt an der ABCD-Probe ermittelten Werten übereinstimmt. Hingegen ergibt sich aber bei gleicher Betrachtung, aus den vier Einzelmodulen A bis D fiktiv zusammengesetzt zu ABCD, bei beiden Methoden eine ähnliche Durchlässigkeit wie die direkt bei ABCD gemessenen (siehe Tabelle 2.5: Werte in Klammern bei ABCD).

Insgesamt lassen sich in einem weiteren Vergleich der hier ermittelten K_s -Werte mit den an der quadratischen Bodensäule (Kapitel 2.3) ermittelten deutliche Unterschiede feststellen zwischen K_s -Werten von bis zu > 1000 cm d⁻¹ für die Gesamtlänge beim Durchflusseexperiment mit der quadratischen Bodensäule und Werten von ca. 4 bis 10 cm d⁻¹ für das Gesamtmodul ABCD beim XMSO-Experiment. Hier wird also auch deutlich, wie stark der Einfluss der

Makroporen auf K_s ist, wenn man nur einige 10er Zentimeter voneinander entfernt Proben nimmt. Die deutlich höhere Durchlässigkeit bei den quadratischen Bodensäulen lässt sich vermutlich auf mehr oder im Bodenprofil durchgängigere Makroporen zurückführen und zeigt, dass mit den Proben, so wie sie hier benutzt werden, kein repräsentatives Elementarvolumen (REV) vorhanden ist und kleinräumig die K_s -Werte aufgrund der Makroporen stark variieren können. Dieses Ergebnis wird auch bestätigt durch Permeameter-Messungen (mit dem Messgerät „Amoozemeter“) im gleichen Hangbereich, bei denen K_s -Werte von 10^{-5} bis 10^{-8} m s^{-1} festgestellt wurden (Wienhöfer et al., 2009). Darüber hinaus könnten neben den Makroporen aber auch die unterschiedlichen Methoden (Konstant-Druck-Durchfluss-Methode bei der quadratischen Bodensäule im Vergleich zu XMSO-Methode mit den zwei verschiedenen Auswertmethoden bei der zylindrischer Bodensäule) eine Ursache dafür sein, dass unterschiedliche Durchlässigkeiten ermittelt wurden. Vorhandene Randläufigkeiten bei den quadratischen Bodensäulen sind darüber hinaus nicht auszuschließen und könnten auch Ursache für die bis zu zwei Größenordnungen höher liegenden Durchlässigkeiten bei der quadratischen Bodensäule sein.

2.3.2.3 Retentions- und Durchlässigkeitskurven

Die auf Basis der Free-form-Simulation ermittelten bodenhydraulischen Eigenschaften sind in den Abb. 2.28 und Abb. 2.29 dargestellt. In Abb. 2.28 sind die Retentions- und Durchlässigkeitskurven für jede Probenlänge einzeln dargestellt. Der Achsenabschnitt für die hydraulische Durchlässigkeit K ist mit Werten bis $3,5 \text{ cm d}^{-1}$ so gewählt, dass von den K -Kurven Abschnitte zu sehen sind, bei denen Wassergehaltsänderungen auch zu deutlichen Durchlässigkeitsveränderungen führen (Bereich zwischen 0 und 1 cm d^{-1}). Für die Abschnitte $> 3,5 \text{ cm d}^{-1}$ sind die K -Kurven nicht dargestellt, können aber gedanklich extrapoliert werden, wenn man die K_s -Werte aus Tabelle 2.5 hinzuzieht und diese dann auf den Punkt mit maximalem Wassergehalt fixiert (max. Wassergehalt jeweils bei Beginn der Retentionskurve).

Bei allen K -Kurven ist deutlich ein Scheitelpunkt zu sehen zwischen dem Bereich, bei dem geringe Wassergehaltsabnahme zu starker Durchlässigkeitsabnahme führt (ausgehend von hoher Sättigung), und dem Bereich (mit weiterer Entsättigung), bei dem große Wassergehaltsabnahme zu geringer Durchlässigkeitsabnahme führt.

Bei Probe AB beispielhaft nimmt der Wassergehalt von ca. 0,57 auf 0,5 ab, wobei gleichzeitig die Durchlässigkeit von ca. 105 (K_s Free-form) auf $0,2 \text{ cm d}^{-1}$ abnimmt (Bereich rechts vom Scheitelpunkt); und im weiteren Verlauf nimmt der Wassergehalt von ca. 0,5 auf nahe 0,4 ab, wobei gleichzeitig die Durchlässigkeit von ca. 0,2 auf nahe $0,0 \text{ cm d}^{-1}$ abnimmt (Bereich links vom Scheitelpunkt). Mit Werten $< 1 \text{ cm d}^{-1}$ fällt die Durchlässigkeit in den Bereich von $< 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ und entspricht somit einer sehr geringen Durchlässigkeit.

Zum Wassergehalt am Scheitelpunkt der K -Kurven aller Proben kann der Porenwasserdruck an der jeweils dazugehörigen h -Kurve abgelesen werden und dieser liegt überwiegend bei ca. -25 cm. Einem Porenwasserdruck von -25 cm kann ein Äquivalentporendurchmesser im Bereich „weiter Grobporen“ (ca. $50 \mu\text{m}$ und größer) zugeordnet werden. Bei Probe B und C kann zusätzlich ein deutlicher Scheitelpunkt der K -Kurve nahe dem maximalen Wassergehalt festgestellt werden (Porenwasserdrücke im Bereich von -5 cm). Bei Betrachtung der Durchlässigkeiten $< 0,01 \text{ cm d}^{-1}$ (siehe Abb. 2.29 rechts unten) kann bei den meisten K -Kurven ein weiterer Scheitelpunkt zugeordnet werden, bei dem die Porenwasserdrücke im Bereich von -100 cm liegen. Einem Porenwasserdruck von -100 cm kann ein Äquivalentporendurchmesser im Bereich „enger Grobporen“ (50 bis $10 \mu\text{m}$) zugeordnet werden. Insgesamt werden die Scheitelpunkte so interpretiert, dass zu jedem Scheitelpunkt in der Porengrößenverteilung der jeweiligen Probe eine Porenanteilveränderung vorhanden sein muss entsprechend Bereichen der Kornsummenkurve bei denen eine Kornfraktion bzw. ein Porengrößenbereich anteilig nur gering vorhanden ist. Das heißt, dass es mehr und weniger stark Durchflusswirksame Porenbereiche gibt und somit der Volumenstrom und das potentielle Durchflussvermögen dadurch bestimmt werden und hoch ist in dominanten Porengrößenbereichen. So sind die Scheitelpunkte nahe Sättigung bei bis zu -25 cm Porenwasserdruck der Grenze zwischen Makroporen und weiten Grobporen zuzuordnen und der Scheitelpunkt bei -100 cm Porenwasserdruck der Grenze zwischen weiten zu engen Grobporen zuzuordnen. Letztere Grenze bildet auch in etwa die Grenze zwischen Sickerwasser und Haftwasser. Insgesamt können die Proben teilweise sich hydraulisch als bimodal verhaltend beschrieben werden, was besonders deutlich wird bei der Betrachtung der logarithmisch aufgetragenen h - und K -Kurven in Abb. 2.29.

Ausgehend von dem Gedanken, dass eine längere Probe, z.B. Probe CD, hydraulische Eigenschaften besitzt, die sich aus den einzelnen Eigenschaften der Proben C und D zusammensetzt, ist dieser Zusammenhang in Abb. 2.29 bei den linear aufgetragenen Retentionskurven

(oben links) vereinfacht zu sehen. Ausgehend von Sättigung nimmt mit Wassergehaltsabnahme von ca. 0,60 nach 0,56 die Kurve für Probe D einen steilen, fast senkrechten Verlauf hin zu niedrigen Porenwasserdrücken. Bei Probe C nimmt der Wassergehalt von ca. 0,63 bis ca. 0,55 mit geringer Druckabnahme ab, bis die Kurve auch einen steilen Verlauf nimmt hin zu niedrigeren Porenwasserdrücken, der aber nicht so steil wie bei Probe D ist. Bei Betrachtung der h -Kurve für Probe CD ist zu erkennen, dass diese weitgehend recht genau zwischen den Kurven für Probe D und C verläuft, besonders deutlich wird dies im Bereich < -200 cm Porenwasserdruck. Die Kurve für CD bildet quasi eine Mittelwertelinie aus den Kurven zu D und C. Im Bereich von -50 cm bis ca. -500 cm ist die Kurve AB entsprechend der vorhergegangenen Betrachtungsweise auch eine quasi Mittellinie zwischen den h -Kurven der Proben A und B. Bei Betrachtung der h -Kurve zu ABCD ist deren Verlauf auch als Mittelwert über alle in den Einzelmodulen vorhandenen hydraulischen Eigenschaften zu interpretieren, wobei hier deutlich wird, dass die hydraulisch „langsameren“ Proben C und D dominierend sind für die hydraulischen Eigenschaften von ABCD im Bereich hoher Sättigung. Das gleiche Betrachtungsmuster wie für die h -Kurven lässt sich auch auf die K -Kurven anwenden. Allerdings spiegelt sich hier wider, dass die Durchlässigkeit der jeweils längeren Probe mehr durch die Durchlässigkeitseigenschaften der jeweils unteren Bereiche der kürzeren Teilproben bestimmt wird. So zeigt sich, dass die Gesamtdurchlässigkeit der Probe ABCD deutlich näher an den Durchlässigkeiten der Proben CD, C und D liegt als an den Durchlässigkeiten von AB und B.

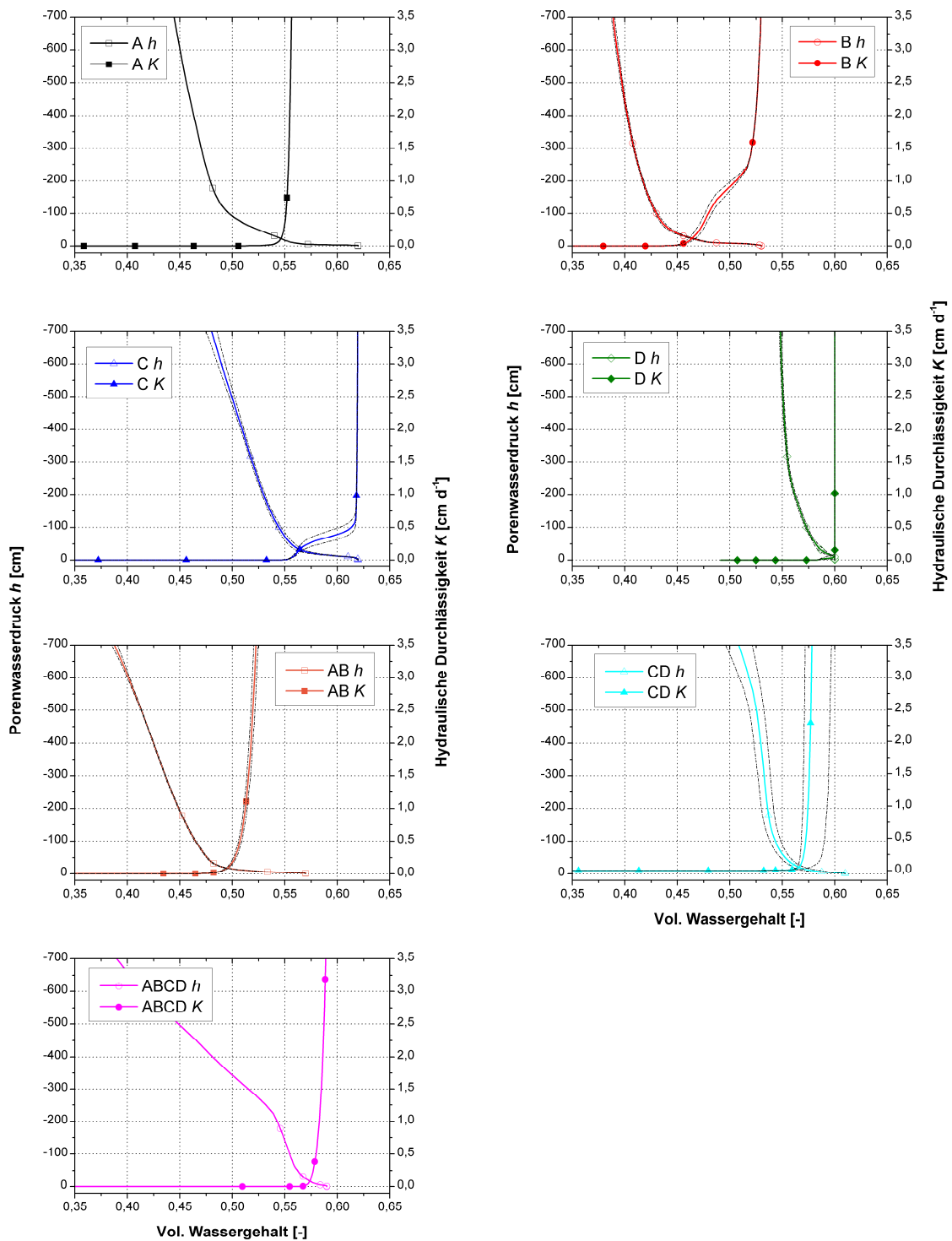


Abb. 2.28: Mit Free-form ermittelte Retentions- und Durchlässigkeitskurven für alle Probenlängen, dargestellt mit 95% - Konfidenzintervallen (fehlen bei A und bei ABCD).

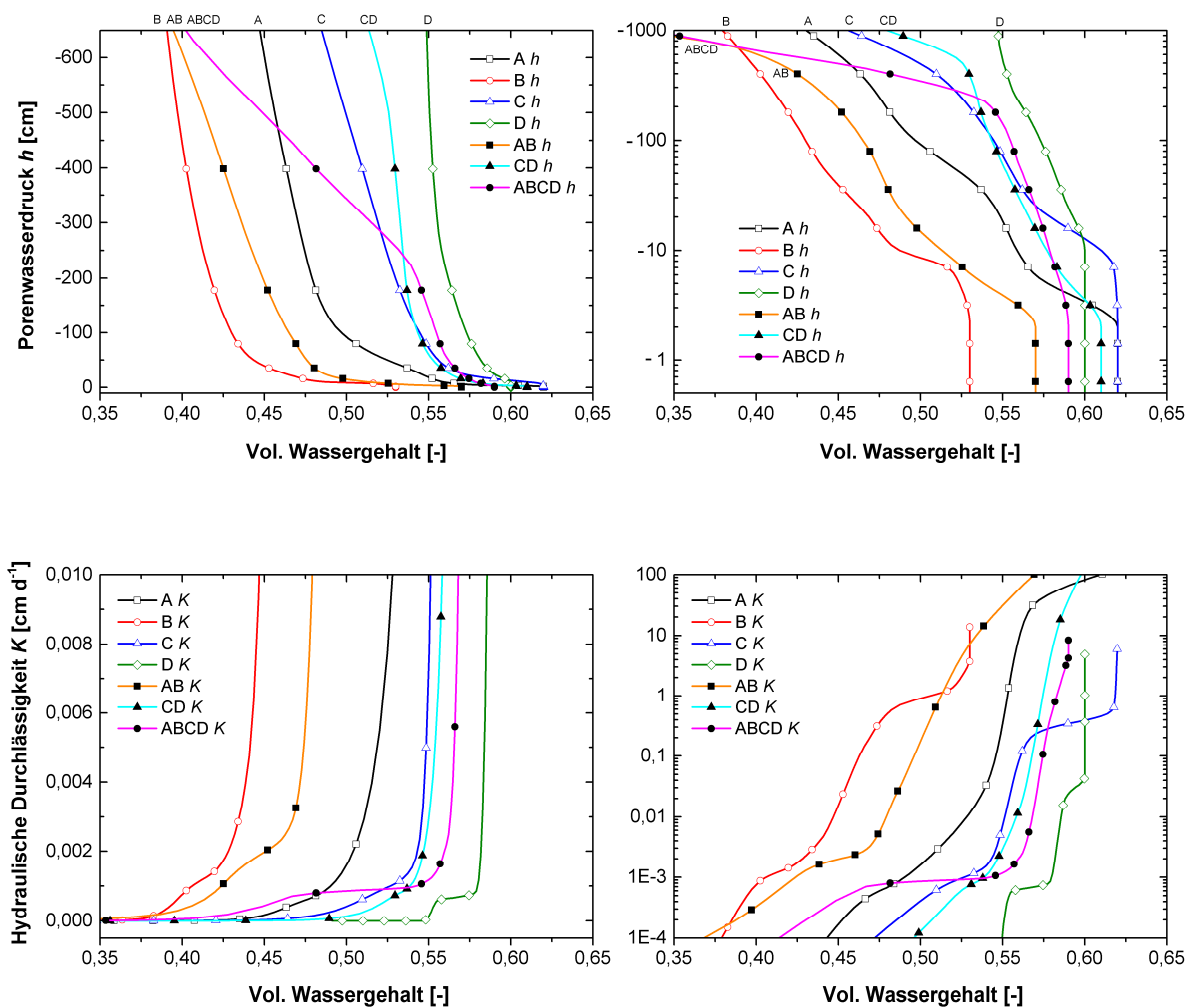


Abb. 2.29: Invers mit Free-form ermittelte Retentionskurven (oben) und Durchlässigkeitskurven (unten) für alle Probenlängen in der Zusammenschau; auf Basis der mit der XMSO-Methode durchgeführten Bodensäulenexperimente; die Symbole an den Linien sind Markierungen zur Unterscheidung der Diagrammkurven, entsprechen aber auch Datenpunkten der Simulation, wobei insgesamt aber mehr Datenpunkte vorhanden waren, aber für eine besseren Übersichtlichkeit nur ausgedünnt gezeigt sind.

2.3.3 Evaporationsexperimente an Bodensäulenteilstücken

Bei der Versuchsdurchführung ergaben sich vier wesentliche Phasen: a) die Evaporation des Überstaus, b) die Evaporation von Bodenwasser aus der Bodenprobe heraus mit funktionstüchtigen Tensiometern, c) die Evaporation von Bodenwasser aus der Bodenprobe heraus ohne funktionstüchtige Tensiometer bis zum Ende des Versuchs und d) Ofentrocknung der Probe nach Ende des Versuchs, um den in der Probe verbliebenen Wassergehalt festzustellen. Während der Versuchsdauer von ca. 35 Tagen trocknete die Probe stark aus. In den letzten ca. zehn Tagen zeigten sich deutlich Schrumpfungsrisse und eine sich insgesamt verkleinernde Probe (siehe 34. Tag in Abb. 2.30).

Entwicklung der Porenwasserdrücke, errechnete Evaporationsraten und kumulative Evaporationsmenge sind für die vier Versuchsdurchführungen an den vier Modulen A bis D in Abb. 2.32 dargestellt. Hierbei entspricht der Zeitpunkt Null dem Beginn der Phase b, das heißt dem Moment, ab dem kein Überstau mehr vorhanden war und maximale Sättigung der Probe angenommen wurde. Die Tensiometer wurden zu Beginn der Überstauphase „Nullpunkt-kalibriert“, indem die Überstauhöhe über der Probenoberfläche mittels Lineal gemessen wurde und somit der Wassersäulendruck oberhalb des jeweiligen Tensiometers aus Addierung von Einbautiefe und Überstauhöhe sehr genau bestimmt werden konnte. Der Zeitpunkt Null wurde anhand der Tensiometermessungen festgelegt, indem der Zeitpunkt abgegriffen wurde, zu dem die positive Porenwasserdruckmessung (= Wassersäule) mit der Einbautiefe des jeweiligen Tensiometers übereinstimmte und somit Wasserspiegel und Probenoberfläche gleich waren (siehe Abb. 2.31).

Die Durchführung der Evaporationsversuche mit einem Überstau ist als erweiterte Evaporationsmethode anzusehen und kann als XEVA-Methode bezeichnet werden, wobei das X vom englischen „extended“ für „erweitert“ hergeleitet ist. Sie bringt den Vorteil mit sich, dass die Tensiometer genau kalibriert werden können. Ähnlich wie bei der XMSO-Methode ergibt sich zusätzlich der Vorteil, dass der Zeitpunkt vollständiger Probenentsättigung sehr genau bestimmt werden kann, weil die Tensiometermessungen zum Moment des Wechsels von Überstau über Vollsättigung hin zum Beginn der Probenentsättigung eine deutliche Veränderung anzeigen. Die Veränderung zeigte sich in den hier durchgeführten Versuchen darin, dass während der Evaporation des Überstaus der positive Porenwasserdruck langsam abnahm und mit Verschwinden des Überstaus sich eine schnelle Abnahme hin zu negativen Porenwasserdrü-

cken ergab (siehe beispielhaft den Porenwasserdruckverlauf bei Probe A in Abb. 2.31). Das Verhalten der Porenwasserdrücke wird so interpretiert, dass die Evaporation während des Überstaus einer Evaporation aus einer Schale heraus entspricht und lediglich durch die klimatischen Bedingungen gesteuert wird und somit die Tensiometer nur die Wasserspiegelabnahme registrieren. Sobald aber der Überstau weg ist, wird das wassergefüllte Porennetzwerk der Probe Teil des Evaporationsgeschehens. Neben den klimatischen Randbedingungen spielen jetzt insbesondere Porengrößenverteilung, Porenverbundenheit, Probtiefe und Beschaffenheit der Probenoberfläche eine entscheidende Rolle. Die Evaporation wirkt in das wassergefüllte Porensystem hinein und somit werden die Kapillarkräfte beeinflusst, was sich hier auch in den tieferen Tensiometermesspunkten in den negativ werdenden Porenwasserdruckmessungen widerspiegelt.

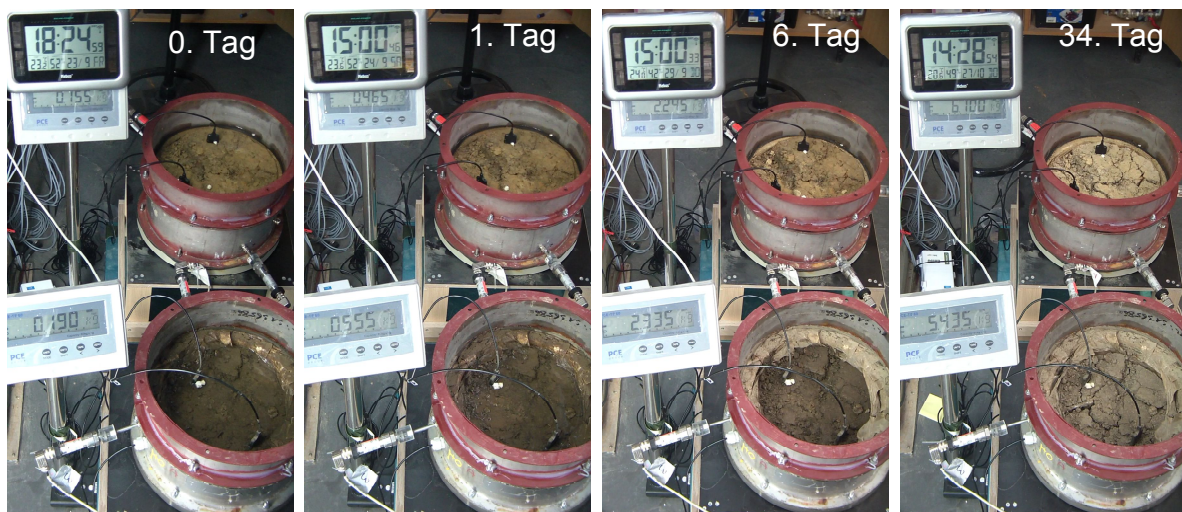


Abb. 2.30: Visuelle Zustände, die die Entwicklung der Austrocknung der Modulproben A (vorne) und C (hinten) von Anfang bis Ende des Evaporationsversuches zeigen; Durchmesser eines Moduls ca. 30 cm.

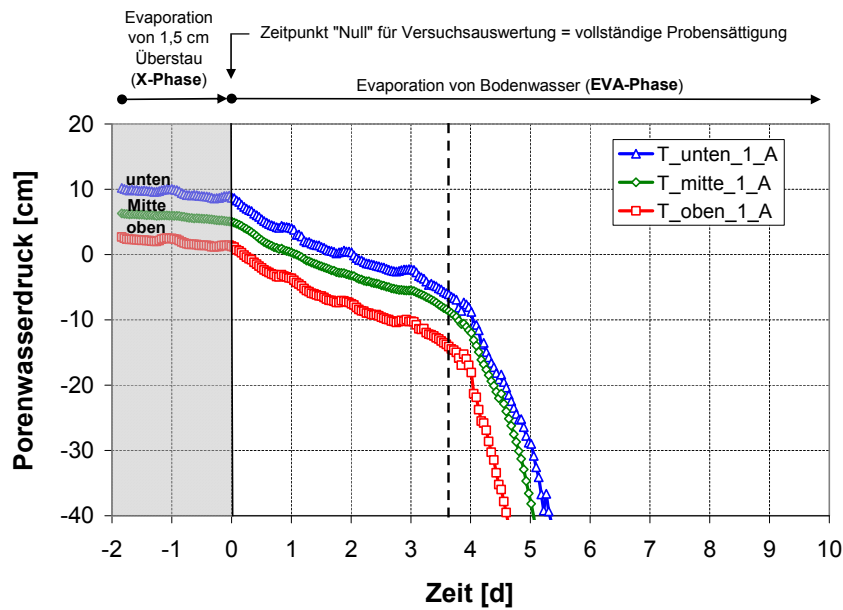


Abb. 2.31: Porenwasserdruckverläufe (Tensiometermessergebnisse) in drei Tiefen bei der Durchführung eines erweiterten Evaporationsversuches mit Überstau (XEVA-Methode), beispielhaft für die Modulprobe A.

Bei allen Versuchen konnte eine Porenwasserdruckmessung bis zu Porenwasserdrücken von -600 cm bis maximal -900 cm durchgeführt werden. Die stärksten negativen Porenwasserdruckmessungen konnten bis zu dem Zeitpunkt stattfinden, bei dem das Tensiometer seinem Prinzip nach funktionierte. Ein Tensiometer ist funktionstüchtig, solange negativer Druckübertrag über den wassergefüllten Schaft zum Druckaufnehmer über die komplett gesättigte Tensiometerkeramik durch Anstreben eines Kapillardruckgleichgewichts zwischen Keramik und umgebendem porösem Medium stattfinden kann. Mit weiter fortschreitender Austrocknung der Probe veränderte sich das Wasser im Tensiometer aufgrund von starken Unterdrücken und es begann zu „kochen“ und das Wasser lief in das umgebende poröse Medium aus, was sich in unregelmäßigen Druckmessungen bei leicht zunehmendem Druck zeigte. Nach der „Auslaufphase“ wurden dann Drücke um 0 cm gemessen, weil Luft durch die keramische Tensiometerspitze gelangte. Luft trat in den wassergefüllten Innenraum von Keramik und Schaft ein, wenn der Lufteintrittspunkt des keramischen Materials erreicht wurde oder Undichtigkeiten am Tensiometer vorhanden waren. Abschnitte mit nicht mehr funktionstüchtigem Tensiometer sind in Abb. 2.32 mit durchgehender dünner Linie dargestellt. Für die Auswertung der Versuche und zur Berechnung von Retention und hydraulischer Durchlässigkeit

wurden aus den zwei Tensiometern je Tiefe (bei den Proben B,C,D) die Messungen ausgewählt, die am längsten und am stärksten negative realistische Porenwasserdruckwerte lieferten. Bei Probe A wurden zur Auswertung das untere und mittlere Tensiometer herangezogen und, aufgrund der etwas kürzeren Probenhöhe von Modul A, wurde der Porenwasserdruck in der mittleren Probenhöhe von 6,25 cm durch Interpolation ermittelt, um die Retentionskurve bezogen auf den Mittelpunkt der Probe darstellen zu können. Im Durchschnitt konnten für alle Proben nur die ersten ca. fünf Tage der Tensiometermessungen für die Auswertung herangezogen werden, bis die jeweils höher in der Probe installierten Tensiometer (T_oben) keine sinnvollen Messwerte mehr lieferten.

Die kumulative Wasserevaporation erreichte bei den bis zu 15 cm hohen Proben bis zum Ende der Phase c (Versuchsende nach ca. 35 Tagen) ca. 6 bis 8,5 cm (Wassersäule eindimensional), was einen Anteil von ca. 67% bis 94% des theoretisch errechneten maximalen Wassergehalts ausmachte (siehe Tabelle 2.6).

Die Evaporation unterlag starken Temperatur-, Luftfeuchte- und Druck-Tagesschwankungen, was sich in den stark schwankenden Evaporationsraten zeigt (siehe Abb. 2.32). Die Evaporationsrate ist bei allen Versuchen zu Versuchsbeginn hoch (in einem Bereich von ca. $0,5 \text{ cm d}^{-1}$ und höher), fällt dann langsam innerhalb der ersten 5 bis 10 Tage in einen Bereich von ca. $0,2$ bis $0,1 \text{ cm d}^{-1}$ und ist für ca. 10 bis 15 Tage in der Mitte des Versuchslaufs nur leicht fallend. Schließlich fällt die Evaporationsrate ab ca. dem 25. Tag der Versuchsdauer in einen Bereich von Evaporationsraten $< 0,1 \text{ cm d}^{-1}$ (deutlich zu erkennen bei Probe D). Zur besseren Vergleichbarkeit der Module sind in Abb. 2.33 die mittleren Evaporationsraten und die kumulative Evaporation der vier Module in einem Diagramm zusammengefasst.

Die Gesamtevaporationsmenge war bei Modul D am höchsten. Unter der Annahme, dass die Evaporation aus „feinem“ Material heraus schneller ist als aus „grobem“ Material, kann bei Modul D der hohe Tonanteil und daraus resultierend entsprechend mehr Feinstporen die höhere Evaporationsmenge erklären.

Zusätzlich wurde für alle Proben eine Massenbilanz aufgestellt und es ergaben sich Abweichungen vom theoretisch errechneten maximalen Wassergehaltes zum Wassergehalt aus der Summe von Evaporation und Ofentrocknung von +7% bis -6%. Damit bleiben die Abweichungen in einem vertretbaren Rahmen.

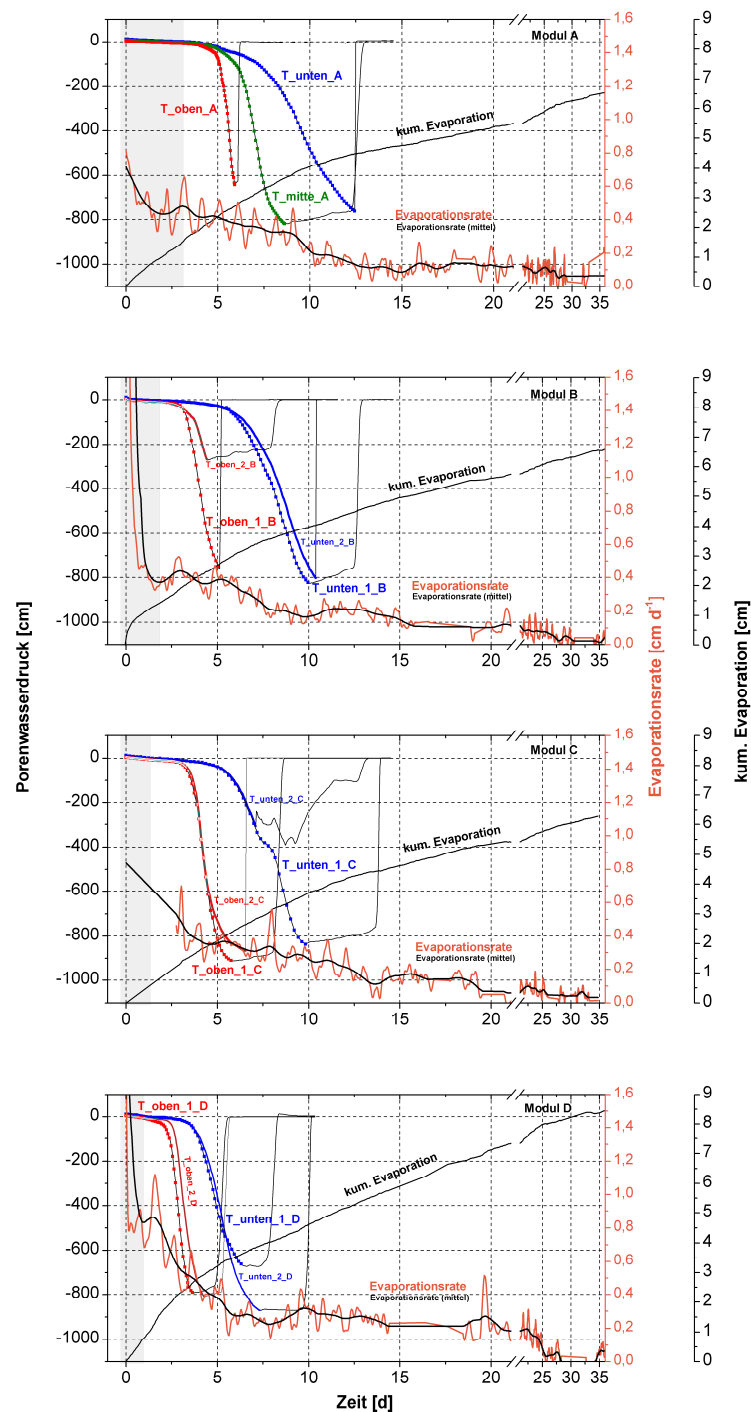


Abb. 2.32: Verlauf von Porenwasserdrücken, Evaporationsrate und kumulativer Evaporation in den ersten 35 Tagen der Versuchsdurchführung; bei den Modulen B, C und D waren in den zwei Tiefen unten und oben je zwei Tensiometer installiert (z.B. T_{oben_1} und T_{oben_2}), bei Modul A war je ein Tensiometer in den Tiefen unten, mitte und oben installiert; der tatsächliche Messverlauf der Tensiometermessungen ist für jedes Tensiometer mit feiner, schwarzer durchgehender Linie dargestellt, die zeitlichen Abschnitte mit sinnvollen Porenwasserdruckmessungen, die zur Auswertung herangezogen wurden, sind mit Symbolen und/oder farbiger dargestellt; der Zeitpunkt Null entspricht dem Moment, in dem sich kein Wasserüberstau mehr über der Probe befindet (Null = Beginn der Phase b), grau hinterlegt Phase b1-Abschnitte; Anmerkung: Evaporationsraten bei Modul B und D im Bereich Tag 15 bis 17 interpoliert aufgrund von Datenausfall.

Tabelle 2.6: Wassergehaltsverluste aus den Modulproben in den aufeinanderfolgenden Phasen b, c und d während der Evaporationsexperimente und Abschätzung des Makroporenvolumenanteils am Gesamtporenvolumen durch Unterteilung der Phase b in b1 (Evaporation aus Bodenmakroporen heraus) und b2 (Evaporation aus Bodenmatrix heraus); Prozentangaben als Anteil vom maximalen Wassergehalt.

Probe	Wassergehalt	Wassergehaltsverluste												
		Phase b und c				Phase d		Phase b1				Phase b, c und d		
	Maximal	Evaporationsanteil			Rest-Matrixanteil		Makroporenanteil				Gesamt			
Anmerk.:	abgeleitet von Porosität	gesamte Versuchsdauer (Makroporenanteil (b1) und Matrixanteil (b2 und c) zusammen)			Ofentrocknung		Handauswahl				Bilanz, ausgehend von maximalem Wassergehalt			
Name	[cm ³ cm ⁻³]	Tage	[cm ³ cm ⁻³]	[%]	[cm ³ cm ⁻³]	[%]	[cm ³ cm ⁻³]	[%]	[cm ³ cm ⁻³]	[%]	[cm ³ cm ⁻³]	[%]	Abweichung	[%]
A	0,621	35,8	0,52	84,3	0,10	16,2	0,176	28,3	0,151	24,3	0,62	100,5	0,5	
B	0,533	38,7	0,45	84,8	0,10	18,7	0,118	22,1	0,083	15,6	0,55	103,4	3,4	
C	0,628	34,7	0,42	66,9	0,17	27,5	0,078	12,4	0,078	12,4	0,59	94,4	-5,6	
D	0,601	37,4	0,57	94,4	0,07	12,4	0,088	14,6	0,061	10,2	0,64	106,8	6,8	

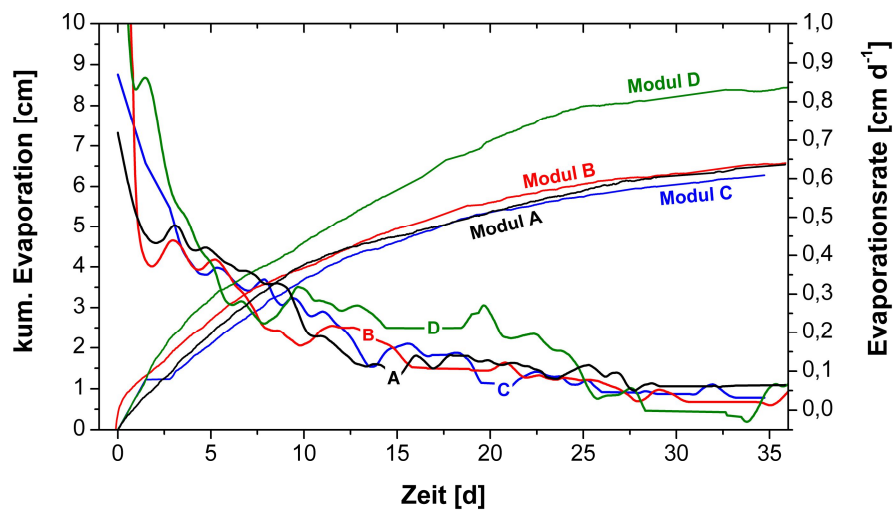


Abb. 2.33: Die Verläufe der mittleren Evaporationsraten und der kumulativen Evaporation der vier Module über die Zeit in einem Vergleichs-Diagramm zusammengefasst.

In einem weiteren Schritt wurden die Retentions- und Durchlässigkeitskurven für die Proben auf Basis der einzelnen Messwertepaare ermittelt. Sie sind in Abb. 2.34 dargestellt.

Mit der Evaporationsmethode ist es nicht möglich, hydraulische Durchlässigkeiten bei Wassersättigung und nahe Sättigung zu ermitteln. Das liegt daran, dass der potentielle Wasserfluss auf Basis des K_s -Wertes bei hohen Durchlässigkeiten insbesondere bei gesättigten Verhältnissen in den meisten Fällen größer ist als der Wasserfluss, der potentiell über den Evaporationsmechanismus unter „natürlichen“ Bedingungen aus einem Boden heraus abtransportiert werden könnte ($q_{Ks} > q_{eva\ pot}$). Es kann aber auch sein, dass bei hoher Probensättigung bei einer Probe mit geringer oder mittlerer hydraulischer Durchlässigkeit $q_{eva} \approx q_{eva\ pot}$ ist. Dieses aber nur zu Beginn der Evaporation, denn mit zunehmender Entsättigung der Probe wird $q_{eva} \ll q_{eva\ pot}$. Zusätzlich bewirkt der Wasserverlust durch Evaporation aus der Probe heraus erst eine Abnahme im Sättigungsprofil in den oberen Millimetern und Zentimetern, so dass tiefer liegende Tensiometer den Wassergehaltsverlust nicht registrieren bzw. erst später registrieren, sobald die Entsättigung sich im ganzen Probenprofil ausbreitet und sich deutlich Porenwasserdruckunterschiede zwischen oberem und unterem Tensiometer ergeben.

Somit wurden Versuchsabschnitte zu Beginn, bei denen $\Delta h/\Delta z < 1,5$ war, kritisch betrachtet, um hydraulische Durchlässigkeiten zu bestimmen, weil diese bei so niedrigen hydraulischem Gradienten als unrealistisch angesehen werden müssen.

Es wurden aber trotzdem die Durchlässigkeits-Werte (K -Werte) von Versuchsbeginn an errechnet und dargestellt. Es zeigte sich, dass die errechneten K -Werte bei hoher Sättigung wie erwartet unrealistisch und stark schwankend waren. Mit Abnahme des Wassergehalts zeigte sich bei fast allen K -Kurven ein Wassergehaltspunkt, an dem die Schwankungen der unrealistischen K -Werte aufhören und die K -Werte stetig abnehmen.

Bei Vergleich mit der h -Kurve zeigt sich, dass dieser Wassergehaltspunkt zusammenfällt mit dem Punkt, an dem die h -Kurve erstmals deutlich hin zu stärker negativ werdenden Porenwasserdrücken umschlägt. Der „flache“ Abschnitt der h -Kurve, ausgehend von Sättigung bis hin zum eben beschriebenen Umschlagpunkt, wird von mir als Makroporenabschnitt interpretiert. Der Abschnitt vom Umschlagpunkt bis hin zum Trockenen wird als Matrixabschnitt interpretiert. Es handelt sich somit um bimodale Retentionskurven. Bei rein visueller Zusammenführung des jeweiligen Umschlagpunktes von K -Kurve und h -Kurve zeigt sich, dass dieser Punkt bei ca. -7,5 cm Porenwasserdruck liegt.

Die Makroporen stellen in dem vorhandenen Bodenprobensystem kleine „Mikrobrunnen“ dar. Sobald die Evaporation ausgehend von Vollsättigung startet, wird Wasser sowohl aus der Bodenmatrix als auch aus der Makropore heraus evaporiert. Die Matrix-Evaporationsfront, die von oben nach unten in die Probe eindringt, kann dabei allerdings nie tiefer liegen als der „Wasserspiegel“ in der Makropore, weil der „Wasserspiegel“ in der Makropore den vorhandenen gesättigten Bereich in der umgebenden Matrix entsprechend einem „Grundwasserspiegel“ anzeigt. Das heißt, dass zu Beginn des Versuchs die Evaporation überwiegend bewirkt, dass eine „Grundwasserspiegelabsenkung“ abläuft. Sobald der „Grundwasserspiegel“ die Probengrundfläche erreicht, beginnt erst die reine Matrix-Evaporation. Die Absenkung des „Grundwasserspiegels“ durch Evaporation ist in Abb. 2.31 zu erkennen. So zeigt sich, dass bei Modul A der Porenwasserdruck in den drei Tiefen im Mittel innerhalb der ersten ca. 3,7 Tage um 12,5 cm abnimmt (z.B. T_mitte_1_A von +5 cm auf -7,5 cm). Das heißt: Während der „Grundwasserspiegel“ bei dem 12,5 cm hohen A-Modul von der oberen Grundfläche („Grundwasserspiegel“ bei Probenvollsättigung) bis zur unteren Probengrundfläche („Grundwasserspiegel“ weg, bei im ganzen Profil vorhandenen ungesättigtem Zustand) absinkt, fallen die Porenwasserdrücke weitgehend parallel zueinander und gleichmäßig auch um 12,5 cm. Erst nach 3,7 Tagen beginnt die reine Matrixevaporation und die Porenwasserdrücke werden schnell kleiner und die Porenwasserdruckabstände (Δh) zwischen den Tensiometertiefen werden schnell größer (driften auseinander, weil insbesondere das obere Tensiometer die schnelle Austrocknung oberflächennah registriert).

Eine zum Zeitpunkt des Verschwindens des „Grundwasserspiegels“ theoretisch angenommene hydrostatische Druckverteilung entspricht einem Profil von 0 cm unten und -15 cm oben mit einem Porenwasserdruck von -7,5 cm in der Probenmitte (bei 15 cm hohen Modulen B, C und D unter Vernachlässigung von Evaporation oberhalb des „Grundwasserspiegels“). Somit passen auch mit dieser Interpretation der Umschlagpunkt von K -Kurve und h -Kurve als „Grenze“ zwischen Makroporen- und Matrixanteil zusammen, weil die Makroporen zu diesem Punkt entleert sind. In Tabelle 2.6 ist der Makroporenanteil als Evaporationsphase b1 aufgeführt, zum einen auf Basis der rein visuellen Feststellung der Grenze (Zusammentreffen der Umschlagpunkte von h - und K -Kurve) und zum anderen bei Festlegung der Grenze bei einem Porenwasserdruck bei -7,5 cm. In beiden Fällen ist der Makroporenanteil insgesamt als sehr groß zu beurteilen. Darüber hinaus ist er im Oberboden höher als im Unterboden, was auch schon visuell bei der Probenfreilegung im Feld beobachtet wurde. Der hohe Makropo-

renanteil im oberen Bereich ist auch damit zu erklären, dass es sich dabei vermutlich überwiegend um Schrumpfungsrisse handelt, die sich insbesondere bei Trocknungsprozessen im Boden entwickeln. Da davon auszugehen ist, dass der Boden oberflächennah stärker trocknet als in der Tiefe, sind somit oberflächennah mehr schrumpfungsbedingte Makroporenrisstrukturen zu erwarten.

Zusätzlich ergibt sich im Zusammenhang mit der Betrachtung der „Makroporenwasserstandshöhe = Grundwasserspiegelhöhe“ auch ein Problem zu Beginn der h -Kurve. Da bei Vollsättigung zu Beginn des Versuchs eine Porenwasserdruckverteilung von +15 cm unten und 0 cm oben vorliegen muss, ergibt sich als erster Wert für \bar{h} in der Probenmitte ein Wert von +7,5 cm. Auch nach Beginn der Evaporation (Phase b) zu Versuchsbeginn sind noch einige Zeit lang Werte zwischen 0 cm und +7,5 cm Porenwasserdruck vorhanden. Somit beginnt die h -Kurve nicht bei einem Porenwasserdruck = 0 cm zum Zeitpunkt der Vollsättigung, sondern mit einem leicht positiven Porenwasserdruck. Da eine Retentionskurve nur „sauber“ definiert wäre, wenn Vollsättigung einem Porenwasserdruck von 0 cm zugeordnet werden könnte, ist die hier verwendete Methode auch für die h -Kurve in diesem Bereich nahe Sättigung (und für „hohe“ Proben) als unzureichend zu beurteilen und weitere Korrektur- und Anpassungsstrategien müssten entwickelt werden.

Die Mittelung der Tensiometermesswerte ist bei den hier vorhandenen 15 cm hohen Bodenproben darüber hinaus vermutlich recht ungenau, weil mit zunehmender Austrocknung der Probe das Druck- und Wassergehaltsprofil vermutlich nicht mehr linear vom unteren Rand zur Oberfläche der Probe hin verläuft. Die Nichtlinearität wirkt sich bei dem großen Abstand von 7,5 cm zwischen den Tensiometern zusätzlich besonders stark auf die Mittelwertbildung aus.

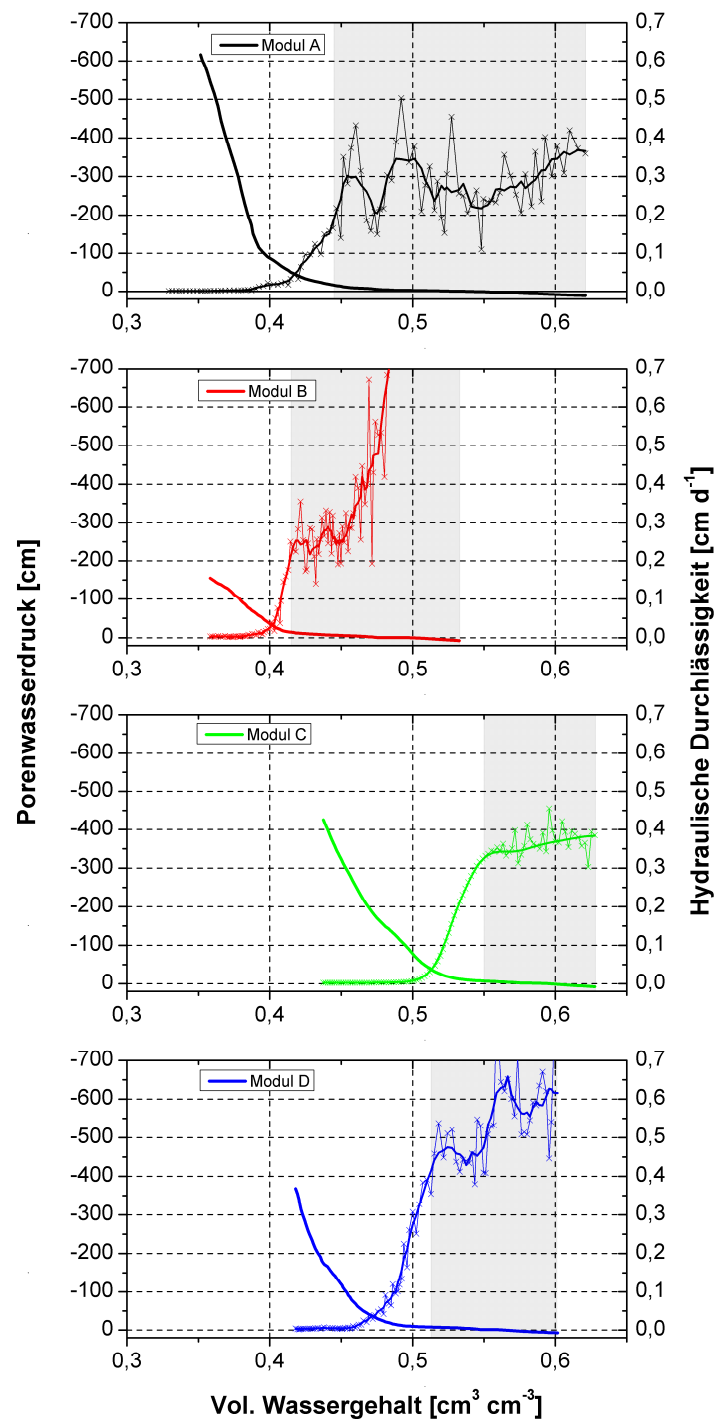


Abb. 2.34: Mit der Evaporationsmethode ermittelte Retentions- und Durchlässigkeitskurven für die Modulproben A bis D; graue Bereiche markieren Abschnitte in der hydraulischen Durchlässigkeitskurve mit sehr hohen und stark schwankenden unrealistischen Durchlässigkeiten; bei den Retentionskurven sind die einzelnen Messpunkte nicht dargestellt, sondern die nahaneinanderliegenden Messwerte als mit einer Linie verbunden dargestellt; bei den Durchlässigkeitskurven sind einzelne Messwerte dargestellt und zusätzlich eine Mittelwertslinie zu diesen Messpunkten.

2.3.4 HYPROP-Evaporationsexperimente an Kleinzylinder-Bodenproben

Der Verlauf des kumulativen Wasserverlustes durch Evaporation, der Evaporationsrate und der Porenwasserdruckverhältnisse in den Proben ist in Abb. 2.35 dargestellt. Die Zeitspanne, in der die Tensiometer sinnvolle Messungen bis zu -1500 cm Porenwasserdruck machten, war insgesamt sehr kurz, und betrug bei Probe A ca. 5 Tage, bei Probe B ca. 3 Tage, bei Probe C ca. 4 Tage und bei Probe D ca. 2 Tage. Unter der Annahme, dass bei Anwesenheit von Feinstporen die Evaporation aufgrund der stärkeren senkrechten Kapillaranstiege begünstigt wird, spiegelt ein hoher Tonanteil bei Probe D einem vermutlich hohen Anteil an Feinstporen die eben genannten kurzen Austrocknungszeiten gut wider. Im Umkehrschluss dazu zeigt sich bei Probe A vermutlich aufgrund der Probenkornzusammensetzung mit höherem Sandanteil und weniger Ton ein verlangsamtes Eindringen der Evaporationsfront in die Tiefe der Probe. Diese Beobachtung stützt die Hypothese, dass der Kapillaraufstieg hin zur Oberfläche bei weniger Feinporen und mehr Mittelporen „geschwächt“ ist und somit mehr „Evaporationskraft“ benötigt wird, um die Evaporation von Wasser aus der Tiefe der Probe heraus zu erzeugen.

Die Evaporationsraten sind zu Beginn des Versuchs teilweise deutlich erhöht (bis zu 1 cm d^{-1}), bewegen sich aber in der Mitte der jeweiligen Versuchsläufe leicht abnehmend im Bereich von $< 0,5 \text{ cm d}^{-1}$ bis ca. $0,2 \text{ cm d}^{-1}$. Beim Versuch zu Probe A ist deutlich zu erkennen, dass die Rate nach ca. 7 Tagen abfällt. Dieser Abfall wird als Wechsel zwischen der sogenannten Stufe 1 und Stufe 2 der Evaporation beschrieben (siehe z.B. Shokri und Or, 2011). In der ersten Stufe findet die Evaporation an der Bodenprobenoberfläche statt und das zu evaporierende Wasser wird, solange die Feinstporen wasserleitend sind, aus der gesamten Probe auch aus der Tiefe herangezogen („Dochteffekt“). Erst in der zweiten Stufe ist die Verbindung von tiefer liegendem Porenwasser zur Oberfläche über Feinstporen abgebrochen und die Wasserverluste aus der Probe heraus entstehen nun noch langsamer über Wasserdampfdiffusion (Evaporationsraten von $< 0,2 \text{ cm d}^{-1}$).

Aus den Versuchen wurden die Retentionseigenschaften sowie die hydraulischen Durchlässigkeiten abgeleitet. Die direkt ermittelten Datenpunkte von Wassergehalts-Porenwasserdruck-Beziehung für die Retentionskurve und die ermittelte Durchlässigkeitskurve sind unter anderem in Abb. 2.36 gezeigt. Insbesondere für Probe A zeigte sich ein Ab-

schnitt mit einem Wassergehalt von ca. 60% bis hin zu ca. 40%, bei dem nur minimale Druckunterschiede vorhanden waren. Dieser Wassergehaltsanteil von ca. 20% deutet auf Makroporen hin, die entwässert werden, während gleichzeitig die Matrix hoch gesättigt bleibt, so dass die Tensiometer (die mit der Matrix in Kontakt stehen) Porenwasserdrücke von > -10 cm messen. Auch für die anderen Proben zeigte sich ein vermuteter „Makroporen“-Entwässerungsanteil von ca. 5% bis 10% bei Porenwasserdrücken von > -10 cm ($pF < 1$). Insgesamt zeigen sich somit bimodale Retentionskurven.

In einem weiteren Schritt wurden diese direkten „Datenpunkt-Kurven“ auf Basis vom „Durner, dual van Genuchten“-Ansatz (Durner, 1994) für die Retentionskurve und auf Basis des „Peters-Durner II“-Ansatzes (Peters und Durner, 2008b) für die Durchlässigkeitskurve „angefittet“.

In Abb. 2.37: bis Abb. 2.40: sind für die Proben A bis D jeweils einzeln die Fittingergebnisse inklusive der Fittingparameter und der Fittinggüte dargestellt. Die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (engl. RMSE) zeigt den mittleren „Gesamtfehler“ zwischen Datenpunkten und gefitteter Funktion an. Mit einem RMSE-Wert von 0,001 für die Retentionskurve und von 0,04 für die Durchlässigkeitskurve bei Probe D zeigt sich hier die beste Anpassungsgüte im Vergleich zu den anderen Proben. Bei Probe D zeigt sich, dass der vermutlich geringste Anteil an Makroporen sich dadurch bemerkbar macht, dass die Probe D insgesamt homogener zu sein scheint und somit die Anpassung der Funktionen gut gelingt, denn die „Fittingtools“ funktionieren umso besser, je idealisierter (homogener) das poröse Medium ist. Insgesamt konnten die Retentionseigenschaften besser angepasst werden als die Durchlässigkeiten. Darüber hinaus waren keine sinnvollen Durchlässigkeiten im Bereich hoher Proben-sättigung zu ermitteln.

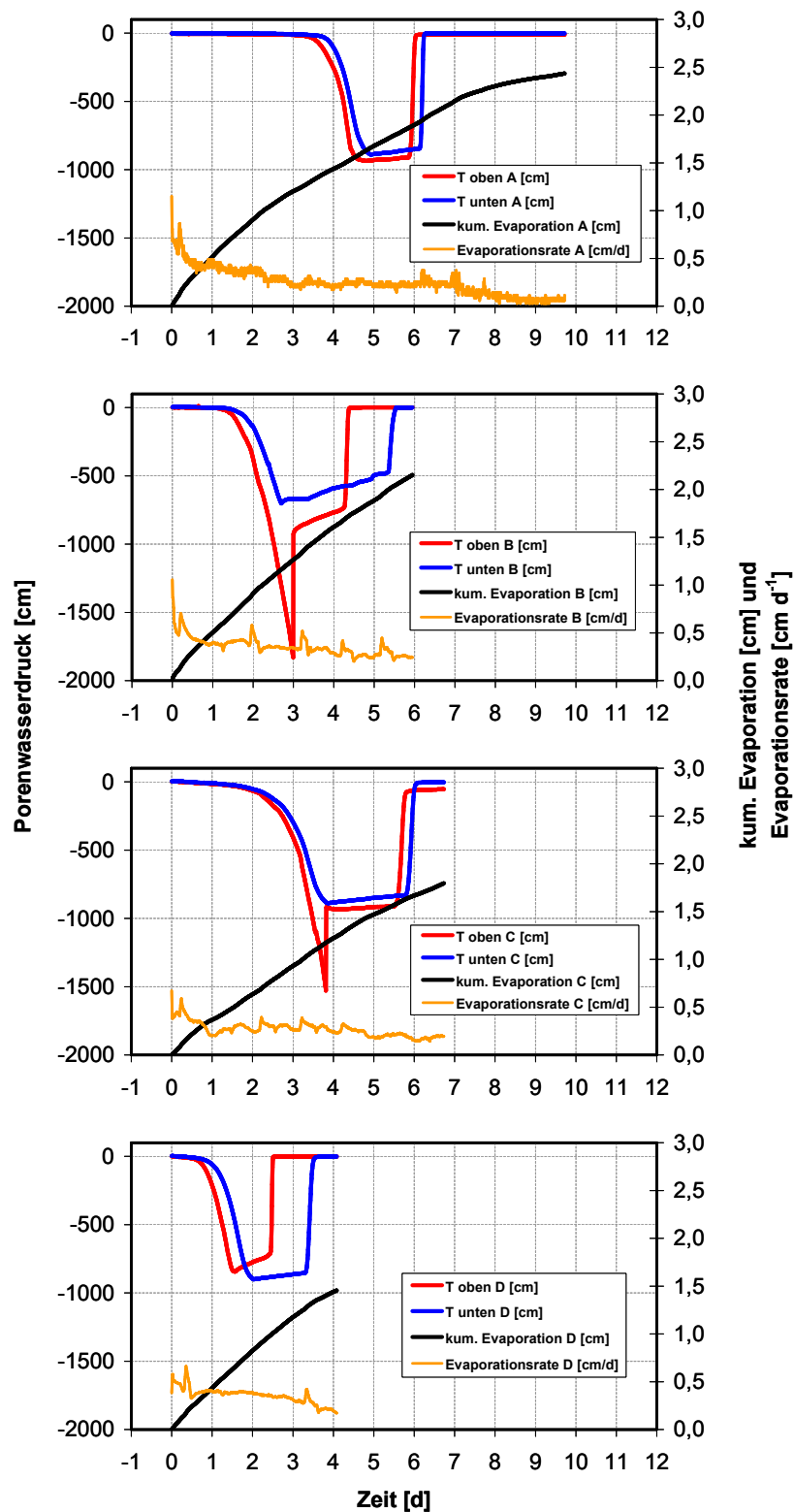


Abb. 2.35: Verlauf der Porenwasserdrücke, der Evaporationsraten und der kumulativen Evaporation für die HYPROP-Versuchsdurchführung an den Kleinzylinderproben A, B, C und D (in der Abbildung von oben nach unten dargestellt); T = Tensiometer, kum. = kumulativ.

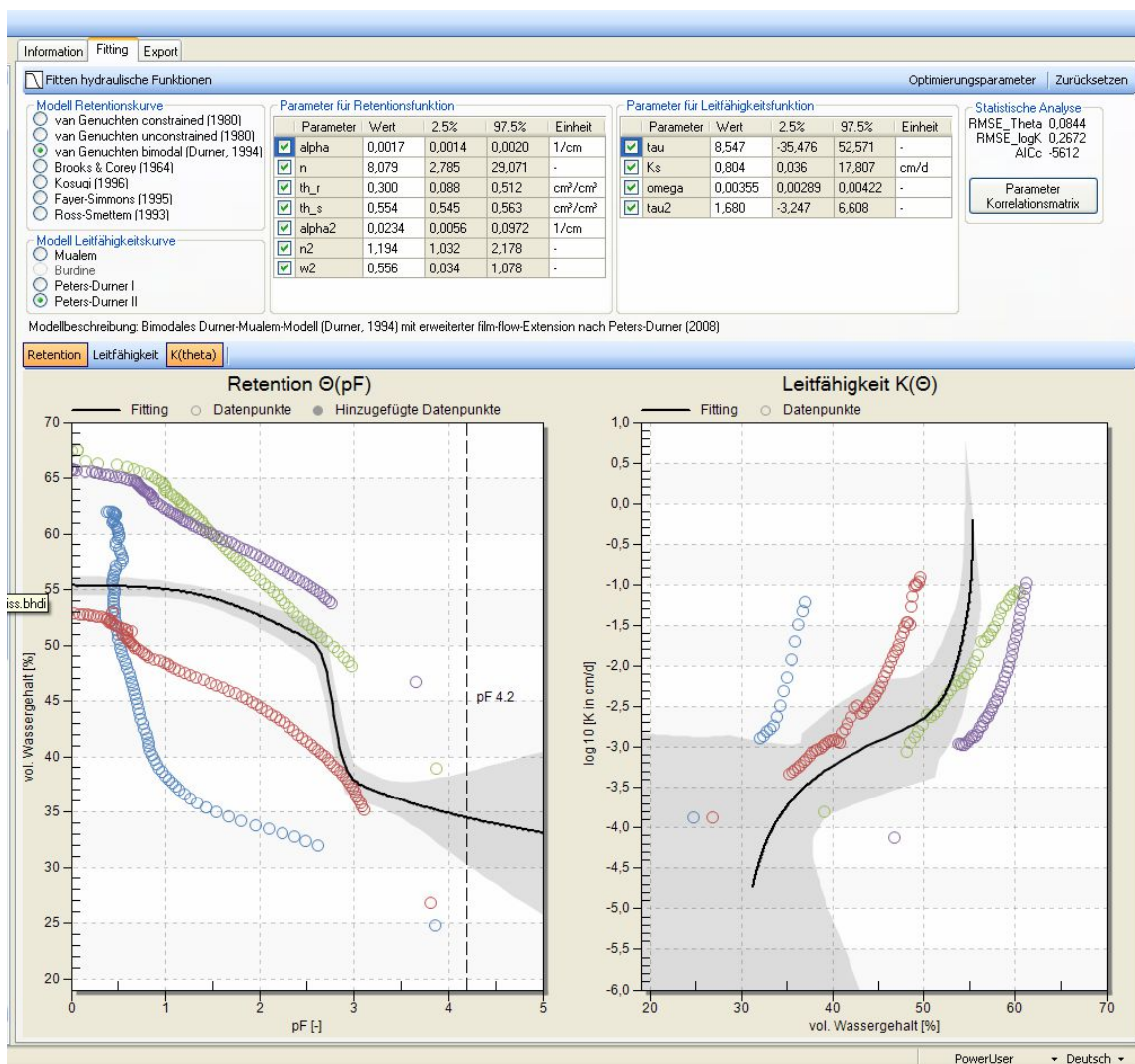


Abb. 2.36: Mittels HYPROP-Methode ermittelte Wassergehalts-Porenwasserdruck und Wassergehalts-Durchlässigkeits - Beziehungen für die Proben A bis D sowie hydraulische Funktionen über alle vier Proben zusammenfassend angepasst.

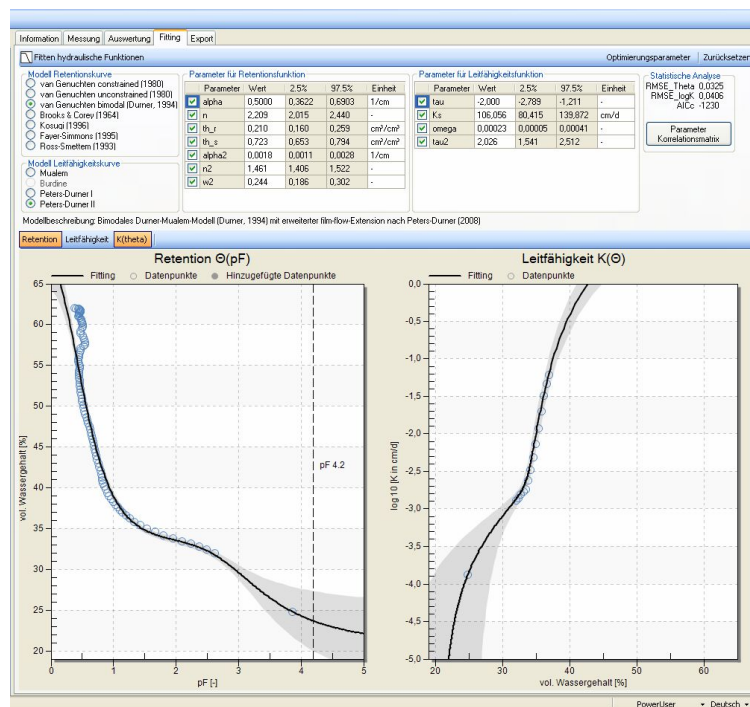


Abb. 2.37: Mittels HYPROP-Methode ermittelte Wassergehalts-Porenwasserdruck und Wassergehalts-Durchlässigkeits - Beziehungen für die Probe A sowie angepasste hydraulische Funktionen, geschätzte Parameter (Tabelle oben) und statistische Analyse (oben rechts).

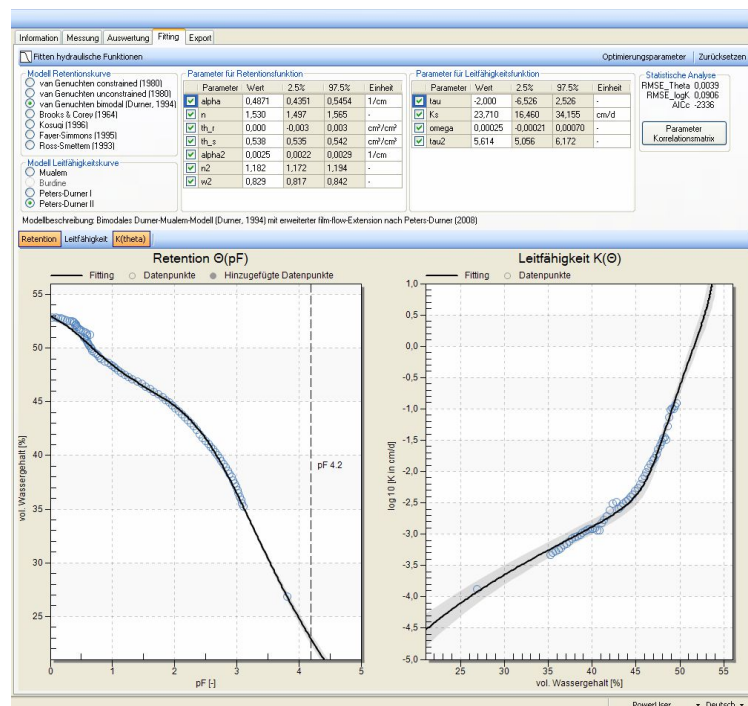


Abb. 2.38: Mittels HYPROP-Methode ermittelte Wassergehalts-Porenwasserdruck und Wassergehalts-Durchlässigkeits - Beziehungen für die Probe B sowie angepasste hydraulische Funktionen, geschätzte Parameter (Tabelle oben) und statistische Analyse (oben rechts).

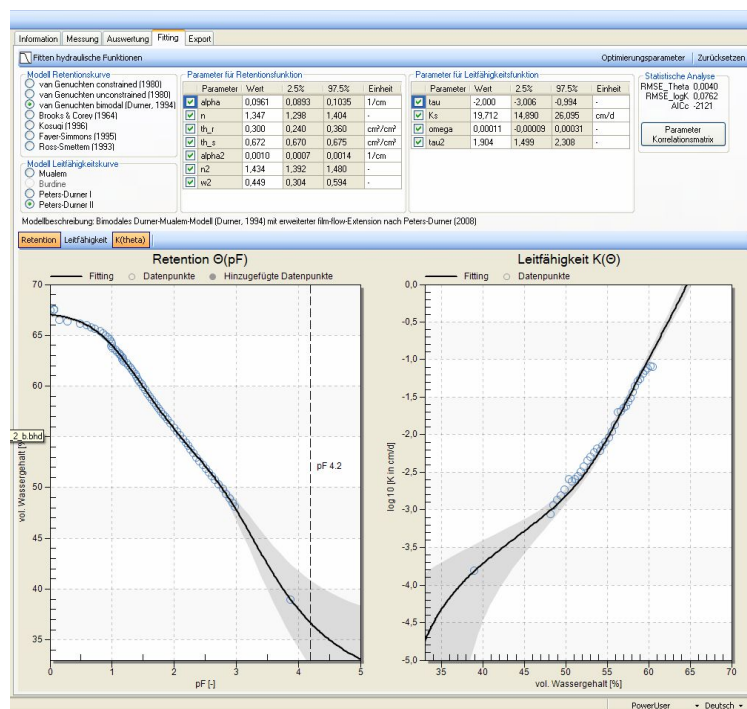


Abb. 2.39: Mittels HYPROP-Methode ermittelte Wassergehalts-Porenwasserdruck und Wassergehalts-Durchlässigkeits - Beziehungen für die Probe C sowie angepasste hydraulische Funktionen, geschätzte Parameter (Tabelle oben) und statistische Analyse (oben rechts).

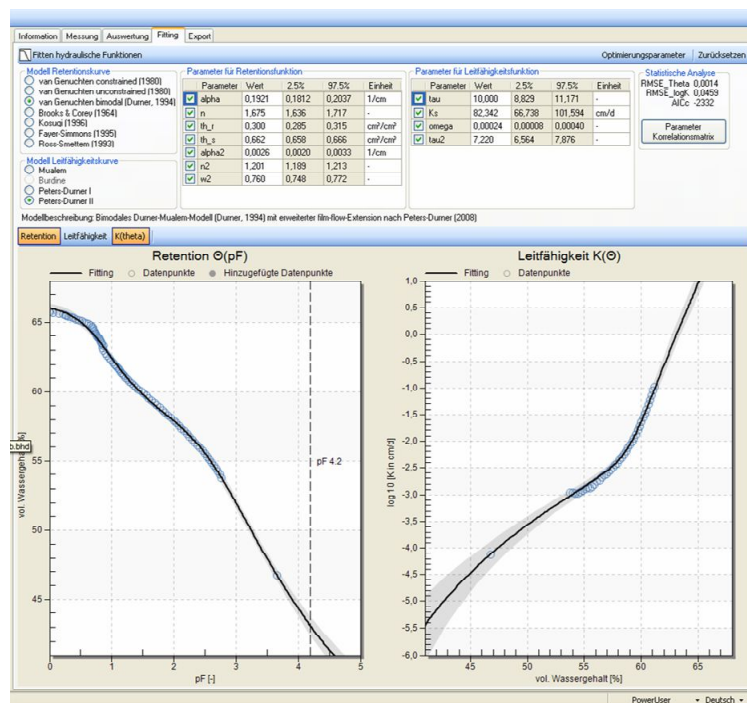


Abb. 2.40: Mittels HYPROP-Methode ermittelte Wassergehalts-Porenwasserdruck und Wassergehalts-Durchlässigkeits - Beziehungen für die Probe D sowie angepasste hydraulische Funktionen, geschätzte Parameter (Tabelle oben) und statistische Analyse (oben rechts).

2.4 Gegenüberstellung und Diskussion der Ergebnisse der verschiedenen Methoden

Die ermittelten bodenhydraulischen Eigenschaften der vier „Großproben“ (Viertelmodule bei XMSO- und EVA-Versuchen) und der vier „Kleinproben“ (HYPROP-Versuche) werden in diesem Kapitel dargestellt und vergleichend diskutiert. Die XMSO- und EVA-Versuche wurden je nach erneuter Wasseraufsättigung an exakt denselben Großproben A, B, C und D durchgeführt. Die HYPROP-Versuche wurden an Kleinproben durchgeführt, die wenige Zentimeter neben den Großproben gewonnen wurden; sie sind quasi vom gleichen Ort und aus dem gleichen Bodenmaterial. Was die Messcharakterisierung anbetrifft, handelt es sich bei allen Versuchen um Entwässerungsversuche, also auch um ermittelte Entsättigungs-Retentionskurven.

2.4.1 Unterschiedliche Anfangswassergehalte

Beim Vergleich der bodenhydraulischen Eigenschaften ergab sich das Problem, dass sich die maximale Wassersättigung der großen Modulproben von der der Kleinproben unterschied. Sowohl bei den großen Modulproben als auch an den Kleinproben wurde der maximale Wassergehalt nach Ofentrocknung über die Lagerungsdichte bzw. über das errechnete Porenvolumen festgelegt. Der maximale Wassergehalt ist für beide Methoden bei den Großproben genau gleich festgelegt. Über das Porenvolumen ließ sich die Porosität ermitteln. Die Porosität [0-1] wurde dann mit maximalem Wassergehalt [0-1 cm³ cm⁻³] gleichgesetzt. Sicherlich ist davon auszugehen, dass die tatsächliche Wassersättigung aufgrund von Lufteinschlüssen nicht der Porosität entsprach und somit der jeweils angenommene gesättigte Zustand theoretisch ist. In diesem Zusammenhang ergaben sich aus den Ofentrocknungswerten bei den Kleinproben nach den HYPROP-Messungen weitere Probleme. Die in HYPROP-Fit hinterlegten automatischen Berechnungsformeln für den Anfangswassergehalt ergaben im Zusammenhang mit den ermittelten Probentrockengewichten keine „sinnvollen“ Werte mit Anfangswassergehalten von > 80 vol. % und Werten größer als die errechnete Porosität. Grund könnte hierfür gewesen sein, dass für die Festsubstanzdichte zunächst standardmäßig 2,65 g cm⁻³ angenommen wurde. Die Festsubstanzdichten für die HYPROP-Proben wurden nicht gesondert ermittelt. Die Nutzung der für die Großproben ermittelten Festsubstanzdichten laut Tabelle 2.1 ergaben

in HYPROP-Fit sinnvollere Werte für die Anfangswassergehalte der Kleinproben, die jedoch tendenziell höher lagen als bei den Großproben.

2.4.2 Makro- und Grobporenanteil

2.4.2.1 Großproben XMSO vs. Großproben EVA

Die sich auf Basis der drei Versuchsreihen a) XMSO-Großproben, b) EVA-Großproben und c) HYPROP-Kleinproben bestimmten Retentionskurven (h -Kurven) und Durchlässigkeitskurven (K -Kurven) sind in den Abb. 2.41 bis Abb. 2.44 dargestellt. Die Kurven, die sich aus den unterschiedlichen Methoden ergaben, verlaufen je Probtiefe in unterschiedlichen Wassergehaltsbereichen, ausgehend von den unterschiedlichen maximalen Anfangswassergehalten (siehe jeweils oberes Diagramm der Abb. 2.41 bis Abb. 2.44). Der relative Verlauf und die charakteristische Form der Kurven sind auf den ersten Blick allerdings ähnlich. Dies insbesondere bei den Retentionskurven bei Kurvenabschnitten ca. < -50 cm Porenwasserdruck (entsprechend Abschnitten mittlerer Wassersättigung) und bei den Durchlässigkeitskurven bei Werten von ca. $< 0,2$ cm d⁻¹. Im Bereich hoher Wassersättigung, also zwischen ca. 0 und -50 cm Porenwasserdruck, bestehen teilweise deutliche Unterschiede. Insbesondere zeigt sich hier die unterschiedliche Länge des Sättigungsabschnittes der dort flach verlaufenden Retentionskurve ausgehend vom maximalen Wassergehalt bis hin zum steiler werdenden Kurvenverlauf bei ca. -50 cm. Es ist anzunehmen, dass der Bereich zwischen ca. 0 und -50 cm bei den hier vorliegenden Proben und Methoden dem Bereich entspricht, bei dem insbesondere Makroporen und Grobporen entwässert werden. Unter der Annahme, dass die Großproben bei den XMSO- und EVA-Versuchen als Anfangsbedingung gleich vollständig gesättigt wären, müsste, da es sich um exakt die selben Proben handelt, der Makroporen- und Grobporenanteil gleich sein und sich somit in gleichen Abschnittslängenanteilen der Retentionskurve bei hoher Wassersättigung widerspiegeln. Das ist bei den hier gezeigten Retentionskurven (siehe Abb. 2.41 bis Abb. 2.44 oben) nicht zu sehen. Systematisch zeigt sich bei der EVA-Methode ein deutlich größerer „Makroporen/Grobporen-Abschnitt“.

Somit ist aus meiner Sicht in erster Linie davon auszugehen, dass in den Proben unterschiedliche Anfangssättigungen vorlagen, die sich aufgrund unterschiedlicher Aufsättigungsabläufe während der jeweiligen Versuchsvorbereitung ergaben.

Ferner sind leichte Veränderungen an der Probenstruktur durch Schrumpfungs- und Quellungsprozesse nicht auszuschließen, schließlich wurde der jeweilige Probenmodulabschnitt zuerst dreimal einer XMSO-Prozedur von je bis zu ca. 100 Tage unterworfen, bevor die EVA-Methode verwandt wurde. Die Probenporosität wurde erst nach der EVA-Versuchsreihe ermittelt und wurde für beide Versuchsreihen als Fixwert für die maximale Sättigung angenommen. Allerdings kann sich das Verhältnis zwischen den Porengrößenbereichen innerhalb seiner Porosität über die Versuchsdauern verschoben haben, so dass der Anteil an Makro- und Grobporen zur Zeit der XMSO-Versuche evtl. tatsächlich etwas kleiner war.

Außerdem könnte hier die Messmethodik und Messwerteauswertmethodik zu unterschiedlichen Makro- und Grobporen-Abschnittslängenanteilen bei der Retentionskurve geführt haben. In diesem Zusammenhang könnten sich die Nichtanpassungen der Porenwasserdrücke in den Perkolations- und Drainagephasen der XMSO-Versuche bemerkbar machen. Während der Drainagephase waren bei Modulprobe A, B und D die simulierten Porenwasserdrücke niedriger als die gemessenen Porenwasserdrücke (siehe Abb. 2.23 bis Abb. 2.26). Das bedeutet, dass die *h*-MSO-Kurve zu Beginn, ausgehend von maximaler Sättigung auf Basis der Simulation, etwas stärker bei negativen Porenwasserdrücken verläuft, als es auf Basis der Messungen zu erwarten wäre. Allerdings kann der Effekt der nicht optimalen inversen Simulation auch nicht sehr ausschlaggebend sein, denn bei Modulprobe C sind während der Anpassungsprozedur die simulierten Porenwasserdrücke sogar weniger negativ, dennoch verläuft die *h*-MSO-Kurve insgesamt auch hier negativer als die *h*-EVA-Kurve.

Durch weitere Interpretation der unterschiedlich verlaufenden *h*-MSO-Kurven und *h*-EVA-Kurven sind weitere Unterschiede bei Messmethodik und Messwerteauswertmethodik möglich, die zu Unterschieden der Makro- und Grobporen-Abschnittslängenanteilen bei der Retentionskurve geführt haben. So ergaben sich unterschiedliche Ergebnisse bei der Berechnung des mittleren Porenwasserdruckes in der Gesamtprobe bei der EVA-Methode, je nachdem, ob die Mittelwertbildung auf Basis des arithmetischen oder des geometrischen Mittels geschieht. Die hier benutzte geometrische Mittelwertbildung ergibt also nur eine mögliche Retentionsfunktion und sie könnte bei Verwendung des arithmetischen Mittels anders aussehen. Darüber hinaus basiert die EVA-Methode auf einer Linearisierungsannahme des Porenwasserdruckverlaufs im Bodenprobenprofil. Es ist möglich, dass eine lineare Verteilung nicht

immer gegeben ist. Insbesondere bei den hier bis zu 15 cm hohen Proben mit Makroporen könnte die Linearisierungsannahme falsch sein und zu einer „falschen“ Retentionsfunktion führen, weil die mittleren Porenwasserdrücke nicht einfach aus zwei Messpunkten in zwei Tiefen in der Probe gemittelt werden können.

2.4.2.2 Großproben vs. Kleinproben

Beim Vergleich der Großproben (XMSO- und EVA-Versuche) zu den Kleinproben (HYPROP-Versuche) zeigt sich ein überwiegend abweichender „Makroporen-Grobporen-Abschnitt“ der Retentionskurve bei den Kleinproben. Zum einen ist hier der Punkt des maximalen Wassergehalts aber mit Vorsicht zu betrachten, weil, wie oben erwähnt, Festsubstanzdichten angenommen wurden, die den Großproben entsprechen und evtl. nicht für die Kleinproben zutreffen, und zusätzlich die Wassergehaltsberechnung in HYPROP-Fit zu „unklaren“ Ergebnissen führte. Darüber hinaus ist aber in erster Linie stark davon auszugehen, dass tatsächlich unterschiedliche Makroporenanteile vorhanden waren. Bei beiden Probengrößen, also selbst bei den Großproben ist davon auszugehen, dass kein repräsentatives Elementarvolumen (REV) vorhanden war. Sicherlich ist davon auszugehen, dass die Großproben schon gemittelte Eigenschaften zeigen und einem REV nahe kommen, aber insbesondere bei den Kleinproben ist dies nicht der Fall und somit kann eine Kleinprobe zum einen von einer Stelle entnommen worden sein, die viele Makroporen enthält, oder von einer Stelle, die keine Makroporen enthält und somit reine Matrixeigenschaften widerspiegelt. Bei HYPROP-Probe A zeigt sich ein deutlich größerer Makroporen-Grobporen-Abschnitt, bei Probe C und D tendenziell ein kleinerer Abschnitt als bei den *h*-EVA-Kurven.

2.4.2.3 Retentionskurve: Makro- und Grobporenbereich vs. Matrixporenbereich

Vereinfacht lassen sich die hier ermittelten Retentionskurven aller Proben und Methoden in einen flachen und in einen steilen Teil einteilen. Der flache Abschnitt wird von dem steilen Abschnitt durch einen „Scheitel-Bereich“ bei ca. -50 cm Porenwasserdruck geteilt. Der flache Teil (in der hier gewählten Darstellungsweise rechts) entspricht dem Bereich, bei dem die Proben hoch wassergesättigt sind und der als „Makro- und Grobporenbereich“ zu interpretieren ist. Der steile Teil, in der hier gewählten Darstellungsweise links, entspricht dem Bereich

mittlerer Wassersättigungen und ist als „Matrixporenbereich“ zu interpretieren. Ausgehend von dem Verlauf einer Entwässerung werden im Makro- und Grobporenbereich Makroporen und teilweise Grobporen entleert, im Scheitelbereich dann Grobporen und im Matrixporenbereich dann Mittel- und Feinporen.

2.4.2.4 Makroporenanteilabnahme im Profil von oben nach unten

Der Anteil des Makroporenbereichs wird im Bodenprofil von A nach D geringer. Das zeigt sich, wenn man die Retentionsabschnitte zwischen 0 und -50 cm Porenwasserdruck betrachtet (deutlich bei den XMSO-Versuchen bei den Retentionskurven A bis D in Abb. 2.28 zu sehen.). Auch ein Indiz für die Abnahme des Makroporenanteils von oben nach unten ist die Betrachtung der abnehmenden Wassergehaltswerte für A bis D für die Drainagephasen, die in Tabelle 2.4 aufgeführt sind. Die Abnahme kann auch visuell bestätigt werden, da Einblicke in das Bodenprofil beim Ausgraben der Proben und beim Herstellen der Teilmodule möglich waren. Die Abnahme des Makroporenanteils dagegen kann an den Kleinproben nicht klar ausgemacht werden. Das heißt, wie zuvor schon angesprochen, dass mit den Kleinproben weniger repräsentative Proben vorhanden sind, was insbesondere den Makroporen-/Grobporenanteil angeht.

2.4.3 Kurvenverschiebung per Hand aufgrund der Annahme von gleicher Matrixzusammensetzung der Proben

Für den Matrixbereich hingegen wird angenommen, dass die Kornzusammensetzung und somit auch die Mittel- und Feinporenverteilung auch an unterschiedlich großen Proben und bei nah beieinander liegenden Probennahmestellen in der gleichen Tiefe sehr ähnlich ist. Folglich sollten die Retentions- und Durchlässigkeitskurven der hier untersuchten Proben im Matrixbereich auch ähnlich oder sogar gleich sein. Um den Einfluss der Matrix auf die Verlaufsform der Retentions- und Durchlässigkeitskurven besser vergleichen zu können, wurden für die Abb. 2.41 bis Abb. 2.44 (jeweils unten) die Kurvenabschnitte des Matrixbereichs per Hand so übereinander geschoben, dass die Retentionskurvenabschnitte im Bereich von ca. -100 cm Porenwasserdruck nah zusammen oder übereinander liegen. Das Verhältnis von h - zu K -Kurve einer jeweiligen Probe zueinander wurde dabei nicht verändert, so dass die jeweilige K -Kurve als abhängige der h -Kurve um den gleichen Wassergehaltsanteil verschoben wurde. Die h - und K -EVA-Kurve jeder Probentiefe wurde dabei als die jeweils nicht ver-

schiebbare Fixkurve angenommen (die jeweils verschobenen Kurven sind mit einem * gekennzeichnet). Durch diese Vorgehensweise zeigt sich insgesamt, dass je Probentiefe betrachtet die unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der Retentionskurven teilweise zu ähnlichen oder fast gleichen Matrixeigenschaften führten. Insbesondere in der Probentiefe A zeigt sich, dass die *A-h*-EVA und die *A*-h*-MSO-Kurven im Matrixabschnitt von ca. -100 bis ca. -600 cm Porenwasserdruck identische Steigungen aufweisen. Bei den B-Proben hingegen zeigt sich z.B. eine gute Übereinstimmung des Kurvenverlaufs im Scheitelbereich, aber unterschiedliche Steigungen im Matrixbereich. Insgesamt lassen sich aber sowohl für die unterschiedlichen Methoden als auch für die unterschiedlichen Probengrößen tendenziell eher Kurven für die bodenhydraulischen Eigenschaften mit ähnlich charakteristischem Verlauf erkennen, die den vorhandenen lehmigen Boden am Heumöser Hang ausreichend beschreiben. Bei genauerer Betrachtung lassen sich allerdings viele kleinere Unterschiede in den Kurven feststellen. Es ist hier aber keine durchgehende Systematik für alle Probentiefen zu erkennen; mit der Ausnahme, dass sich die MSO-Retentionskurven tendenziell steiler zeigen als die an der jeweils gleichen Probe ermittelten EVA-Retentionskurven (Probe B, C und D). Das könnte ein Hinweis auf methodische Unterschiede sein.

Zusätzlich könnte hier ein Bezug zur Bodenkörnung hergestellt werden, denn die Proben B, C und D haben weniger Sandanteil und mehr Tonanteil als Probe A (siehe Tabelle 2.1). Das nehme ich als Hinweis darauf, dass die Methoden je nach Materialzusammensetzung evtl. unterschiedlich wirken. Ob jetzt aber z.B. bei den Proben C und D die MSO-Retentionskurve steiler ist oder die EVA-Retentionskurve weniger steil, kann nicht ohne weiteres festgestellt werden, da die wirkliche hydraulische Eigenschaft nicht bekannt ist. Bei der Annahme, dass die EVA-Kurve die „richtigere“ ist, könnte sich also die steilere MSO-Kurve dadurch erklären lassen, dass die Methode und hier insbesondere die Art und Weise der Ermittlung des mittleren Porenwasserdrucks eine Rolle spielt. Die Verwendung von einem Tensiometer in der Probenmitte je Modul könnte nicht ausreichend repräsentativ für die Messung eines mittleren Porenwasserdrucks der bis zu 15 cm hohen Gesamtprobe sein. Gerade bei lehmigen Material sollte die Mittelwertbildung auf Basis von zwei Tensiometern mit symmetrischem Abstand zur Probenmitte bei der EVA-Methode gut funktionieren, da bei lehmigen Material die Porenwasserdruckverteilung im Probenprofil linear anzunehmen ist (zumindest innerhalb des hier erfassten Druckbereichs bzw. der hier erfassten Zeitspanne der Evaporation).

2.4.4 Nachteil MSO-Methode mit nur einem Tensiometer

Bei der MSO-Methode sind während der Entwässerung der Probe im Vergleich zur Entwässerung bei der EVA-Methode stark nichtlineare Porenwasserdruckprofile zu erwarten. Die mit der Entwässerung obligatorisch sich zum Negativen hin verändernden Porenwasserdrücke entstehen insbesondere nahe über der Saugplatte und sind verzögert auch in der Probenmitte vorhanden und mit dem Tensiometer erfassbar. Oberhalb des Tensiometers allerdings ist eine geringere Druckveränderung zu erwarten.

Damit zusammenhängend wirkt der Unterdruck erst verzögert auf eine Entwässerung der Bodenmatrix im mittleren Probenbereichen und oberhalb des mittleren Tensiometers. Mit der Folge, dass die Probe, trotz gemessener Porenwasserdruckabnahme und Entwässerung im unteren Bereich, insgesamt noch hoch gesättigt ist. Das heißt, dass der Entwässerungsanteil, der vermutlich verstärkt direkt aus dem Bereich oberhalb der Saugplatte kommt, als der mittlere Wassergehaltsverlust für die gesamte Probe angenommen wird, obwohl der resultierende Wassergehalt dem Tensiometermesspunkt in Probenmitte zugeordnet wird. Es ist anzunehmen, dass sich dieser Effekt insbesondere bei den hier recht langen Proben von bis zu 15 cm Höhe deutlich zeigt, und Entwässerungsanteile der Probenentwässerung, aus denen die mittleren Sättigungen der Gesamprobe errechnet werden, etwas zu stark negativen Porenwasserdrücken zugeordnet werden.

Der etwas höhere Sandanteil bei Probe A führt zu leicht höheren Durchlässigkeiten, so dass sich das „Unterdrucksignal“ einer Unterdruckstufe am unteren Rand beim MSO-Versuch schneller bis in die oberen Bereiche der Probe fortsetzt und somit auch mehr Entwässerung stattfindet. Und somit mittlere Sättigungsannahme und Porenwasserdruck in der Probenmitte besser zusammenpassen, da die Nichtlinearität von Porenwasserdruck und Wassersättigungsprofil abgeschwächt wird.

2.4.5 Einfluss der Probenlänge bei der Evaporations-Methode

Darüber hinaus sind die unterschiedlichen Verläufe der Kurven beim Vergleich der EVA-Großproben mit den HYPROP-Kleinproben sicherlich auch ein Effekt der Probenhöhe; tendenziell zeigt sich eine steilere Retentionskurve im Matrixbereich bei den Kleinproben.

Die Probenlänge wirkt sich hier auf die Ermittlung des mittleren Porenwasserdrucks der Gesamtprobe aus. Der mittlere Porenwasserdruck wird auf Basis der Mittelung von oberem und unterem Tensiometermesswert gebildet. Dieses geschieht unter der Annahme, dass der Porenwasserdruck im Probenprofil von unten nach oben linear abnimmt. Real ist aber anzunehmen, dass nahe der Probenoberfläche aufgrund von dort aus stattfindender Evaporation stärker negativere Porenwasserdrücke zu erwarten sind, und dass das Porenwasserdruckprofil im oberen Probenbereich nichtlinear wird. Dies trifft aber sowohl für kleine als auch für größere Proben zu. Allerdings spielen dann die Positionen der Tensiometermesspunkte eine Rolle: Bei den 5 cm hohen Kleinproben befindet sich das Tensiometer 1,25 cm unter der Probenoberseite, bei den 15 cm Großproben 3,75 cm unter der Probenoberseite (bei der 12,5 cm hohen Großprobe A abweichend bei 1,25 cm). Insbesondere der größere Abstand zur Oberseite und auch zwischen den Tensiometern bei den Großproben wirkt sich bei der Mittelwertbildung des Porenwasserdrucks aus.

Bei den hier gezeigten *h*-EVA und *h*-HYPROP - Kurven zeigt sich tendenziell, dass die HYPROP-Kurven im Matrixbereich steiler verlaufen. Auf Basis von Sensitivitätsstudien (Scharnagl, 2013, pers. Mitt.; Germer, 2014, unveröffentlichte Studie) wurde allerdings das Gegenteil festgestellt. Das heißt, mit zunehmender Probenhöhe wurden auf Basis der Schindler-Methode zunehmend abweichende Kurven von einer nach dem van Genuchten/Mualem-Ansatz (van Genuchten, 1980) festgelegten Retentionseigenschaft für das simulierte Material ermittelt. Und dieses dann in der Weise, dass die Retentionskurven „flacher“ verlaufen. Flacher heißt, dass bei gleichem Wassergehaltsverlust der längeren Probe weniger stark negative Porenwasserdrücke zugeordnet werden. Also ist der Längeneffekt, der in den Sensitivitätsstudien klar ausgemacht wurde, nicht auf die Messungen zu den hier untersuchten langen (bis 15 cm) und kurzen (5 cm) Proben übertragbar. Dies hängt wohl einerseits damit zusammen, dass das Probenmaterial dann doch leicht unterschiedlich ist, obwohl die Probennahmestellen so nah beieinander lagen. Schließlich beinhalten die längeren Proben auch nur in den middle-

ren fünf Zentimetern exakt den gleichen Tiefenabschnitt, den die Kleinproben repräsentieren, und die fünf Zentimeter ober- und unterhalb wurden schließlich mit gemessen und können wiederum in der Materialzusammensetzung von der Kleinprobe abweichen, so dass ein Vergleich der Großproben mit den Kleinproben hier einfach nicht zu übereinstimmenden Kurvenverläufen führt.

2.4.6 Vergleich der ermittelten Durchlässigkeitskurven

Die Scheitelpunkte an den K -Kurven fallen ungefähr mit denen der h -Kurve zusammen (gleiche Wassergehaltsbereiche bei ca. -50 cm Porenwasserdruck). Somit ergibt sich auch hier ein „Makroporen- Grobporenbereich“ mit K -Werten von ca. $> 0,1 \text{ cm d}^{-1}$ und ein „Matrixbereich“ mit K -Werten von ca. $< 0,1 \text{ cm d}^{-1}$. Unter der Vorstellung, dass im Scheitelbereich der K -Kurven der Abschnitt der jeweiligen K -Kurve mit K -Werten ca. $0,1 \text{ cm d}^{-1}$ „abgeschnitten“ wird, ergeben sich verkürzte K -Kurven, die ausgehend vom Trockenen hin zum Feuchteren im Bereich von ca. $0,1$ bis maximal 1 cm d^{-1} enden. Diese Endpunkte entsprechen dann ungefähr den K_s -Werten für die Matrix. Durchlässigkeiten von $0,1$ bis 1 cm d^{-1} entsprechen ca. 10^{-7} bis 10^{-8} m s^{-1} und entsprechen somit Durchlässigkeiten, die auch in der Literatur für lehmig tonige Böden angegeben werden. Typische K_s -Werte für Ton geben Domenico und Schwartz (1990) mit 1×10^{-11} bis $4,7 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ ($0,0001$ bis $0,0406 \text{ cm d}^{-1}$) an. Und für ein Lehmton „silty clay“-Material finden sich bei Clapp und Hornberger (1978) typische K_s -Werte von ca. $1 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ (ca. $8,6 \text{ cm d}^{-1}$). Nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ad-Hoc-AG Boden, 2005, dort Tabelle 80) sind Materialien mit K_s -Werten von 1 bis 10 cm d^{-1} als „gering“-durchlässig zu bezeichnen, mit Werten $< 1 \text{ cm d}^{-1}$ als „sehr gering“-durchlässig.

Bei den an den hier untersuchten Proben gemessenen höheren Durchlässigkeiten handelt es sich um extrem stark vom Makroporenvolumenanteil abhängigen Durchlässigkeiten, die, wie schon weiter oben erwähnt, letztlich von der Probennahmestelle abhängen. Kleinräumig sind also beispielhaft K_s -Werte von 1 bis 50 cm d^{-1} und höher denkbar (siehe z.B. Kapitel 2.3.1, wo K_s -Werte an der quadratischen Bodensäule entnommen ca. einen Meter neben den zylindrischen Bodensäule von bis zu $> 1000 \text{ cm d}^{-1}$ ermittelt wurden). Nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ad-Hoc-AG Boden, 2005, dort Tabelle 80) sind K_s -Werte von 10 bis

40 cm d⁻¹ als „mittel“-durchlässig zu bezeichnen, Werte von 40 bis 100 cm d⁻¹ als „hoch“-durchlässig.

Das heißt insgesamt, dass das lehmige (Matrix)-Material mit eigentlich geringen bis sehr geringen Durchlässigkeiten durch die Anwesenheit von Makroporen in der Gesamtbetrachtung zu einem mittel bis sehr hoch durchlässigem Boden wird.

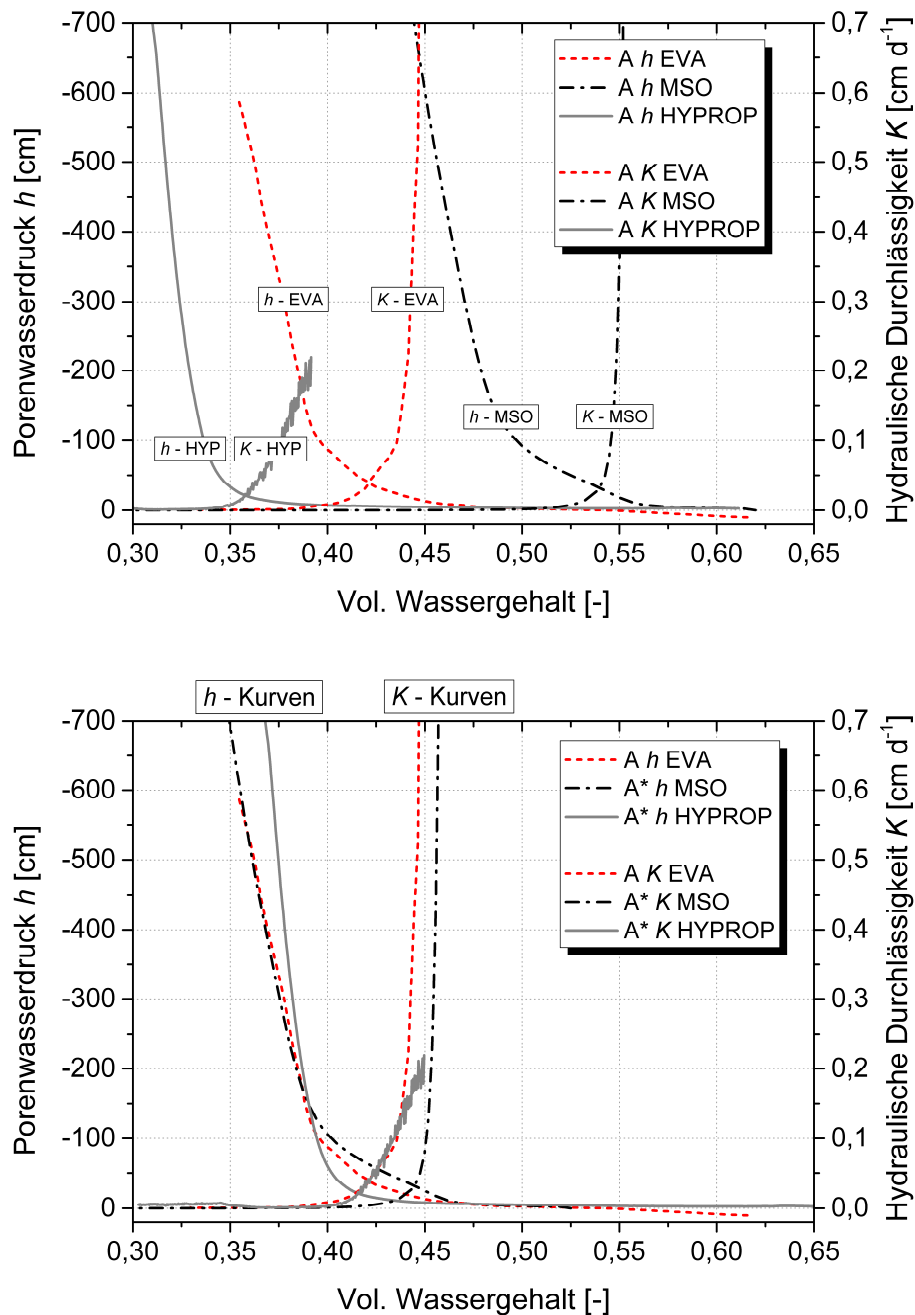


Abb. 2.41: Oben: Retentions- und Durchlässigkeitskurven ermittelt an Modulprobe A mit der Evaporationsmethode (EVA) und der Multi-Step-Outflow-Methode (MSO) sowie für die Kleinzylinderprobe A (HYPROP-Methode); der maximale volumetrische Wassergehalt ergab sich hierbei aus der jeweiligen Methode (Ofentrocknung nach Evaporationsversuchsende); Unten: Zur besseren Vergleichbarkeit der Kurven wurde hier der maximale Wassergehaltspunkt bei den MSO- und HYPROP-Kurven frei verschoben, so dass die Retentionskurven im Bereich enge Grobporen bis Mittelporen (Porenwasserdruck ca. -100 bis -150 cm) übereinander liegen, dabei wurde das Durchlässigkeitskurven-Retentionskurven-Verhältnis der jeweiligen Methode zueinander immer beibehalten.

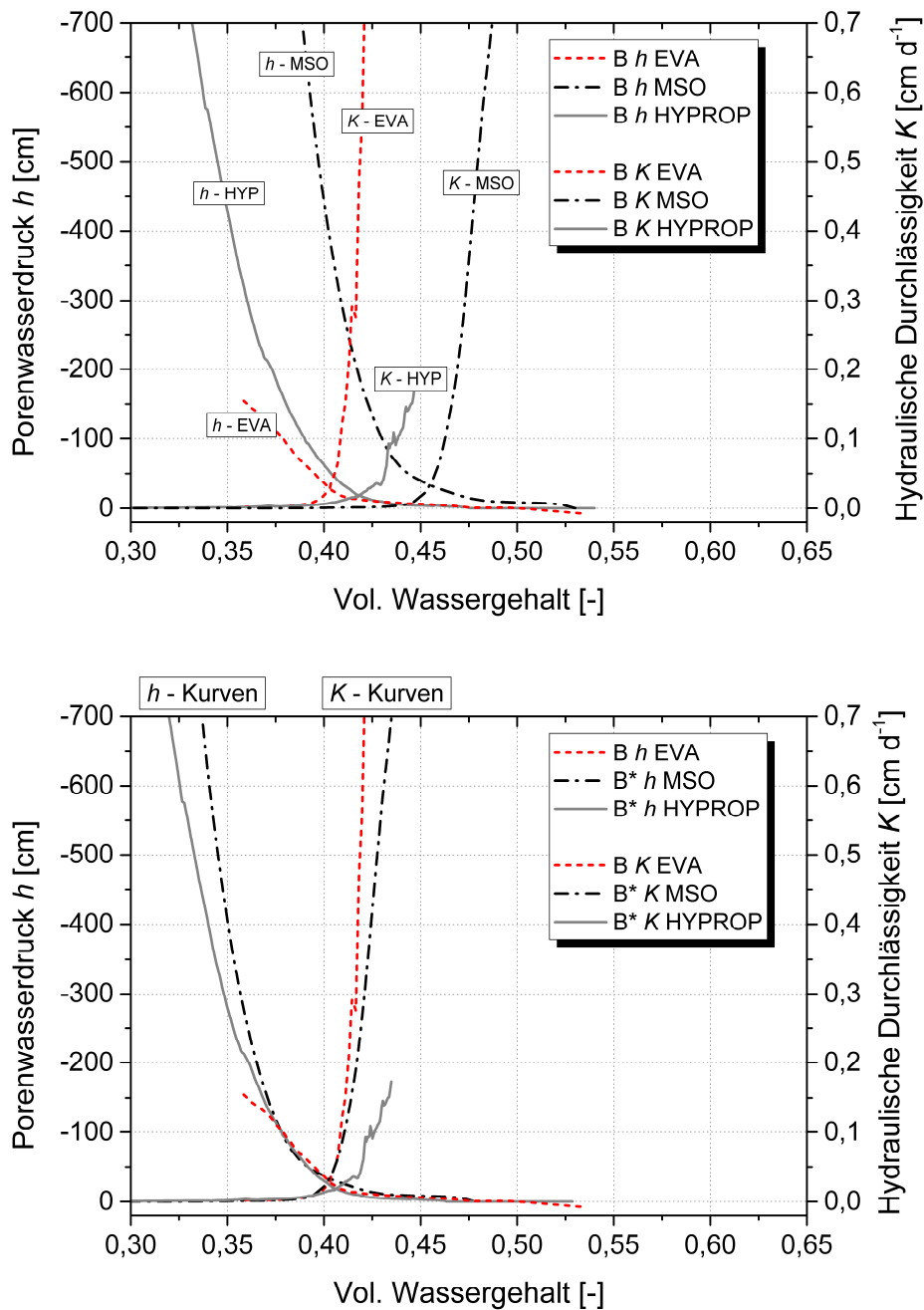


Abb. 2.42: Oben: Retentions- und Durchlässigkeitskurven ermittelt an Modulprobe B (EVA und MSO) und Kleinzylinderprobe B (HYPROP); Unten: Die gleichen Kurven zu den B-Proben wie oben nur mit dem Unterschied, dass die Kurven für die MSO- und HYPROP-Methode durch Verschiebung des maximalen Wassergehaltspunktes im Bereich -50 cm bis -150 cm bei den Retentionskurven übereinander liegen.

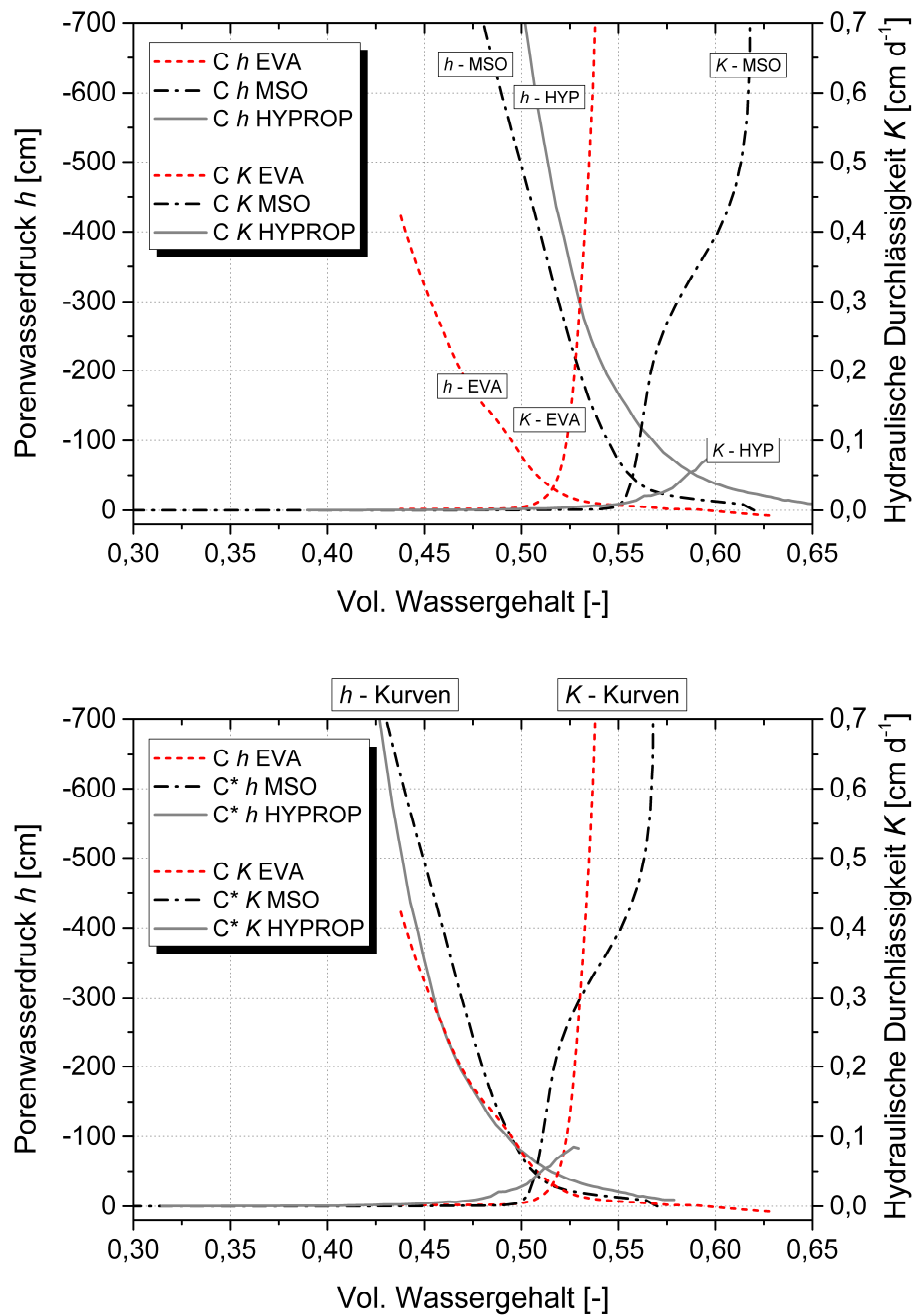


Abb. 2.43: Oben: Retentions- und Durchlässigkeitskurven ermittelt an Modulprobe C (EVA und MSO) und Kleinzylinderprobe C (HYPROP); Unten: Die gleichen Kurven zu den C-Proben wie oben nur mit dem Unterschied, dass die Kurven für die MSO- und HYPROP-Methode durch Verschiebung des maximalen Wassergehaltspunktes im Bereich -50 cm bis -150 cm bei den Retentionskurven übereinander liegen.

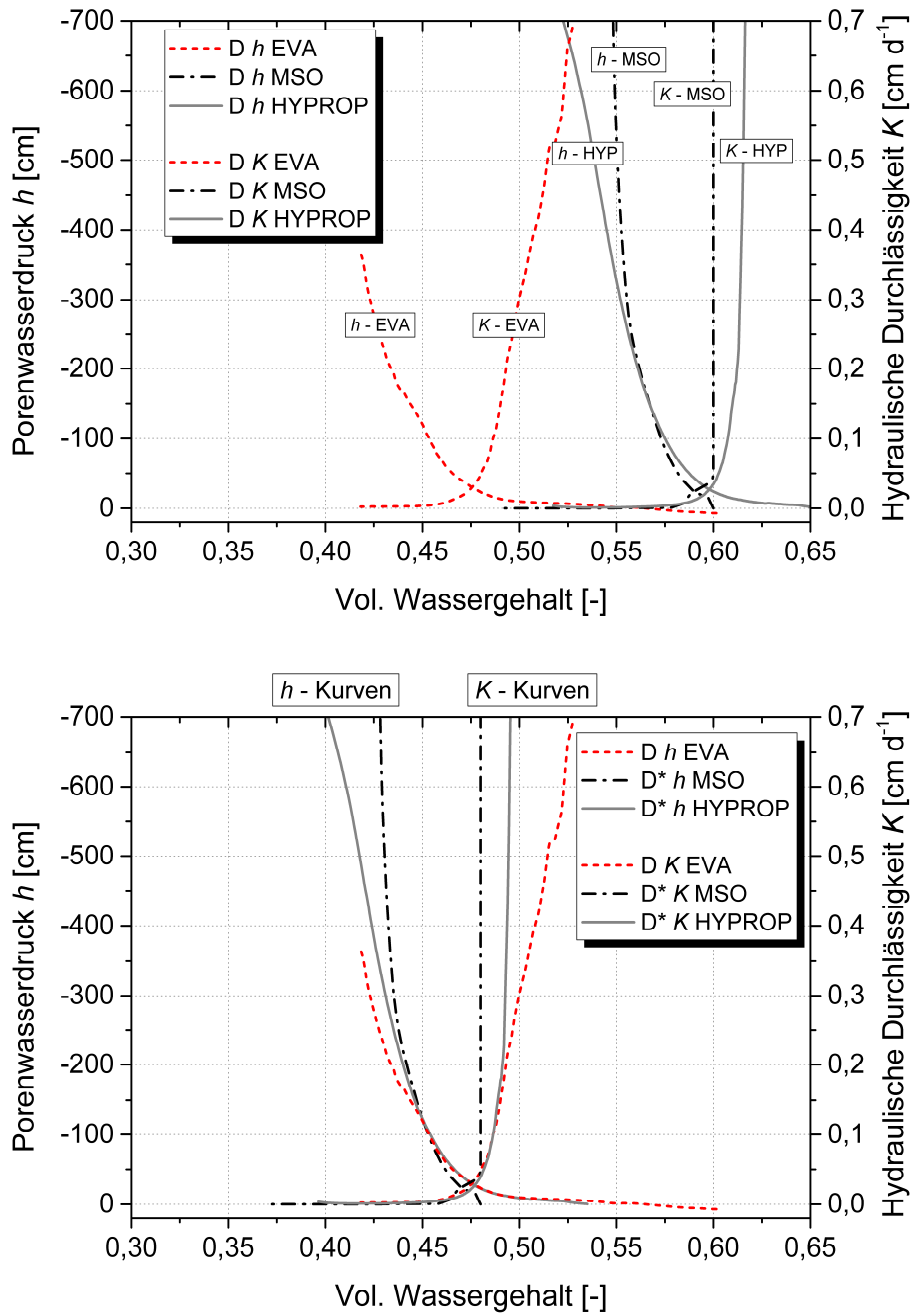


Abb. 2.44: Oben: Retentions- und Durchlässigkeitskurven ermittelt an Modulprobe D (EVA und MSO) und Kleinzylinderprobe D (HYPROP); Unten: Die gleichen Kurven zu den D-Proben wie oben nur mit dem Unterschied, dass die Kurven für die MSO- und HYPROP-Methode durch Verschiebung des maximalen Wassergehaltspunktes im Bereich um -100 cm bei den Retentionskurven übereinander liegen.

2.5 Bodensäulen-Experimente: Zusammenfassung und Ausblick

Da sich aufgrund der verschiedenen Methoden und der Vielzahl von Proben und Messdurchläufen auch vielfältige erwähnenswerte Beobachtungen und Ergebnisse ergaben, werden diese im Folgenden aufgelistet und teilweise mit Interpretationen versehen. Wie die ermittelten effektiven bodenhydraulischen Eigenschaften an Bodensäulen vom Heumöser Hang zur Hangbewegungshypothese passen, wird später in Kapitel 5 dargestellt.

2.5.1 Zusammenschau der wesentlichen Erkenntnisse und Interpretationen

Gesättigte Durchflussexperimente an quadratischer Bodensäule:

1. Es wurde die ca. 60 cm hohe und 30 cm breite (quadratische) Bodensäule in eine Konstant-Wasserdruck-Situation gebracht, um gesättigte Durchlässigkeiten zu bestimmen. Die vertikale Durchlässigkeit lag mit Messungen von K_s -Werten bis $> 1000 \text{ cm d}^{-1}$ in der Größenordnung von 10^{-5} m s^{-1} bis 10^{-4} m s^{-1} , was einer hohen bis extremen Durchlässigkeit entspricht.
2. Das vorherige Ergebnis beruht auf der Annahme, dass zur Berechnung von K_s die gesamte Querschnittsfläche der Säule herangezogen wurde. Da es sich aber um lehmigen Boden handelt, ist davon auszugehen, dass eine sehr geringe Matrix-Durchlässigkeit nur zu einem geringen Matrix-Durchfluss-Anteil führt und der Makroporendurchfluss den Gesamtdurchfluss dominiert. Wenn man jetzt den Matrixdurchfluss gedanklich auch soweit aus dem Durchflussgeschehen eliminiert, dass man annehmen kann, dass eigentlich nur die offenen Makroporenquerschnitte die relevante Durchflussfläche bilden, kann die reine Makroporenfließgeschwindigkeit mit Werten von $>50000 \text{ cm d}^{-1}$ abgeschätzt werden, was einer Durchlässigkeit in der Größenordnung 10^{-3} m s^{-1} entspricht (extrem hoch durchlässig).
3. Durch Halbierung der Bodensäule zu zwei „Würfeln“ konnte die obere und untere Durchlässigkeit separat bestimmt werden. Die Durchlässigkeit ist oben höher als unten. Es ergaben sich unten vertikale Durchlässigkeiten von ca. 400 cm d^{-1} und ca. 1000 cm d^{-1} im oberen Bereich.

4. Zusätzlich wurden die letztgenannten „Würfel“ so umgebaut, dass sie lateral (im Sinne von hangabwärts) durchströmt werden konnten. Die laterale Durchlässigkeit ist oben und unten etwa nur halb so groß wie die vertikale Durchlässigkeit. Somit wurde eine leichte Anisotropie zugunsten schnellerer vertikaler Durchlässigkeiten festgestellt.
5. Die Dominanz des Makroporenflusses konnte unter Verwendung eines Markierungstoffes (Uranin) visualisiert werden. Beim durchgeführten Versuch bestand ein Wasserüberstau an der oberen Probenoberfläche, der Fluss geschah von unten nach oben. Die impulsartige Uraninzugabe unten führte schon ca. eine Minute später zu deutlich sichtbarem Ausfluss oben ausschließlich aus Makroporenöffnungen heraus. Visuell kann man sich das Austreten von uraningefärbten Wasser entsprechend kleinen Eruptionen oder „Black Smokern“ (bloß grünlich) vorstellen. Diese einfache Methode bestätigt somit qualitativ, dass es präferentielle Fließpfade gibt und bestätigt somit die Annahme, dass der Makroporenfluss den Matrixdurchfluss weit überwiegt.
6. Darüber hinaus wurde die Uraninkonzentration im Ausfluss gemessen. Die gemessenen Uranin-Durchbruchskurven zeigen auch wieder den Charakter des Durchflusses mit dem dominanten Makroporenfluss. Zum einen durch einen schnellen Durchbruch und zum anderen durch Durchbruchskurven, die teilweise mehrere Peaks haben, was typisch bei präferentiellen Fließpfaden ist.

Schlussfolgerungen

Kleinere gestörte Standard-Probengrößen mit Volumina zwischen 0,1 und 1 dm³ wären hier nicht gut anwendbar gewesen, um zwischen dem Einfluss der feinporigen Matrix und dem Einfluss von Makroporen auf die richtungsabhängigen hydraulischen Durchlässigkeiten unterscheiden zu können. Daher wurde eine veränderte „cube method“ auf Grundlage der Großprobennahme-Methode von Bouma und Dekker (1981) entwickelt. Damit war es möglich, die Bodenproben mit einer Größe von ca. 50 dm³ (Gesamtsäule) und ca. 25 dm³ (die Hälften) zu untersuchen. Dies ergab Durchlässigkeitsmessungen, die die Struktur der Proben erfassten und somit deutlich repräsentativer (näher an einem repräsentativen Elementarvolumen) für den Standort waren, als es mit Kleinproben zu erwarten gewesen wäre.

Ein weiterer großer Vorteil dieses Verfahrens war, dass es durch die Probengröße und die Versuchsdurchführung möglich war, eine klare Unterscheidung zwischen vertikalen und lateralen Durchlässigkeiten unter kontrollierten Laborbedingungen zu vollziehen. Das ist eine große Verbesserung im Vergleich zu z.B. in situ Infiltrimeter-Methoden, weil bei diesen nur schwer nach richtungsabhängigen Eigenschaften unterschieden werden kann und vielmehr eine Mischgröße aus vertikalen und lateralen Durchlässigkeiten gemessen wird.

Die hier eigens entwickelte Probennahmemethode hat Vorteile gegenüber klassischen Probenahmen, bei denen üblicherweise Zylinder in den Boden gehämmert oder gepresst werden. Die klassischen Probennahmetechniken beeinflussen die Probendichte und die Struktur. Außerdem können die Probenwände verschmiert werden und eine Veränderung oder Verstopfung der Poren verursachen. Es ist davon auszugehen, dass das Probenahmeverfahren, welches in dieser Arbeit beschrieben ist, zu wenig Verschmierungen und Probenstörungen führte, mit der Ausnahme, dass bei der Abtrennung der Säule an der Probenbasis und bei der Säulenteilung in zwei Hälften die Oberflächen leicht durch Sägen und Anbringen von Lochplatten gestört wurden. Die Verwendung von Frischhaltefolie als Probenaussenhaut und die Füllung des Raums zwischen Probe (Folie) und stabilen Holzaussenwänden mit Montageschaum ermöglichten eine sehr gute Einfassung der Probe und damit einen stabilen Transport der ungestörten Probe. Außerdem konnte dieses stabile System im Labor direkt als Teil des Konstant-Druck-Durchfluss-Versuchsaufbaus verwendet werden. Insbesondere die Umwicklung der Probe mit Folie war effizient, weil so das Eindringen des Montageschaums in die Bodenporen verhindert wurde.

Die Verwendung von Uranin als Tracer, um den Makroporenfluss sichtbar zu machen, bestätigte sich als sehr gute und einfache Methode, da somit das Gemessene auf anschauliche Weise an der Säulenoberfläche deutlich erkennbar gemacht wurde. Auf diese Weise konnte qualitativ der Prozess des präferentiellen Fließens gezeigt werden.

Das beschriebene Verfahren ergab letztendlich einen positiven Test mit Hinblick auf die Heumöser Hang Bewegungshypothese, da die gemessenen hydraulischen Durchlässigkeiten groß genug erscheinen, um eine hohe laterale Untergrundströmung am Hang über ver-

bundene Makroporen und Risse zu ermöglichen. Es ist sogar davon auszugehen, dass die Aufnahmefähigkeit für Wasser und die Durchflussleistung so hoch ist, dass ein Sättigungsüberschuss-Oberflächenabfluss voraussichtlich nur sehr selten vorkommt, so dass man von einer Hemmung des Oberflächenabfluss durch die Makroporen sprechen kann. Allerdings basiert diese Argumentation auf Messergebnissen von nur einer Probe mit K_{sat} -Werten bis ca. 570 cm d^{-1} (im oberflächennahen Untergrund). Bei weiteren Proben wären leicht abweichende Ergebnisse zu erwarten. Aufgrund der relativ großen Probengröße wird aber doch generell an diesem Standort ein sehr hohes laterales Flusspotenzial aufgezeigt.

Die durchschnittliche vertikale hydraulische Durchlässigkeit ist ungefähr zweimal höher als die laterale hydraulische Durchlässigkeit; aber beide sind sehr hoch. Somit unterstützt die Studie die Ergebnisse von Lindenmaier et al. (2005) und Wienhöfer et al. (2009), die lateralen „stormflow“ im gleichen Bereich des Heumöser Hanges beschrieben haben, wobei dies auf der Grundlage von Untersuchungstechniken wie Quellwasser-Ausfluss-Analysen mit schnellen Reaktionszeiten auf Niederschlagsereignisse und Großabstands-Tracer-Experimenten geschah.

Obwohl bei der Probennahme auf größte Sorgfalt geachtet wurde, um Probenmaterialbrüche und andere Störungen zu vermeiden, können durch Trocknungsprozesse oder durch Beeinträchtigungen beim Ab- und Durchtrennen der Proben eventuell leichte Störungen aufgetreten sein. Darüber hinaus ist der Bereich der untersuchten Hangflanke des "Heumöser" Hanges wahrscheinlich selbst nicht homogen. Daher wäre eine größere Anzahl von solchen Proben nötig, um zu einer endgültigen Schlussfolgerung zu gelangen.

Multi-Step-Outflow-Experimente an zylindrischer Bodensäule:

1. Auch im Zusammenhang mit den Multi-Step-Outflow-Experimenten an der zylindrischen Bodensäule ergab sich die Möglichkeit, K_s -Werte zu bestimmen. Mit der Erweiterung des eigentlichen MSO-Experiments zu einem XMSO-Experiment mit einer Überstauphase vor der eigentlichen Entwässerung konnten bessere Informationen zu den bodenhydraulischen Eigenschaften bei und nahe Sättigung erfasst werden. Ausge-

hend vom Wasser-Überstau an der oberen Säulenoberfläche wurde am unteren Ende der Säule Ausfluss ermöglicht, dabei sank der Überstau-Wasserspiegel, während das Wasser im vollgesättigtem Porenraum durch die Säule perkolierte. Dadurch konnten unter Verwendung einer inversen Simulation mit der „Free-form“-Methode und mit der Anwendung der „Falling head“-Methode die Gesamtdurchlässigkeit geschätzt und berechnet werden. Hierbei zeigte sich, dass die Methoden (angewandt an den selben Säulenproben) unterschiedliche K_s -Werte von ca. 4 cm d^{-1} („Free-form“-Methode) und ca. 10 cm d^{-1} („Falling head“-Methode) für die Gesamtsäule (ca. 60 cm hoch) ergaben. Das deutet daraufhin, dass es methodische Unterschiede gibt.

2. Hingegen zeigen die K_s -Werte (für die Gesamtsäule) von 4 bis 10 cm d^{-1} auch eine starke Diskrepanz zu den K_s -Messungen an der quadratischen Säule mit K_s -Werten $> 1000 \text{ cm d}^{-1}$. So dass hier wiederum ein methodischer Unterschied bestehen könnte zwischen Konstant-Durchfluss-Methode und den zuvor genannten Methoden. Wahrscheinlicher ist aber, dass der Unterschied durch die verschiedenen Proben entstand. Obwohl sie ca. 50 cm voneinander entfernt gewonnen wurden und ähnlich groß sind, muss ein unterschiedlicher Makroporenanteil am Gesamtvolumen bestehen, so dass gesagt werden kann, dass insgesamt am Probennahmeort eine starke K_s -Variabilität verknüpft ist mit einer starken Variabilität des Makroporenvorkommens.
3. Aufgrund der tiefenbezogenen Porenwasserdruckmessungen mit den Tensiometern konnte bei der zylindrischen Säule während der Perkulationsphase der Gesamtsäule für jedes Einzelexperiment K_s ermittelt werden. Dabei zeigte sich, dass die Durchlässigkeit etwa von ca. 120 cm d^{-1} auf ca. 1 cm d^{-1} von oben nach unten abnahm, wenn nur die vier Viertelmodule, ausgewertet mit der „Free-form“-Methode, betrachtet werden. Nach Halbierung und Viertelung der Gesamtsäule, zeigt sich auf Basis einer „Falling head“-Auswertung von den vier Einzelproben A (oben) bis D (unten) eine ähnliche Abnahme der Durchlässigkeiten aber insgesamt höhere Durchlässigkeit von ca. 207 cm d^{-1} bis ca. 7 cm d^{-1} . Die mit beiden Methoden geschätzten/ermittelten K_s -Werte für die Einzelmodule nahmen von oben nach unten hin deutlich ab, wobei jeweils Modul C eine höhere Durchlässigkeit als Modul B aufwies.

4. Die Berechnungen zu den Durchlässigkeiten aus den Halbmodulen weichen deutlich von denen der Viertelmodule und der Gesamtsäule ab. Ein Zusammensetzen entsprechend hintereinander gereihten Widerständen von AB und CD ergibt nicht die ermittelte Durchlässigkeit von ABCD. Allerdings ergibt bei gleicher Betrachtung die Berechnung von A, B, C und D zu ABCD bei beiden Methoden ein passenderes Ergebnis.
5. Die Abnahme der K_s -Werte ist mit einer Abnahme des Makroporenanteils von oben nach unten zu erklären. So konnte die Abnahme der Makroporosität auch schon qualitativ während des Ausgrabens und beim Hantieren mit den Proben gesehen werden.
6. Mit den MSO-Versuchen war es möglich, invers mittels „Free-form“-Ansatz Funktionspunkte zu schätzen, mit denen die hydraulischen Retentions- und ungesättigten Durchlässigkeitskurven abgebildet werden konnten. Die ungesättigten Durchlässigkeitskurven beginnen bei maximaler Sättigung mit Werten entsprechend der K_s -Schätzungen wie zuvor benannt (teilweise $\gg 1 \text{ cm d}^{-1}$). Allerdings zeigte sich, dass schon mit Beginn der Probenentsättigung leicht im ungesättigten, die Durchlässigkeiten stark abnahmen. Bei Probe AB (oberer Hälfte der halbierten Gesamtsäule) z.B. nimmt der Wassergehalt von ca. 0,57 auf 0,5 ab, wobei gleichzeitig die Durchlässigkeit von $>20 \text{ cm d}^{-1}$ auf ca. $0,2 \text{ cm d}^{-1}$ abnimmt. Ein ähnlicher Durchlässigkeitsverlust mit Einsetzen der Entwässerung im Mittel um ca. zwei Größenordnungen zeigte sich mehr oder weniger bei allen Proben.
7. Während die Durchlässigkeit um ca. zwei Größenordnungen abnahm, wurde die Probe entwässert; diese Entwässerung fand aber bei allen Proben mit einer auffällig geringen Porenwasserdruckveränderung statt. So entwässerten die Proben, insbesondere die oberen, um bis zu $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, während die Porenwasserdrücke von 0 cm auf „nur“ ca. -25 cm fielen. Die „große“ Entwässerung bei gleichzeitig geringen Porenwasserdruckänderungen spiegelt die Makroporenentleerung wieder, denn solange die Makropore entleert werden, bleibt in der Matrix eine hohe Sättigung, die entsprechend mit Porenwasserdrücken nahe Null verknüpft sind.

8. Beim Vergleich der hydraulischen Kurven ergibt sich insbesondere bei den Retentionskurven der visuelle Anschein, dass sich aus den Kurven der Teilmodule bei „Verschmelzung“ dieser Kurven die hydraulische Funktionskurve des aus den Teilmodulen zusammengesetzten Langmoduls ergibt. So zeigt sich z.B., dass die Retentionskurve der Halbsäulenprobe CD (Probenhöhe = 30 cm), abschnittsweise genau zwischen den Retentionskurven der Viertelmodule C und D (Probenhöhe je = 15 cm) verläuft und quasi die CD-Kurve eine Mittelwertlinie bildet. Ähnlich lässt sich diese Beobachtung auch bei Betrachtung der Kurven zu Modul AB vs. A und B und ein wenig auch bei Modul ABCD vs. A, B, C und D machen. Hier wird deutlich, dass hinter der effektiven „mittleren“ Gesamtkurve für ABCD sich ein weites Spektrum an Retentionseigenschaften „verbirgt“.
9. Insgesamt ist die Wasserretention aller Proben sehr hoch, was entsprechend der Kornzusammensetzung zu erwarten war. Das heißt, dass die Wassergehalte auch bei „mittlerem“ Porenwasserdruck (ca. -600 cm) noch sehr hoch sind (bis zu $> 0,4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, was einer Sättigung von ca. 70% bis 80% entspricht). Es ist zu erwarten, dass der Boden am Hang eigentlich immer feucht bis sehr feucht ist, aber zwischen diesen beiden Abstufungen kann durchaus ein Wassergehaltsunterschied von $0,1$ bis $0,2 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ liegen (richtig trocken wird es wohl nie).

Schlussfolgerungen

Im Gegensatz zur reinen K_s -Messung bei der quadratischen Bodensäule hatten die XMSO-Experimente zum Ziel, die ungesättigten bodenhydraulischen Eigenschaften (Retentionskurven und ungesättigte hydraulische Durchlässigkeiten) an ungestörten und makroporösen Bodensäulenproben vom Heumöser Hang in vertikaler Fließrichtung tiefenorientiert zu ermitteln. In der MSO-Phase (also wenn die Makroporen entleert waren) wurde während der Messung ausschließlich das Matrixmaterial erfasst (Mikroporen). Die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit des Matrixmaterials ist niedrig; ca. im Bereich von 10^{-6} bis 10^{-7} m s^{-1} (zwei Größenordnungen unter der Durchlässigkeit, die gemessen wird, wenn die Makroporen mit am Durchfluss beteiligt sind). Noch stärker nimmt die Durchlässigkeit des Matrixmaterials in den Bereich von 10^{-8} m s^{-1} und kleiner ab, sobald sein Zustand weiter ins Ungesättigte fällt.

Insgesamt war die Untersuchung der Goßproben eine gute Möglichkeit und vermutlich eine Notwendigkeit, um die Durchflusswirksamkeit von Makroporen ausreichend repräsentativ zu erfassen. Mit der Studie konnte deutlich aufgezeigt werden, dass sich durchaus hinter effektiven Eigenschaften (Gesamtsäule) eine große variable Bandbreite an lokalen Eigenschaften (Teilproben) befindet. Ein Nachteil der Untersuchung war die lange Versuchsdauer, die sich aufgrund der Probengröße und der feinen Textur mit geringer Entwässerungskapazität bei gewählten Unterdruckstufen ergab.

Evaporationsexperimente an Bodensäulenteilstücken:

1. Mit der hier vorgestellten erweiterten Evaporationsmethode (XEVA) ergeben sich zwei Vorteile. Zum einen können in der Überstauphase, die der eigentlichen Bodenwasserevaporation vorausgeht, die Tensiometer unter statischen Grundwasserbedingungen genau „offset“-korrigiert werden. Zum anderen konnte der Moment vollständiger Probensättigung anhand der Porenwasserdruckmessungen genau festgestellt werden. Denn zumindest bei dem hier vorhandenen lehmigen Boden ergab sich ab dem Moment, bei dem die Überstauwasserspiegelabsenkung die Probenoberfläche exakt erreichte, eine deutlich schnellere Porenwasserdruckminderung als während der reinen Überstauwasserevaporation.
2. Auffällig bei fast allen Messungen war, dass zu Beginn in den ersten Stunden und am ersten Tag der Evaporation teilweise sehr hohe Evaporationsraten von $> 1 \text{ cm d}^{-1}$ gemessen wurden. Dies lag zum einen evtl. an den verwendeten Ventilatoren, die die Evaporation beschleunigen sollten. Zum anderen sind hier auch Effekte von Makroporen und Rauigkeit im Mikrorelief der Bodenoberfläche möglich, die eine stärkere Evaporation zuließen, denn durch Makroporen und kleinen „Gruben“ im Mikrorelief ergibt sich eine größere Grenzfläche zwischen Wasser und Atmosphäre, die die Evaporation begünstigen könnte.
3. Insgesamt war die Evaporationsphase mit ca. fünf Tagen bei der mindestens zwei eingesetzte Tensiometer gleichzeitig funktionierten, sehr kurz, weil das jeweils obere Tensiometer schnell an seine Messgrenze von ca. -1000 cm kam. Somit ergaben sich teilweise sehr wenige Messpunkte für die hydraulischen Durchlässigkeits-Kurven und

teilweise auch für die Retentionskurven, die im Schnitt der vier untersuchten, bis zu 15 cm hohen Modulproben nur von ca. 0 cm bis ca. -400 cm Porenwasserdruck reichten. Das heißt, dass insgesamt nur einem kleinen Abschnitt des Wassergehaltsspektrums ein Porenwasserdruck zugeordnet werden konnte. So ergaben sich bei den Porenwasserdruck-Endpunkten der Retentionskurve bei ca. -400 cm immer noch in der Probe „große“ Mengen verbleibende Wassergehalte von ca. $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ bis $0,45 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (ca. 60 bis 70% Sättigung in Bezug zu Vollsättigung).

4. Zusätzlich zu den Retentionskurven, die nur für einen kleinen Feuchtebereich erfasst werden konnten, ergab sich für die Durchlässigkeit zusätzlich zur Begrenzung der Informationen hin zum Trockenerem noch, dass aufgrund zu geringen Druck-Gradienten zwischen den Tensiometern im Bereich von Sättigung und nahe Sättigung keine Durchlässigkeiten berechnet werden konnten. Womit sich eine Schwäche der Evaporationsmethode nahe Probensättigung zeigt.
5. Ein weiterer Nachteil der Evaporationsmethode, der in der bisher veröffentlichten Literatur nicht besonders beachtet wurde, ist, dass sich bei den vorhandenen „hohen“ und lehmigen Proben, ausgehend von Sättigung auf Basis des Mittelwerts, zwischen oberen und unteren Tensiometern positive Porenwasserdruckwerte ergeben (+7,5 cm Porenwasserdruck im statischen gesättigten Probenzustand bei 15 cm hohen Modulproben mit am unteren Rand +15 cm und oben an Probenoberfläche 0 cm). Auch mit Vorranschreiten der Evaporation kurz nach Evaporationsbeginn ausgehend von Sättigung ergeben sich insbesondere auch durch die hier verwendete Probenhöhe positive mittlere Porenwasserdruckwerte (zwischen 0 cm und +7,5 cm). Während aber positive mittlere Porenwasserdrücke ermittelt werden, findet gleichzeitig schon eine Probenentwässerung statt. Da aber definitionsgemäß die Retentionskurve so beschrieben wird, dass Vollsättigung einem Porenwasserdruck von 0 cm zugeordnet sein muss, ergibt sich hier also ein systematischer Fehler, weil +7,5 cm der Vollsättigung zugeordnet wird und ebenso gegen die Definition, dass mit Entsättigung negative Porenwasserdrücke einhergehen, teilweise hier aber immer noch positive Porenwasserdrücke gemessen werden.

6. Im gleichen Zusammenhang ergibt sich ein weiteres Problem bezüglich der Mittelwertbildung aus oberem und unterem Tensiometermesswert, denn je nach Verwendung der Mittelwertbildungs-Methode ergeben sich unterschiedliche Mittelwerte. So ist nicht selbstverständlich, dass die hier verwendete geometrische Mittelwertbildung unbedingt die richtigere ist. Denn eine arithmetische Mittelwertbildung wäre ebenso durchführbar. Zusätzlich ist die geometrische Mittelwertbildung eher nachteilig in Bezug zu den im Absatz zuvor beschriebenen positiven Porenwasserdrücken zu Beginn der Evaporation, denn sobald, z.B. das untere Tensiometer noch positive Werte anzeigt und das obere schon negative, kann kein geometrisches Mittel gebildet werden (bzw. es ergibt sich wegen der Wurzelrechnungen Null).
7. Darüber hinaus besteht bei der hier vorgestellten Auswertungsmethode der Unterschied zur Schindler-Methode darin, dass zur Beschreibung der Retentionskurve die Wertepaare zum Zeitpunkt genau zwischen zwei Messungen genommen wurden, statt die direkten Wertepaare zu einem Messzeitpunkt. Dieses weil zur Festlegung von Durchlässigkeiten schließlich auch der errechnete Fluss vom einem zum nächsten Messzeitpunkt auf den Zeitpunkt genau zwischen den Messzeitpunkten gelegt wird.
8. Durch Überlegungen zu möglichen Änderungen der Wassergehaltsverteilung im Profil durch einen einsetzenden Evaporationsprozess, konnte die Vermutung aufgestellt werden, dass sich die Wassergehalts- und Porenwasserdruckverteilung im Profil bei Anwesenheit von Makroporen anders verändert, als wenn keine Makroporen vorhanden wären. Die Evaporation an der Oberfläche wirkt wie ein sehr schwaches „Ansaugen“ und wirkt sich direkt auf das durch Kapillarwasser verbundene Porennetzwerk der gesamten Probe aus (sofern die Probe nicht zu hoch ist). Die an der Probenoberfläche ansetzende „Ansaugung“ wirkt sich zwar abgeschwächt aber unmittelbar auf in der Tiefe liegendes Porenwasser aus, indem sich dort auch eine leichte Entsättigung mit leicht negativen Porenwasserdrücken bildet. Die Evaporation findet statt mit dem Wasser, das in den feinsten Poren ist, und somit eh schon kapillar der Evaporationsoberfläche entgegen kommt (Kapillaraufstieg), weil dann am wenigsten „Evaporationskraft“ benötigt wird. Bei Anwesenheit von Makroporen ergibt sich zu Beginn der Evaporation ausgehend von Probenvollsättigung ein vermutlich anderes Bild. Wasser evaporiert hier auch an der Matixoberfläche heraus und in minimalem

Umfang evaporiert auch das Makroporenwasser direkt zur Atmosphäre. Das Makroporenwasser ist quasi mit dem Matrixwasser verbunden und sie bilden einen zusammenhängenden gesättigten Bereich unterhalb des Wasserstandes in der Makropore (Makroporenwasserspiegels). Diesen gesättigten Bereich kann die Evaporationskraft nur Absenken, indem Wasser von den Makroporen in die umgebende Matrix nachgeliefert wird, sich zwar somit der Makroporen- bzw. Grundwasserspiegel senkt, aber die Evaporation nicht in den Tiefe des gesättigten Bereiches hineinwirken kann.

9. Dieser Einfluss durch initial vollständig gefüllte Makroporen auf die Wassergehalts-/Porenwasserdruck-Verteilung im Probenprofil ist vermutlich bei den rundum geschlossenen Probenbehältern (ausser oben) besonders deutlich. Also eine Situation wie in einer Schale oder einem Becher, wie sie so in der Natur eher nicht vorkommt oder zumindest nur teilweise vorkommt. In der Natur ist davon auszugehen, dass die Makroporen sich in die Tiefe des Bodens entleeren können, also das Wasser überwiegend nicht lange in einer Makropore steht. In geringem Umfang könnte dennoch der Effekt von Makroporenwasser auf das Evaporationsgeschehen vorhanden sein, wenn die Makroporen sich in hoch gesättigter Bodenmatrix oberhalb eines „Stauer“ befinden oder die Makroporen sich nach unten hin verzweigen und geschlossen sind und deshalb Wasser länger in der Makropore stehen bleibt.
10. Über die mit der Evaporationsmethode ermittelten Retentionskurven, lässt sich erkennen, dass im Bereich nahe Sättigung die Probe stark entwässert wurde, während sich die Porenwasserdrücke nur wenig zum Negativen hin veränderten. Die Entwässerung in diesem Bereich ist überwiegend eine Makroporenentleerung. Unter der zuvor beschriebenen Theorie zur Absenkung des Grundwasserspiegels durch Evaporation bei Anwesenheit von Makroporen ergibt sich ungefähr bei Erreichen des Grundwasserspiegels der Probengrundfläche unten in der Probenmitte ein Porenwasserdruck von -7.5 cm. Das heißt, dass bis ca. -7,5 cm Porenwasserdruck überwiegend Makroporen entleert wurden (in geringen Umfang auch Matrixwasser, da ja oberhalb des Grundwasserspiegels schon leicht ungesättigte Bedingungen herrschten). Der Makroporenanteil ist also schon erkennbar durch den Anteil der Retentionskurve, der im Bereich von ca. 0 cm bis ca. -7,5 cm verläuft.

Schlussfolgerungen

Die Untersuchung der hier verwendeten Großproben für MSO- und EVA-Methoden war eine experimentelle Herausforderung, zum einen durch die nicht routinemäßige Probennahme zum Erhalt von natürlich ungestörten Proben und zum anderen aufgrund der kompletten Neuentwicklung der probengrößenangepassten Versuchsaufbauten und der speziellen eigenentwickelten Messtechnik. Die „große“ Probengröße wurde gewählt, weil der Boden am untersuchten Standort sich besonders durch die Makroporosität und einen sehr hohen Tongehalt (Lehmboden) auszeichnet. Vergleichbare Proben wurden, so weit mir bekannt, in dieser Weise noch nicht untersucht.

Neue Erkenntnisse, die einen möglichen Einfluss von Makroporen auf das Evaporationsgeschehen zeigen, konnten hier aufgrund des gewählten besonderen Probenotypus gewonnen werden. Neben den neuen Entdeckungen konnten bei den verwendeten Proben die auch schon zuvor in der Literatur beschriebenen Schwächen der Evaporationsmethode im Bereich nahe Sättigung bestätigt werden, bzw. es konnte aufgezeigt werden, dass durch eine hohe Probenhöhe, wie sie hier verwendet wurde, die Auswertungsmöglichkeit nahe Wassersättigung im Vergleich zu flacheren Proben nochmals weiter eingeschränkt wird.

HYPROP - Evaporationsexperimente an Kleinzylinder-Bodenproben:

1. Mit der sogenannten HYPROP-Methode wurden Retentions-Wassergehalts- und Durchlässigkeits-Wassergehaltsbeziehungen entsprechend der zuvor beschriebenen Evaporationsmethode ermittelt. Die zylindrischen Proben waren 5 cm hoch und 8 cm im Durchmesser. Die Messdauer während der Evaporationsphase betrug drei bis fünf Tage, bis das jeweils obere Tensiometer nicht mehr funktionierte. Trotz der kurzen Zeit konnte die Auswertung für den Porenwasserdruckbereich von ca. 0 cm bis ca. -1000 cm stattfinden. Das lag zum einen daran, dass die Tensiometer erst bei Porenwasserdrücken von ca. -1500 cm ausfielen (statt der ca. -1000 cm bei den Evaporationsmessungen bei den größeren Modulproben), und zum anderen, weil die Tensiometermesspunkte entsprechend der niedrigeren Höhe der Probe enger beieinander lagen ($\Delta z = 2,5$ cm) und somit „länger“ Porenwasserdruck-Mittelwerte gebildet werden konnten. Hier zeigt sich durch die vermutlich „besseren“ Tensiometer, die in der HYPROP-Apparatur der Firma UMS eingebaut sind, und der kleineren Probenabmes-

sungen ein Vorteil gegenüber den größeren Modulproben und den darin verwendeten selbst gebauten Tensiometern.

2. Neben der kurzen Messdauer bei gleichzeitiger Abdeckung eines größeren Feuchtebereichs sind hier die Vorteile der HYPROP-Methode auch in der dazugehörigen Software HYPROP-Fit zu sehen, mit der es möglich war, komfortabel die Daten zu verarbeiten und darüber hinaus die ermittelten hydraulischen Beziehungen über verschiedene Funktionsansätze zu parametrisieren.
3. Zu Beginn der Evaporation bei den Kleinproben wurden auch Evaporationsraten ermittelt, die etwas höher lagen als die durchschnittliche konstante Evaporationsrate von ca. $0,5 \text{ cm d}^{-1}$ in der „Stage 1“-Evaporationsphase. Insbesondere die Probe A, bei der aufgrund der Retentionskurve der größte Makroporenanteil abgelesen werden kann, hatte zu Beginn deutlich höhere Evaporationsraten von $> 1 \text{ cm d}^{-1}$. Bei den HYPROP-Messungen wurde im Gegensatz zu den Messungen an den großen Modulproben kein Ventilator verwendet. Das spricht für die Vermutung, dass die Makroporen initial hohe Evaporationsraten begünstigen könnten.
4. Obwohl die ablesbaren Makroporenbereiche an den Retentionskurven bei den Kleinzylinderproben nicht so ausgeprägt sind (Ausnahme Probe A) wie bei den Großproben, handelte es sich auch bei den Kleinproben um Proben mit Makroporosität. Abgeschwächt nimmt auch hier die Makroporosität von oben nach unten ab, wie bei den zuvor beschriebenen Großproben. Ein Indiz für die Abnahme der Makroporosität ist die bessere Güte der hydraulischen Funktionen, die mit HYPROP-Fit an die Messungen angepasst wurden. Die Güte nimmt von oben (Probe A) hin nach unten (Probe D) zu. Da die verwendeten „Fitting“-Ansätze generell schlechtere Ergebnisse liefern, sobald die Makroporosität der Proben zunimmt und umso besser funktionieren, sobald die Probe aus reiner Matrix (am besten noch aus homogener Matrix) besteht. Die guten Fitting-Ergebnisse sind bei Probe D damit zu erklären, dass diese eher wenige Makroporen und eine homogenere Matrix besaß.
5. Ein Nachteil der kleinen Probenabmessungen ergibt sich im Zusammenhang mit der Repräsentativität bezüglich der Abschätzung des Makroporenanteils. Bei den Klein-

proben zeigten sich nicht immer Abschnitte auf der Retentionskurve, bei denen mit Beginn der Entsättigung große Wasserverluste mit minimalen Druckveränderungen einhergingen (wie sie typisch für Makroporenwasseranteile sind). Somit eher zufällig mal eine geringere und mal eine größere Makroporosität erfasst wurde, so wie es bei den Großproben nicht so ausgeprägt war, weil das Probenvolumen der Großproben so groß ist, dass diese quasi die mittleren Eigenschaften von vielen Kleinproben in sich trugen und die Makroporosität effektiver abbildeten.

Schlussfolgerungen

Die HYPROP-Methode ist, zumindest bei dem hier verwendeten Boden, schneller und zeigte eine bessere (weitere) Erfassung der bodenhydraulischen Eigenschaften als bei den EVA-Großproben-Untersuchungen. Bezogen auf die Bodenmatrix konnten ähnliche Eigenschaften wie bei MSO- und EVA-Großproben-Untersuchungen festgestellt werden. Im Gegensatz dazu ist davon auszugehen, dass bezüglich der Struktur (Makroporen) keine ausreichende Standortrepräsentativität ermittelt wurde, und somit ist generell davon auszugehen, dass mit Kleinproben Bodenstrukturen nicht ausreichend erfasst werden können.

2.5.2 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Kapitel wurden bodenhydraulische Eigenschaften in Bezug zu einem makroporösen Bereich des Heumöser Hang ermittelt. Diese Ermittlung erfolgte unter Anwendung von Durchlässigkeits-, Multi-Step-Outflow- und Evaporations-Experimenten an zwei entnommenen ungestörten „großen“ Bodenproben (Bodensäulen ca. 30 cm breit und ca. 60 cm hoch) und an vier ungestörten „kleinen“ Bodenproben (Kleinzylinder ca. 8 cm im Durchmesser und ca. 5 cm hoch).

Die an den Proben festgestellten bodenhydraulischen Eigenschaften lassen sich sehr deutlich charakterisieren. So ergibt sich zum einen eine hohe hydraulische Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und eine sehr geringe „sprunghaft“ abgenommene Durchlässigkeit bei ungesättigten Zuständen. Das hängt damit zusammen, dass im gesättigten Zustand die Makroporen voll durchflusswirksam sind und der Makroporenfluss somit den Gesamtdurchfluss dominiert, quasi die Matrix in einer „Bypass“-Situation umströmt. Mit „geleerten“ Makroporen schon bei leicht ungesättigten Zuständen ist der Gesamtdurchfluss um ca. zwei Größenordnungen

kleiner als bei gesättigten, makroporengefüllten Zuständen. Bei noch stärker ungesättigten Zuständen fällt die Durchlässigkeit auf ein sehr niedriges Niveau, so dass nur noch minimale Wasserbewegungen zu erwarten sind.

Ferner wurde festgestellt, dass die Bodenproben im gesättigten Zustand hydraulisch gesehen leicht anisotrop sind, da die vertikale gesättigte Durchlässigkeit etwa zweimal so hoch ist wie die laterale Durchlässigkeit.

Bei der Vielzahl der im Abschnitt zuvor aufgeführten Punkte, die teilweise Einzelbeobachtungen zu detaillierten Aspekten der Methoden sind, konnte erkannt werden, dass es noch viele kleinere „Baustellen“ zu bearbeiten gibt, um die Methoden noch zu verbessern.

Insgesamt zeigte sich aber, dass die HYPROP-Methode besonders zeitsparend ist, weil die Proben kleiner sind, diese daher einfacher zu gewinnen sind, die Messungen daher zeitlich kürzer sind und zusätzlich eine komfortable Auswertesoftware zur Verfügung steht. Allerdings bringt die HYPROP-Methode auch den Nachteil mit sich, dass gerade in dem hier für die Heumöser Hang-Studie so wichtigen Bereich nahe und bei Sättigung nicht ausreichend Informationen zur Durchlässigkeit vorhanden sind. Zusätzlicher Nachteil der HYPROP-Methode in der vorliegenden Studie ist die Nichtrepräsentativität der „kleinen“ Probengröße bezüglich des Makroporen-/Groporenanteils. Somit konnte nicht ausreichend die Makroporosität des Hangbodens abgebildet werden. Insgesamt aber ist eine abgewandelte Form der HYPROP-Methode für die Zukunft durchaus denkbar, hierbei sollte zum einen die Probe größer sein, dabei aber eher breiter als höher, um mehr Repräsentativität zu erhalten, und sie sollte zum anderen mit Einzelmessungen der hydraulischen Durchlässigkeit an der selben Probe bei Sättigung kombiniert werden.

3 Makroporenfluss-Experimente: Ermittlung von Makropore-zu-Matrix-Wassertransfer

Wesentliches Ziel der in diesem Kapitel beschriebenen Experimente war die Untersuchung des Wassertransferprozesses ausgehend von einer Makropore in eine umgebende Sand-Matrix in einem „idealisierten“ Labor-System, wobei Wasser ausschließlich über eine künstliche Makropore in das System gelangen konnte. Die Grundidee des Experimentes ist in Abb. 3.1 skizziert.

Folgende Detailhypothesen wurden dazu aufgestellt:

- Hypothese 1: Bei trockener Makroporenumgebung kann der Makroporenfluss stark minimiert werden, weil die ungesättigte Matrix über Saugkräfte viel Wasser aufnehmen kann. Ein stark minimierter oder gar komplett von der Matrix aufgenommener Makroporenfluss führt dazu, dass kein nennenswerter vertikaler Abfluss entsteht, sich also entsprechend der Hangbewegungsthese kein Grundwasseranstieg und Porenwasserdruck in der Tiefe des Hanges aufbauen kann.
- Hypothese 2: Im Umkehrschluss von Hypothese 1 führen hohe Infiltrationsraten und/oder hohe Wassersättigungen der Matrix zu einem schnellen und hohen Makroporenfluss in die Tiefe und zu geringem Wassertransfer von Makropore zu Matrix. Entsprechend der Hangbewegungshypothese kann es unter diesen Bedingungen zu einem schnellen Porenwasserdruckanstieg kommen und es könnte dadurch eine Hangbewegung ausgelöst werden.

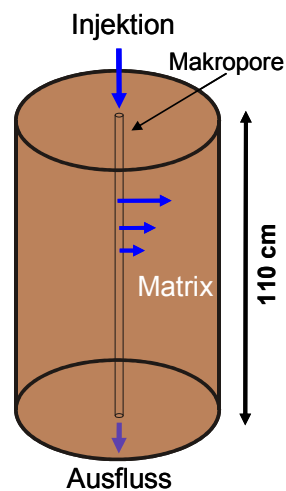


Abb. 3.1: Skizziertes dreidimensionales Versuchsschema zum Experiment „Makroporenfluss“; in der Mittelachse eines Zylinders ist eine gerade und vertikale Makropore in einem porösen Medium eingebettet, ausgehend von der Makropore kann Wasser radialsymmetrisch in die umgebende Matrix transferieren; ausschließlich die Makropore wird mit Wasser beschickt, am unteren Ende kann das Wasser frei aus der Makropore austreten (nicht aus der Matrix).

3.1 Einführung

Beven und Germann (1982, S. 1311) formulierten die Frage: „How does water in a macropore interact with water in the surrounding soil?“ (Wie interagiert das Wasser in einer Makropore mit dem Wasser des umgebenden Bodens?). Die Autoren und viele andere haben diese Fragestellung untersucht und so wuchs die Anzahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu präferentiellen Fließprozessen und Makroporenfluss in den letzten drei Jahrzehnten rapide an. Jarvis (2007) schätzte im Jahr 2007 eine Menge von über 800 relevanten Publikationen zum Thema Nicht-Gleichgewichtsfluss in Bodenmakroporen. Die meisten Veröffentlichungen basieren auf Felduntersuchungen und beschreiben Modellierungsansätze mit dem Ziel, Stofftransport verstehen und beschreiben zu können.

Die Anzahl von relevanten Publikationen zu experimentellen Laborstudien mit gepackten porösen Medien und künstlichen exakt definierten Makroporen dagegen ist sehr gering. Aber gerade die experimentellen Laborstudien sind besonders wichtig, weil sie die Möglichkeit eröffnen, einzelne Aspekte des in der Natur überwiegend komplex verlaufenden Makroporen-

flusses isoliert zu betrachten. Makroporen treten in verschiedenen Geometrien auf, insbesondere in verschiedenen Durchmessern und Längen sowie in unterschiedlichen Verbundenheiten, das heißt als Einzelmakroporen oder in Porennetzwerken oder auch mit dem wichtigen Unterschied, ob sie im Boden „eingeschlossen“ sind oder ob sie direkt mit der Atmosphäre verbunden sind. Die Herkunft von Makroporen ist vielfältig und reicht von biologischen Aktivitäten, die z.B. zu abgestorbenen Wurzelkanälen oder Wurmgingen führen, bis hin zu physikalisch-chemischen Prozessen, durch die sich z.B. Schrumpfungsrisse oder Bruchspalten bilden.

Einen allgemeinen Überblick über Nicht-Gleichgewichtsfluss und die Effekte, die durch Makroporen und makroporöse Strukturen in Böden entstehen, geben unter anderen Beven und Germann (1982), Gerke (2006) und Jarvis (2007). Beven und Germann (1982) und Jarvis (2007) fokussieren auf ein Verständnis der Prozesse in makroporösen Böden. Sie diskutieren, was Makroporenfluss ist und wie er durch verschiedene Rand- und Anfangsbedingungen und durch verschiedene Bodenmaterialien beeinflusst wird. Der Review-Artikel von Gerke (2006) legt den Fokus auf die direkten Interaktionen zwischen Makropore und umgebender Matrix. Er gibt einen Überblick über die verschiedenen Ansätze, wie die Interaktionen mit Wassertransfertermen beschrieben werden können, wobei insbesondere die Zwei-Domänen- und Zwei-Permeabilitäten-Modellierungsansätze hervorgehoben werden.

Simunek et al. (2003) diskutieren verschiedene Modelle, die den Nicht-Gleichgewichtsfluss (präferentiellen Fluss) in der ungesättigten Zone ansatzweise beschreiben können. Verschiedene Ansätze wie der Einfach-Porositäts-, Zweifach-Porositäts- und der Zwei-Permeabilitäten-Modellierungsansatz sowie der Kinematische-Welle-Ansatz (eingeführt von Jarvis (1994)) werden diskutiert. Die Zwei-Domänen-Modelle koppeln den Wassertransfer zwischen Makropore zu umgebender Matrix (und auch anders herum) durch die Verwendung von Austauschparametern. Es gibt zwei grundlegende Ansätze, um den Wassertransfer zwischen Makropore und Matrix mit einer Abhängigkeitsfunktion mit integriertem Austauschparameter zu beschreiben. Zum einen kann die Funktion als Abhängige den Porenwasserdruck verwenden und zum anderen den Wassergehalt bzw. die Wassersättigung. Unterschiede im Porenwasserdruck und im Wassergehalt zwischen Makropore und Matrix werden dann als treibende Kraft für den Wasserfluss angesehen, wobei große Unterschiede auch zu großen

Gradienten mit entsprechend höheren Wasseraustauschraten führen (vgl. Gerke und van Genuchten, 1993a, 1993b und 1996).

Experimentelle Laborstudien mit Verwendung von künstlich konstruierten Makroporen mit dem Fokus auf die Makropore-Matrix-Interaktionen wurden durchgeführt von Czaper et al. (1992), Buttle und Leigh (1997), Li (1997), Ghodrati et al. (1999), Allaire et al. (2000a und 2000b), Castiglione et al. (2003), Köhne und Mohanty (2005), Akay und Fox (2007), Akay et al. (2008) und Lamy et al. (2009).

Allaire et al. (2000a) zeigten in ihren Experimenten in einer zweidimensionalen flachen Küvette (70 cm hoch und mit lehmigen Material gefüllt), dass nur, wenn die Makropore an der Oberseite (entsprechend einer gedachten Geländeoberkante in der Natur) offen zur Atmosphäre ist und wenn eine Überstausituation entsteht, Makroporen als präferentieller Fließpfad fungieren. Ihre Ergebnisse zeigten visuell (Glasscheibenseite an der Küvette) durch die Verwendung eines Tracers einen 100-fach schnelleren Tracerdurchbruch im Vergleich zum Durchfluss in einem gleichdimensionierten Referenzversuch mit einer oberflächlich zur Atmosphäre hin verschlossenen Makropore. Ähnliche Verlangsamung der Durchbruchzeiten von Chlorid zeigten Czaper et al. (1992) bei einem Säulenversuch mit kontinuierlicher Makropore (unten und oben offen) im Vergleich zu einem Versuch mit oben geschlossener Makropore.

Der Fokus des vorliegenden Kapitels "Makroporenfluss" liegt darauf, den Wassertransfer von Makropore zu umgebender Matrix in einem Laborexperiment kontrolliert zu erfassen in einer ähnlichen Weise, wie Castiglione et al. (2003) und Köhne und Mohanty (2005) es taten. Castiglione et al. (2003) entwickelten einen experimentellen Aufbau, bestehend aus einer Säule mit einer Länge von 75 cm, einem Durchmesser von 24 cm und einer zentralen Makropore mit einem Durchmesser von 0,1 cm. Bei den Experimenten konnte der Makroporenausfluss vom Matrixausfluss getrennt erfasst werden. Köhne und Mohanty (2005) entwickelten ebenfalls einen experimentellen Aufbau, bei dem Makroporen- und Matrixfluss getrennt erfasst werden konnten und der Netto-Wassertransfer zwischen Makropore und Matrix messbar wurde. Castiglione et al. (2003) und Köhne und Mohanty (2005) fanden Strategien, um den Wassertransfer ausreichend mithilfe von verschiedenen Porenwasserdruckabhängigen-

Austauschtermen mit einem Austauschparameter zu beschreiben, um Übereinstimmung von modelliertem und gemessenem Wasseraustausch zu erhalten.

Bei den experimentellen Studien überwiegen die, die in vertikalen Säulen mit unterschiedlichen Durchmessern und zentral integrierten Makroporen durchgeführt wurden.

Ghodrati et al. (1999) fanden, dass der Radius der Säule (also unterschiedliche Matrixausdehnungen) einen Effekt auf den Massenaustausch zwischen Makroporen und Matrix hat. Sie verglichen den Massenaustausch von Säulen mit dem Durchmesser von 5 cm und mit 9 cm und mit einer Höhe von jeweils 45 cm und mit einer Makropore mit einem Durchmesser von 0,32 cm, die sich in der zentralen Achse der Säule befand. Sie zeigten bei Tracer-Durchflussexperimenten mit Fluss von oben nach unten, dass mit größerem Durchmesser die Masse des kumulativ aufgefangenen Nitrats im Makroporenausfluss verringert war, folglich mehr Nitrat von der Makropore in die Matrix übergegangen war. Dieses Ergebnis zeigt klar einen Randeffect, der von dem nah oder entfernter von der Makropore vorhandenem Säulenschaft ausgeht. Das heißt, die Limitierung durch kleine Säulendurchmesser ist eine Limitierung des lateralen Wassertransfers und der Wasserweiterbewegung in der Matrix. Dies ist ein wichtiges Erkenntnis aus den Versuchen auf Basis des gewählten experimentellen Designs. Man kann daraus folgern, dass, wenn möglichst „freier“ lateraler Makropore-zu-Matrix-Wassertransfer und freie Wasserausbreitung in der Matrix gewünscht ist, der Durchmesser der Versuchssäule ausreichend groß gewählt werden muss.

3.2 Material und Methoden

3.2.1 Versuchsaufbau

Ausgehend von der Annahme, dass die Ausbreitung von Wasser in die Matrix von einer senkrecht angeordneten Makropore radialsymmetrisch stattfindet, wurde für die Makroporenfluss-Experimente eine halbzyllindrische Versuchsgeometrie gewählt (Höhe = 120 cm, Radius = 50 cm). Dieser Aufbau hat einerseits den Vorteil der Materialersparnis, andererseits erlaubt er durch die Ausbildung eines „Fensters“ auch eine visuelle Observation der Wasserausbreitung in der porösen Matrix (siehe Abb. 3.2).

Eine künstliche Makropore mit einem Durchmesser von 1 cm wurde aus zwei Schichten Drahtgewebe gewickelt und zentral in die gedachte Achse eines Vollzylinders des halbzyllindrischen Versuchsstandes positioniert (direkt hinter der Scheibe). Die Maschenweite des äußeren Drahtgewebes wurde mit 0,062 mm so gewählt, dass eine Verstopfung der Pore durch feine Bodenpartikel, die aus der umgebenden Matrix in die Makropore eindringen könnten, vermieden wurde. Eine innere festere Drahtgewebeschicht mit einer größeren Maschenweite von ca. 1 mm wurde zur Stabilisierung der künstlichen Makropore benötigt (siehe Abb. 3.3). Die Makropore wurde unten durch den Boden des halbzyllindrischen Behälters herausgeführt. Somit war Wasserausfluss unten aus der Makropore möglich und konnte dabei durch eine untergebaute Kippwaage (KIPP004, mit 4 ml pro Kipp, Firma UMS GmbH, München, Deutschland) in seiner Menge über die Zeit gemessen und mit dem Computer erfasst werden. Mit einem Hahn konnte das untere Ende der Makropore geöffnet (Ausfluss während des Versuchs) oder geschlossen werden (Aufsättigung bei Befüllung).

Auf sechs Tiefenniveaus wurden jeweils vier Tensiometer innerhalb des Niveaus horizontal in den Abständen 2, 6, 14 und 30 cm zur zentralen Makropore zur Messung des Porenwasserdrucks h installiert. Zur Minimierung der Störungen des Wasserströmungsfeldes wurden die Druckaufnehmer der Tensiometer außerhalb des Halbzyllindermantels positioniert, damit lediglich die Schäfte mit den keramischen Spitzen in der Bodenmatrix anwesend sind (siehe Abb. 3.2 links u. rechts). Die verwendeten Tensiometer wurden selbst konstruiert. Dabei kamen „one bar high flow“-Keramiken (Firma Soilmoisture Equipment Corp., Goleta, Kalifornien)

nien) und Druckaufnehmertransmitter (Typ PR-23, Firma KELLER AG für Druckmesstechnik, Winterthur, Schweiz) mit einem Messbereich von -1 bar bis +1 bar und einem typischen Fehlerband von 4 mbar zur Anwendung. Die Spannungsmessungen aus den Druckaufnehmern wurden mit einem USB-LabJack UE9 Daten-Erfassungsgerät (Firma LabJack Corp, Denver, CO) und der Software ProfiLab 3.0 (Firma Abacom Ingenieurgesellschaft, Ganderkesee, Deutschland) durchgeführt. Dabei entsprach ein Spannungswert einem bestimmten Druck entsprechend einer Kalibriergeraden, die für jedes Tensiometer einzeln erstellt wurde, womit die Genauigkeit gegenüber dem angegebenen Fehlerband von 4 mbar erhöht werden konnte.

Zur Einstellung kontrollierter Anfangsbedingungen (Wassersättigung im Versuchsprofil) wurde der Bodenbereich nahe der Grundplatte des Halbzylinders mit Saugrohren aus porösem Siliziumkarbid (Werkstoff HALSIC-R, Firma Haldenwanger, Deutschland) ausgelegt (siehe Abb. 3.2 mitte). Die Saugrohre haben einen Lufteintrittspunkt von ca. 110 mbar. Mit einer an den Saugrohren angeschlossenen Vakuumpumpe (Typ: Vakuüm-Unterdruckpumpe TMT-30 VP3, Firma unbekannt) konnte die untere Randbedingung in einem Bereich zwischen 0 und ca. -110 cm Porenwasserdruck eingestellt werden.

Zur direkten Wasserinjektion in die Makropore wurde eine Peristaltikpumpe (Watson-Marlow 313S, Firma Watson-Marlow GmbH, Rommerskirchen/Anstel, Deutschland) verwendet. Hiermit konnte Wasser aus einem Reservoir angesogen werden und über einen Schlauch direkt in den oberen offenen Zugang der Makropore injiziert werden. Der verwendete Schlauch hatte einen Innendurchmesser von 4 mm und einen Außendurchmesser von 6 mm. Das Schlauchende beim Übergang zur Makropore wurde so verlegt, dass es ein Stück weit in die Makropore hineinreichte und zwar so, dass ausreichend Luftraum zwischen Makroporen-Mantelinnenseite (mit ca. 10 mm im Durchmesser) und Schlauchaußenmantel (6 mm) vorhanden war. Das war wichtig, damit das Wasser nicht in die Makropore hineingepresst wird, sondern frei einlaufen kann und dabei auch noch Luft nach oben hin aus der Makropore entweichen kann. Mit dieser Injektionsmethode konnten bei der hier gewählten Kombination aus Pumpe, Pumpenkopf, Schlauchtyp und Schlauchdurchmesser Injektionsraten von ca. 60 bis 600 ml min⁻¹ realisiert werden.

Der Versuchsstand wurde mit kommerziell erhältlichem Feinsand (Handelsname GEBA, Firma Dorfner, Hirschau, Deutschland) nass gepackt, womit eine Packungsdichte von durchschnittlich $\rho = 1,5 \text{ g cm}^{-3}$ erreicht werden sollte. Dabei wurde die Füllung sukzessive in 5 bis 10 cm Schritten erhöht. Die Makropore war während des Füllvorgangs unten verschlossen (Hahn an der Unterseite). Bei jedem Schritt wurde zuerst ein ca. 2,5 bis 5 cm hoher Wasserüberstau erzeugt und in diesem dann das raumlufttrockene Sandmaterial eingefüllt und eben verteilt. Diese Prozedur wurde bis zu einer Füllhöhe von $> 110 \text{ cm}$ Schritt für Schritt vollzogen (siehe Abb. 3.4). Beim Erstellen der jeweiligen Füllschicht wurde der Sand gestampft, um eine hohe Lagerungsdichte zu erzielen. Anschließend wurde die gerade eingebrachte und gestampfte Schicht wieder mit einer Nagelbrettkonstruktion unter Stampfen und schüttelnden Bewegungen „aufgerissen“ und „aufgewühlt“, um einen Schichtungsgradienten der Sandkörner in der Füllschicht (unten grobe und oben feine Korngrößen) zu reduzieren. Leichte Schichtungen ließen sich dabei aber nicht vermeiden. In Abb. 3.5 sind die Stampfer dargestellt. Sukzessive wurde der Halbzylinder-Behälter bis zu einer Höhe von mehr als 110 cm gefüllt. Nach Entwässerung wurden die Sand-Füllbereiche $> 110 \text{ cm}$ eben heraus genommen, um eine exakte und gleichmäßige Oberfläche zu erhalten. Bis zu der Höhe von 110 cm wurden insgesamt ca. 650 kg trockener Sand eingefüllt, der sich auf einen Behältervolumenanteil von ca. 430 dm^3 (halber Zylinder: Höhe = 110 cm, Radius = 50 cm) verteilte. Der Matrixkörper ist unten durch die Bodenplatte und seitlich durch den Halbzylindermantel und die Scheibe dicht eingeschlossen. An der Oberfläche ist er offen zur Atmosphäre und wurde während einer Versuchsdurchführung am oberen Rand des Zylinders (10 cm über der Matrixoberfläche) mit einem Holzdeckel abgedeckt. Dieser war aber nur „leicht“ aufgelegt, so dass Evaporation stark vermindert wurde, aber gleichzeitig noch so weit luftdurchlässig war, dass Luftbewegung und Luftdruckausgleich möglich waren.

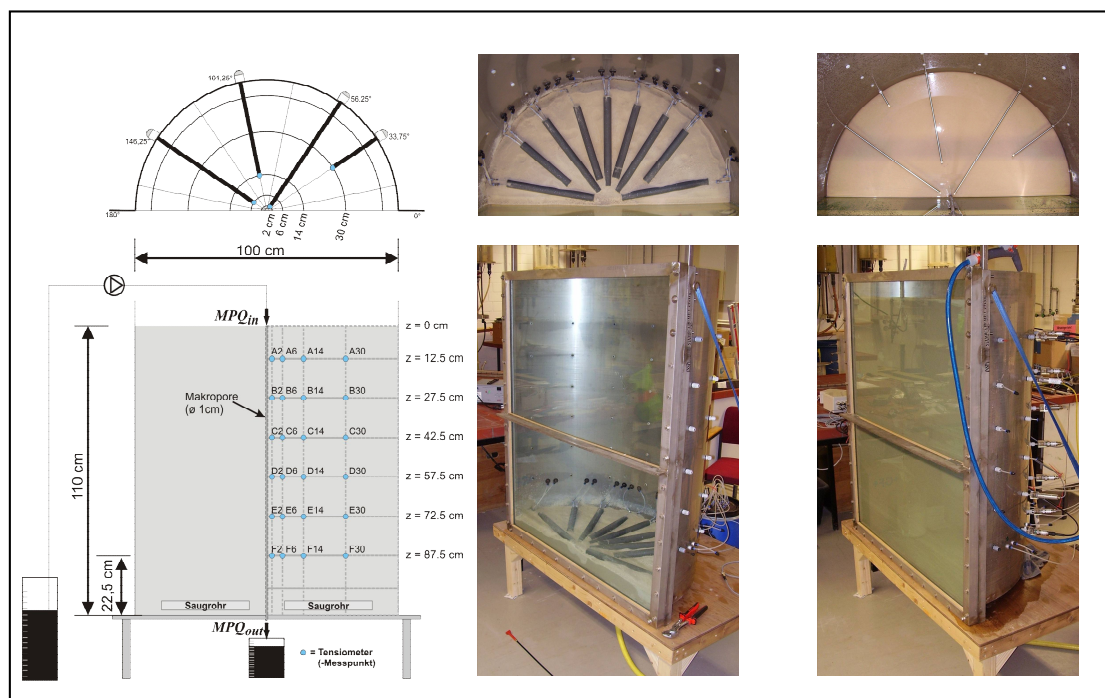


Abb. 3.2: Unten links: Schematischer Aufbau des Versuchsstandes mit eingezeichneten Tensiometermesspunkten in den Abständen 2, 6, 14 und 30 cm zur Makropore und in sechs Tiefenniveaus von A bis F (ins Zweidimensionale an die Fensterfläche projiziert); oben links: Schematische Darstellung der tatsächlichen Tensiometerpositionen innerhalb eines Niveaus (Aufsicht); unten Mitte: Foto von der Einbaulage der Saugrohre am Grunde des Versuchs und Einblick über die Scheibe in den ungefüllten halbzyklindrischer Versuchsbehälter (Anmerkung: Horizontale Strebe in der Mitte zur Scheibenstabilisierung); oben Mitte: Aufsicht auf die Saugrohre; unten rechts: Sandgefüllter halbzyklindrischer Versuchsbehälter mit eingebauten Tensiometern (Tensiometer-Druckaufnehmer aus dem Mantel herausstehend, rechts); oben rechts: Foto: Aufsicht auf die tatsächliche Lage der Tensiometerschäfte innerhalb eines Niveaus während der Befüllprozedur entsprechend dem Schema in der Abbildung oben links.

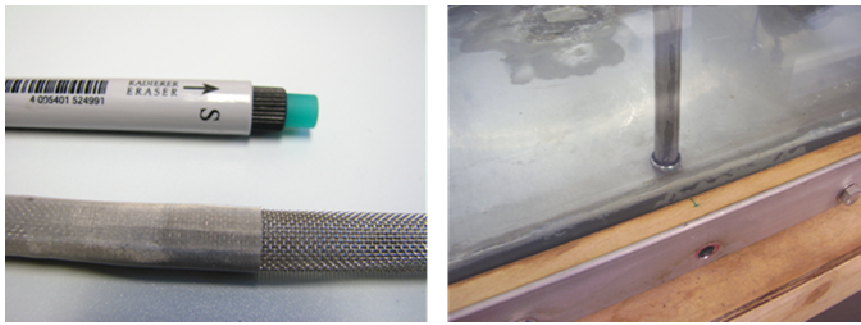


Abb. 3.3: Links: Detailaufnahme der künstlichen Makropore mit einem Durchmesser von einem Zentimeter bestehend aus zwei Schichten Drahtgewebe; rechts: Übergangsstelle der Makropore an der Grundfläche des halbzyklrischen Versuchsbehälters direkt hinter der Scheibe vor der Befüllung des Versuchsbehälters.



Abb. 3.4: In dieser Bildreihe wird die Füllprozedur dargestellt, die mehrere Stunden dauerte; die Makropore war mit Klebeband an der Scheibeninnenseite fixiert, kurz vor einem Befüllungsschritt wurde das Klebeband auf einer Höhe von 5 bis 10 cm gelöst und die Sandfüllung wurde unter Wasser in der gleichen Höhe eingebracht, dieses sukzessive bis zum Erreichen einer 110-120 cm hohen Füllung.



Abb. 3.5: Geräte, mit denen die Füllungsschichten verdichtet und bearbeitet wurden, links Nagelbrettstamper und rechts schwerer Stampfer.

3.2.2 Bodenphysikalische und -hydraulische Eigenschaften des benutzten Feinsandes

Nach Durchführung aller Versuche wurde der Versuchsbehälter entleert. Dabei wurden in den Tiefen der Tensiometerniveaus Kleinzylinderproben (250 cm^3) entnommen, um deren Lagerungsdichten, Korngrößenverteilungen sowie hydraulische Parameter bestimmen zu können.

An je zwei Proben aus den sechs Tensiometerniveaus wurde die Lagerungsdichte bestimmt. In Abb. 3.8 ist unter anderem die Tiefenverteilung der Lagerungsdichten dargestellt. Die gemessenen Lagerungsdichten nehmen von oben nach unten hin zu von ca. $1,43$ bis $1,54 \text{ g cm}^{-3}$, was vermutlich ein Effekt der Füllprozedur war. Nahe der Oberfläche wurde eine niedrige Lagerungsdichte von $1,43 \text{ g cm}^{-3}$ gemessen. In den anderen Niveaus ist die Lagerungsdichte höher im Bereich von $1,50$ bis $1,54 \text{ g cm}^{-3}$. Im Mittel fand sich mit $1,506 \text{ g cm}^{-3}$ annähernd die gewünschte Lagerungsdichte von $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ wieder.

Aus je einer Probe aus dem oberen, mittleren und unteren Tensiometerniveau wurden Kornsummenkurven ermittelt (siehe gemittelte Kurve in Abb. 3.6). Der farblich hell-weißliche Feinsand hat eine Korngrößenverteilung im Bereich von $0,06$ bis $0,3 \text{ mm}$. Basierend auf der Kornsummenkurve wurden bei den Siebanteilen von 10% und 60% die Durchmesser $d_{10} = 0,162 \text{ mm}$ und $d_{60} = 0,189 \text{ mm}$ gemessen und der Ungleichförmigkeitswert $C_u = 1,17$ errechnet. Der Wert indiziert ein sehr gleichförmiges poröses Material.

Parallel zu den Injektionsversuchen wurden Kleinzylinderproben mit dem gleichen Material wie im Versuchsbehälter gepackt und mit einer Multi-Step-Outflow-Anlage untersucht. Diese Methode ist beschrieben in den Arbeiten von Zurmühl (1996) und Zurmühl und Durner (1998); der verwendete Versuchsaufbau wird von Ahrenholz et al. (2008) beschrieben. Die Bodenparameter wurden ermittelt über inverse Simulation (Durner et al., 1999) unter Verwendung des "unimodal unconstrained"-Modells nach van Genuchten (1980) für die Retentionsfunktion $h(\theta)$ und des Mualem-Ansatzes für die Durchlässigkeitsfunktion $K(\theta)$. Die Parameter sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. In Abb. 3.7 ist die Beziehung zwischen Wasserspannung (= negativer Porenwasserdruck) und volumetrischem Wassergehalt dargestellt sowie die ermittelte hydraulische Durchlässigkeitskurve bezogen auf den Sättigungswassergehalt. Als auffällige Materialeigenschaft zeigte sich insbesondere der hohe „Kapillarsaum“ mit einer

Höhe von bis zu ca. 50 cm auf den Entwässerungskurven und im Gegensatz dazu ein niedrigerer „Kapillarsaum“ auf der Bewässerungskurve.

Zusätzlich wurde an einer Kleinprobe bei einer Lagerungsdichte von ca. $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ mittels einer im Bodlabor am Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (Universität Stuttgart) vorhandenen „constant head“-Apparatur eine mittlere hydraulische gesättigte Durchlässigkeit $K_s = 2,2 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ (ca. 1900 cm d^{-1}) bestimmt, die als Fixpunkt zur Darstellung der hydraulischen Durchlässigkeitskurve diente.

Basierend auf diesen Werten der Lagerungsdichte konnte eine mittlere Porosität von 0,43 und respektive eine Wassermenge bei maximaler Sättigung von 187 dm^3 (= Porenvolumen) abgeschätzt werden. Basierend auf der Interpretation der Zweitentwässerungskurve (siehe Abb. 3.7) mit einer Satiation bei ca. 80% der Sättigung kann nicht das gesamte Porenvolumen mit Wasser gefüllt werden, so dass sich in der Füllung (Gesamtmatrix) nur eine maximale potentiell abgeschätzte Wassermenge von ca. 149 dm^3 zuführen lassen könnte.

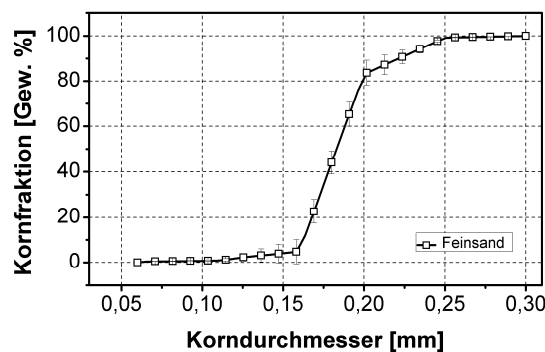


Abb. 3.6: Kornsummenkurve für den GEBA-Feinsand basierend auf drei 250 cm^3 Proben aus drei verschiedenen Tiefen (oben, Mitte, unten) aus dem Halbzylinder-Versuchsbehälter.

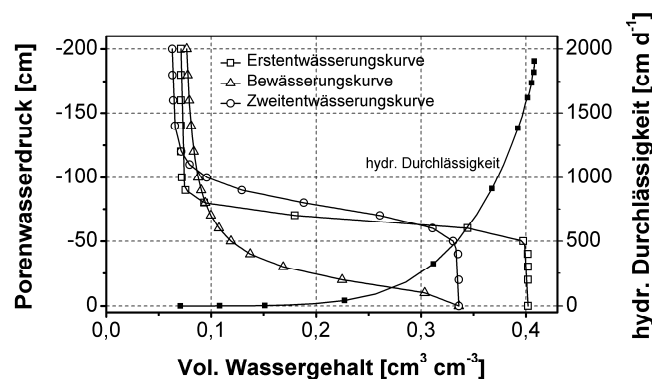


Abb. 3.7: Retentionskurven und Durchlässigkeits-Wassergehaltsbeziehung für den verwendeten GEBA-Feinsand.

Tabelle 3.1: Parameter für die ermittelten Retentions-Wassergehaltsbeziehungen für den verwendeten Feinsand basierend auf dem "unimodal unconstrained"-Modell nach van Genuchten (1980); α , n und m = van Genuchten-Parameter, θ_r = Restwassergehalt, θ_s = Wassergehalt bei Sättigung.

Parameter Satz		α	n	m	θ_r	θ_s
		[$l\ cm^{-1}$]	[-]	[-]	[$cm^3\ cm^{-3}$]	[$cm^3\ cm^{-3}$]
1	Erstentwässerung	0,0151	14,999	0,933	0,071	0,402
2	Bewässerung	0,0574	2,589	0,614	0,071	0,336
3	Zweitentwässerung	0,016	9,277	0,892	0,063	0,336

3.2.3 Versuchsdurchführung

Der wesentliche Untersuchungsaspekt im Kapitel „Makroporenfluss-Experimente“ ist der Prozess des direkten Übergangs von Wasser aus der Makropore in die umgebende Matrix. Um eine maximale Isolation des Prozesses zu erreichen, wurden Versuchsreihen durchgeführt, bei denen Wasser ausschließlich in die Makropore injiziert wurde. Variiert wurden dabei die Injektionsraten.

Mit der Befüllungsprozedur war die Matrix komplett wassergesättigt und wenige Zentimeter mit Wasser überstaut. Ausgehend von diesem Zustand wurde der während der Befüllprozedur geschlossene Hahn am Makroporenausfluss geöffnet und das Wasser konnte frei ausdrainieren. Am Ende der Drainagephase wurden die porösen Saugrohre verwendet, um weiteres Wasser aus dem System zu saugen. Hierbei wurde mit der Vakuumpumpe ein konstanter Unterdruck von ca. 100 mbar erzeugt. Dieser Unterdruck erzeugte an der Kontaktstelle zwischen Saugrohrporen und Matrixporen einen Druckgradienten, der zur Entwässerung des Systems führte. Der Unterdruck wurde für ein bis zwei Tage angelegt. Zu Beginn der Entwässerungsprozedur war der Ausfluss hoch und nahm im Laufe der Zeit ab. Die Entwässerungsmenge war schon nach wenigen Stunden sehr gering, deshalb wurde die Absaugung nach einem Zeitabschnitt von maximal zwei Tagen gestoppt. Zu diesem Zeitpunkt waren die Ausflüsse nur noch minimal. Anschließend konnte das System für einen weiteren Tag ruhen. Ein hydrostatischer Zustand wurde aber nicht erreicht und war auch in absehbarer Zeit nicht zu erwarten, weil die ungesättigten hydraulischen Durchlässigkeiten sehr gering geworden waren. Nach dem Ende der Ruhephase waren für den jeweiligen Versuch die Initialbedingungen erreicht. Die Anfangswassergehalte betragen im Versuchsprofil im Mittel ca. $0,07\ cm^3\ cm^{-3}$

(siehe Abb. 3.8), was einer Wassersättigung von ca. 17% entsprach. Während des Versuchs waren die Saugrohre inaktiv und verschlossen, so dass über sie kein Wasser aus dem System gelangen konnte.

Insgesamt wurden zur vorliegenden Arbeit sechs Versuche durchgeführt, bei denen die Injektionsrate von $63 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ bis $455 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ variierte (siehe Tabelle 3.2). Die Injektionsrate wurde von Experiment zu Experiment so festgelegt und variiert, dass ein weites Spektrum von sehr niedrigen bis hohen Infiltrationen, entsprechend geringen bis sehr starken Niederschlägen, simuliert werden konnte. Die konstante Injektion wurde bei allen Versuchen mindestens 500 Minuten aufrecht erhalten. Als Injektionswasser wurde das am Institut für Wasserbau vorhandene Leitungswasser unbehandelt verwendet (Bodenseewasser).

Für die Erfassung der Tensiometermessungen wurde ein Datenaufzeichnungs-Intervall von 10 Sekunden und einer Minute gewählt.

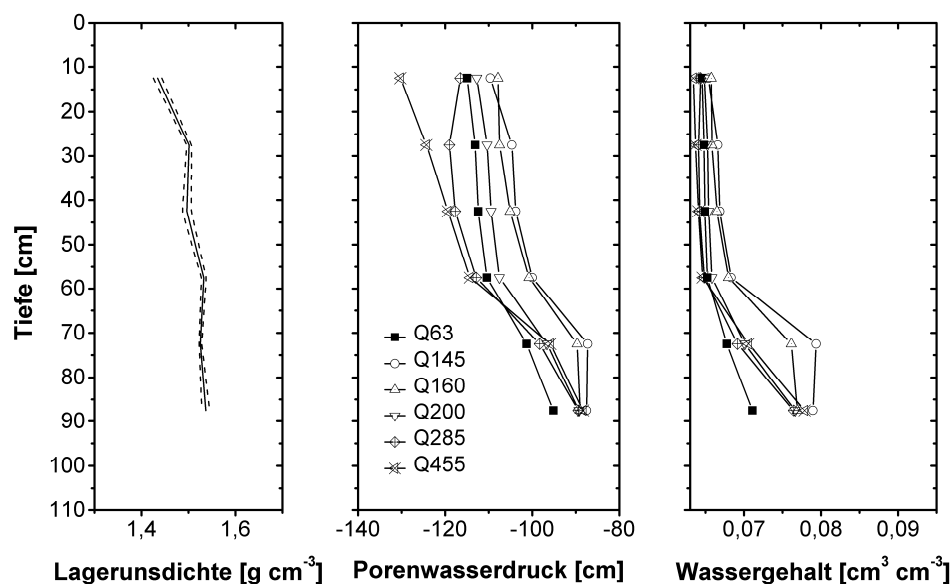


Abb. 3.8: Links: Lagerungsdichten im Profil, ermittelt an Kleinzylinderproben, die bei der Versuchsbehälterentleerung in sechs Tiefen gewonnen wurden; Mitte und rechts: Die sich für alle sechs Versuche durch Entwässerung über die Saugrohre ergebenden Porenwasserdruck- bzw. Wassergehaltsprofile (Anfangsbedingungen).

Die durchgeführten Versuche wurden an der Scheibenseite (Fenster) mittels Intervallfotografie dokumentiert. Zur visuellen Erfassung der Infiltrationsprozesse an der Glasseite wurden in Intervallen von ein bis zehn Minuten Fotos gemacht, wobei am Anfang mit einminütigem Intervall gearbeitet wurde und später, nach ca. der ersten Stunde der Versuchsdurchführung, im Zehnminutenintervall.

Nach Abschluss der Experiment-Reihe (Q63 bis Q455) wurde noch ein Versuch mit blau gefärbtem Wasser (mit Stoff „Brilliant Blue“) bei mittlerer Injektionsrate durchgeführt. Die Anfangsbedingung war „trocken“ und entsprach der bei den Experimenten Q63 bis Q455. Bei dem Versuch wurde erst das blau gefärbte Wasser injiziert und nach einigen Stunden Klarwasser. Anschließend wurde der Versuch abgebrochen zu einem Moment, bei dem sich offensichtlich das blaugefärbte Wasser in der Matrix ausgebreitet hatte. Dieser Versuch ging nicht in die Auswertung entsprechend den Versuchen Q63 bis Q455 ein. Er diente ausschließlich der Kontrolle der radialsymmetrischen Ausbreitung, wie sie zuvor angenommen wurde. In Abb. 3.9 ist der Halbzylinder zu sehen, nachdem ein Großteil der Sandmatrix heraus genommen wurde und sich der Blick ins Innere der Matrix öffnete und sich die radialsymmetrische Verteilung zeigte.

Tabelle 3.2: Liste der Versuchsvarianten mit Makroporen-Injektionsraten von 63 bis 455 cm³ min⁻¹.

<u>Experiment</u>		<u>Injektion</u>	<u>Anfangsbedingung</u>
Nr	Name	cm ³ min ⁻¹	(Wasser in Matrix)
1	Q63	63	trocken
2	Q145	145	trocken
3	Q160	160	trocken
4	Q200	200	trocken
5	Q285	285	trocken
6	Q455	455	trocken



Abb. 3.9: Entnahme der Sandfüllung nach dem letzten Versuch, bei dem zuerst blaugefärbtes Wasser und anschließend Klarwasser in die Makropore injiziert wurde, um die radialsymmetrische Wasserausbreitung in der Sandmatrix zu visualisieren.

3.2.4 Auswertungsmethodik

Für den jeweiligen Versuch wurde die Injektionsrate als obere Fließrandbedingung an der Makropore fest eingestellt und änderte sich während des gesamten Versuchslaufes von mindestens 500 Minuten nicht. Über die Injektionsrate (MPQ_{in} in $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$) konnte somit die kumulativ injizierte Wassermenge zu jedem Zeitpunkt festgestellt werden. Bei jedem Versuch ergab sich nach kurzer oder längerer Zeit ein Ausfluss am unteren Ende der Makropore (MPQ_{out} in $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$). Der Zeitpunkt des Beginns des Ausflusses wurde in Relation zum Startzeitpunkt festgehalten (MPT_{out} in min). Die Ausflussmenge wurde über die Zeit bis zum Versuchsende erfasst. Somit waren die kumulative Ausflussmenge (*kum. MP_{out}* in dm^3) und die Ausflussrate (MPQ_{out} in $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$) zu jedem Zeitpunkt ab Ausflussbeginn feststellbar. Aus der Differenz von injizierter und ausgeflossener Wassermenge konnte die kumulative von Makropore zur Matrix transferierte Wassermenge (*kum. MX_{in}* in dm^3) und die Transferrate (MXQ_{in} in $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$) ermittelt werden. Die in dem Kapitel „Makroporenfluss“ verwendeten Abkürzungen und Symbole sind in Tabelle 3.3 aufgelistet.

Über die Intervallfotografien konnte die Eindringtiefe (h_{in} in cm) des Wassers in die Makropore und die laterale Wasserausbreitung in die Matrix (d_{lat} in cm) graphisch ermittelt werden. Die verwendete Makropore war zylindrisch, allerdings war sie ganz nah von innen an der Scheibe des Versuchsbehälters eingebaut und hatte entsprechend der halbzyklindrischen Ver-

suchsbehälterform nur auf der halben Manteloberfläche Matrixkontakt. Es wurde daher angenommen, dass das Wasser nur über die Oberfläche eines halben Zylindermantels in die Matrix transferieren konnte. Bei einem Makroporendurchmesser von einem Zentimeter ergab sich somit eine maximale Grenzfläche ($MP-MX A_{inter_max}$) von 173 cm^2 bei Betrachtung der vollen Makroporenlänge von 110 cm . Entsprechend der erfassten Wassereindringtiefen ($h_{in} \leq 110 \text{ cm}$) in die Makropore konnten somit auch für Zeitpunkte vor Beginn des Ausflusses die jeweils aktiven (befeuchteten) Makropore-Matrix „Grenzflächen“ errechnet werden. Aus Kombination von Makropore-zu-Matrix-Fluss (MXQ_{in} in $\text{cm}^3 \text{ min}^{-1}$) und der jeweils aktiven Grenzfläche ($MP-MX A_{inter}$ in cm^2) konnte eine Makropore-zu-Matrix-Transfargeschwindigkeit ermittelt werden ($q_{transfer}$ in cm min^{-1}).

Mit den insgesamt 24 Tensiometern konnten die Porenwasserdruckverhältnisse (h_{MX} in $\text{cm WS} = \text{Druck in Zentimeter Wassersäule}$) im gesamten Matrixbereich zu Beginn und während des Versuchslaufes weitgehend erfasst werden. Durch Umrechnung in Sättigungen konnte somit die Sättigungsverteilung im Gesamtsystem abgeschätzt werden.

Die dreidimensionale radiale Wasserausbreitung ausgehend von der Makropore konnte mit den in der Matrix verteilten Tensiometermesspunkten erfasst werden. Die Wasserausbreitung fand zu Beginn der Versuche immer mit einer deutlichen Frontausbildung statt. Bei den Tensiometern zeigte sich das erstmalige Erreichen eines Tensiometermesspunktes in einer deutlichen Veränderung des Messsignals hin zu höheren Porenwasserdrücken ausgehend vom Initialporenwasserdruck. Die Zeitpunkte, an denen sich die Tensiometersignale an einem Tensiometermesspunkt das erste Mal veränderten, wurden festgehalten. Somit konnte für jedes Tensiometerniveau unter Berücksichtigung des Abstandes zwischen jeweiligem Tensiometer zur Makropore die Dauer der Wasserfrontausbreitung ausgehend von der Makropore bis zum jeweiligen Tensiometermesspunkt ermittelt werden.

Tabelle 3.3: Verzeichnis der in dem Kapitel „Makroporenfluss-Experimente“ verwendeten Abkürzungen und Symbole.

MP	Makropore	
MX	Matrix	
T	Zeit	min oder d (min = Minute, d = Tag)
$MP_{t_{out}}$	Zeitpunkt des Beginns des Makroporenausflusses in Relation zum Startzeitpunkt der Injektion	min
d_{lat}	Laterale Wasserausbreitung	cm
h_{in}	Makropore Zuflusswasser Eindringtiefe	cm
MPQ_{in}	Makroporezufluss (Injektionsrate)	$\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$
MPQ_{out}	Makroporenausfluss (Ausflussrate)	$\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$
MXQ_{in}	Matrixzufluss (Transferrate von MP zu MX)	$\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$
$kum. MP_{in}$	Kumulativer Makroporezufluss	dm^3
$kum. MP_{out}$	Kumulativer Makroporenausfluss	dm^3
$kum. MX_{in}$	Kumulativer Matrixzufluss	dm^3
$MP-MX A_{inter}$	Makropore-Matrix Grenzfläche	cm^2
$MP-MX A_{inter_max}$	Makropore-Matrix Grenzfläche maximal	173 cm^2
$MP-MX q_{transfer}$	Makropore-Matrix Transfergeschwindigkeit	cm min^{-1}
H	Porenwasserdruck	cm WS (Druck in Zentimeter Wassersäule)
h_{MX}	Porenwasserdruck in Matrix	cm WS

3.3 Ergebnisse und Diskussion

3.3.1 Laterale und vertikale Wasserausbreitung in Makropore und Matrix, erfasst mit Tensiometern und Intervallfotografie

3.3.1.1 Übersicht gesamter Versuchsdurchlauf allgemein

Entsprechend der Versuchsdurchführung startet ein Versuch mit dem Beginn der konstanten Wasserinjektion von oben direkt in die Makropore. So kann die injizierte Wassermenge über die Zeit sowohl als Injektionsrate als auch kumulativ dargestellt werden. Mit der Injektion in die Makropore beginnt auch der Übergang des Wassers in die die Makropore umgebende Matrix. Das in die Matrix eindringende Wasser breitet sich zu Beginn mit einer scharfen Front in der Matrix aus und gelangt sukzessive an die Tensiometermesspunkte. So kann der zeitliche Verlauf der Porenwasserdrücke und insbesondere die erste Reaktion (Änderung gegenüber dem Anfangszustand durch die sich ausbreitende Wasserfront) an den Tensiometern erfasst werden. Während der Wasserfrontenausbreitung in der Matrix fließen die nicht in die Matrix transferierten Wasseranteile in der Makropore weiter abwärts und können ab einem bestimmten Zeitpunkt direkt über das untere Ende der Makropore ausfließen. Der Makroporenausfluss kann ebenfalls als Ausflussrate und kumulativ über die Versuchsdauer erfasst werden. Aus der Differenz von Injektion und Ausfluss kann die Wassermenge bestimmt werden, die über die Zeit in das System gelangt (Makropore-zu-Matrix-Transfer).

Die Ausbreitung der Wasserfronten konnte sehr gut mit den Intervallfotografien beobachtet werden, weil sich ein ausreichender Kontrast zwischen hellen Bereichen (trocken) und dunklen Bereichen (feucht) ergab. Somit konnten „einfache“ geometrische Auswertungen (maximale Tiefe und Breite der Wasserausbreitungsfläche) an der zweidimensionalen Fensterseite herangezogen werden, um Aussagen über das Ausbreitungsmuster der Wasserfront und das Systemverhalten zu machen.

3.3.1.2 Tensiometermessungen und Intervallfotografien für alle Versuche im Vergleich

Die Porenwasserdruckverläufe der jeweiligen Versuche sind in Abb. 3.10 dargestellt. Die Abb. 3.10 zeigt die Versuche in der Zusammenschau so, dass ein direkter Vergleich zwischen den Versuchen möglich ist. Detaillierte Tensionsmessungen sind bei dieser Darstellungsweise allerdings nicht gut zu erkennen. Sobald die Wasserfront an einen Tensiometermesspunkt gelangt, kann die entsprechende Porenwasserdruckänderung hin zu einem höheren Wert registriert werden. In Versuch Q63 ist deutlich zu erkennen, wie sich die an den einzelnen Tensiometern gemessenen Porenwasserdrücke nacheinander verändern. Die Wasserfront entlang der Makropore und das Wasser in der Makropore schreiten nur langsam in die Tiefe voran, weil Teilmengen des Wassers aufgrund der Saugkräfte der Matrix in die Matrix transferiert werden und sich lateral ausbreiten (Erstreaktionen an den Messpunkten A2, A6 und A14 und erst später an B6, B2). In Versuch Q285 dagegen kann die Wasserfront entsprechend der höheren Injektionsrate schneller entlang der Makropore in die Tiefe gelangen, wobei aber immer noch Wasser in die Matrix transferiert wird (Erstreaktionen an den Messpunkten A2 (oben) bis F2 (unten) innerhalb der ersten Minuten).

Die visuell erfassten Wasserfrontausbreitungen sind in Abb. 3.11 dargestellt und lassen sich aufgrund des Kontrastes zwischen feuchten und trockenen Bereichen erkennen. Die sichtbare Wasserfrontenausbreitung spiegelt das über die Tensiometer erfasste Wasserausbreitungsmuster wider.

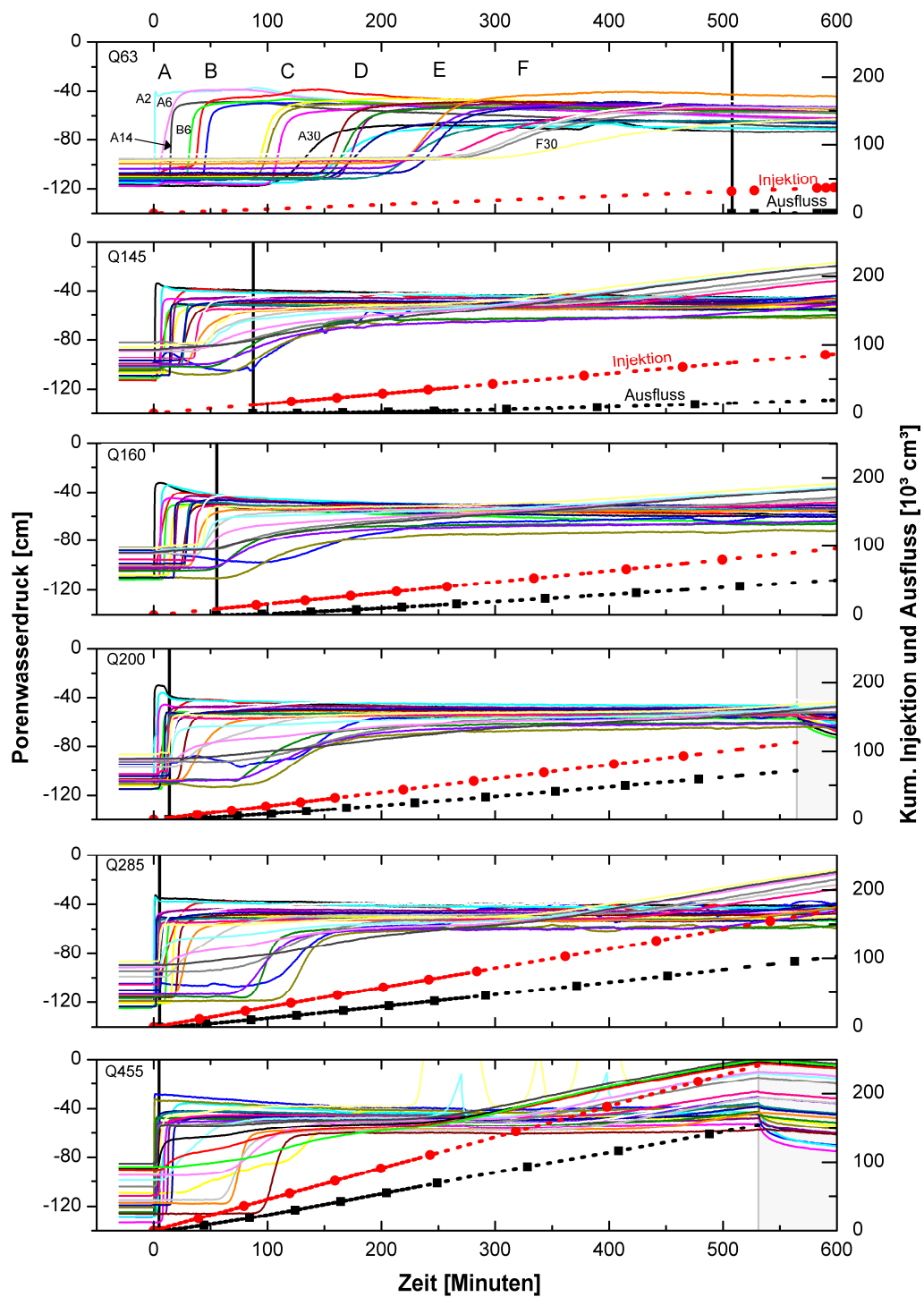


Abb. 3.10: Verläufe der Porenwasserdrücke gemessen an den 24 Tensiometern über die Zeit für alle Versuche (Q63 bis Q455) sowie die kumulativ injizierte Wassermenge und der kumulative Ausfluss; schwarze senkrechte Linien kennzeichnen den Beginn des Makroporenausflusses, teilweise graue Bereiche am Ende kennzeichnen Zeitabschnitte nach Injektionsende.

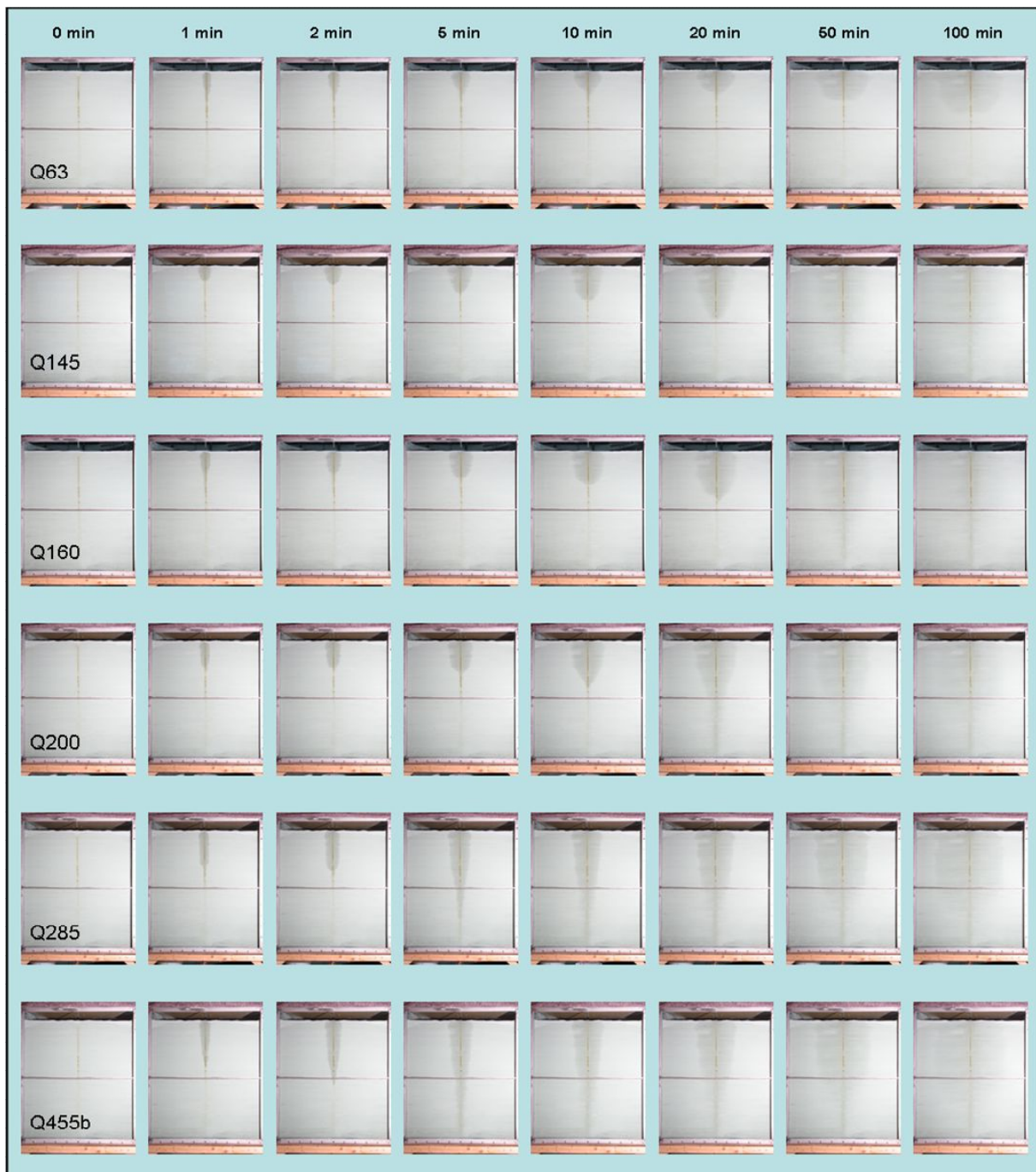


Abb. 3.11: Fotos zu ausgewählten Stichzeiten, die die sichtbare Wasserfrontausbreitung an der Scheibe des Versuchsbehälters innerhalb der ersten 100 Minuten für alle Versuche zeigen.

3.3.1.3 Beginn und Entwicklung des Makroporenausflusses für alle Versuche im Vergleich

Der Zusammenhang zwischen Injektionsrate und Beginn des Makroporenausflusses ist in der Abb. 3.10 zu erkennen durch die Markierung des Ausflussbeginns mit einer senkrechten Linie im Diagramm. Während bei Versuch Q63 (mit niedriger Injektionsrate) der Ausfluss nach 508 Minuten beginnt, beginnt er bei Q455 (mit hoher Injektionsrate) schon nach ca. 4 Minuten. Die Ausflussbeginn-Momente sind in Abb. 3.12 zusammenhängend dargestellt und stellen eine nichtlineare Kennlinie dar, die für diesen Versuchsstand mit den gewählten Geometrien und dem Material spezifisch ist.

Ergänzend zu den kumulativen Flüssen (siehe Abb. 3.10) sind in Abb. 3.13 die Ausflussraten als Funktion der Zeit für alle Versuche dargestellt. Bei allen Versuchen ist zu erkennen, dass die Ausflussraten mit dem Beginn des Makroporenausflusses niedrig sind, sich aber recht schnell erhöhen, um sich nach einer gewissen Zeit (ca. bei Erreichen der Hälfte der Injektionsrate) nur noch langsam zu erhöhen. Bei Versuchen mit hohen Injektionsraten nimmt die Ausflussrate schneller zu als bei den Versuchen mit niedriger Injektionsrate.

Bei keinem der Versuche wurde ein Zustand erreicht, bei dem die Ausflussrate gleich der Injektionsrate ist. Nach 500 Minuten ist eine Ausflussrate von etwa zwei Drittel der Injektionsrate erreicht. Allerdings ist zu sehen, dass bei allen Versuchen die Ausflussraten auch zum Ende hin noch leicht steigen. Bei einer gedachten Extrapolation der Steigung kann man abschätzen, dass es noch Stunden bis Tage bräuchte, bis die Injektionsrate gleich der Ausflussrate wäre. Dieser stationäre Zustand würde einem Zustand entsprechen bei dem eine hohe Wassersättigung im System vorhanden wäre und evtl. kein Wasser mehr von Makropore zur Matrix transferiert würde. Oder aber auch, dass bei einem stationären Zustand die Makroporen- und Matrixdurchströmung parallel stattfindet unter der Annahme, dass der Zufluss in die Matrix dem Rückfluss aus der Matrix gleicht, bevor das Wasser unten aus der Makropore austritt.

Es wird vermutet, dass zu Beginn eines Versuches die Sättigung im Nahbereich um die Makropore den Makroporenfluss kontrolliert. Bei „trockener“ Matrix im Nahbereich findet starker Transfer statt, mit zunehmender Sättigung nimmt der Transfer ab. Das heißt, dass im Zuge der

Aufsättigung des Nahbereiches nur noch der makroporentferntere Bereich Einfluss auf den Makroporenfluss nehmen kann. Sollte der Fernbereich noch trocken sein, so schreitet die sich lateral ausbreitende Wasserfront weiter voran und leitet somit indirekt weiteres Makroporenwasser von der Makropore weg. Der Einfluss des Fernbereiches auf den Transfer ist dann allerdings schwächer als der des Nahbereiches.

Der Makroporenausfluss steigt mit der Zeit, weil die Aufsättigung der Matrix dazu führt, dass gleichzeitig die „Absorption“ von Wasser in die Matrix abnimmt.

Da bei Versuchen mit hoher Injektionsrate die Makropore auf ihrer gesamten Länge schon nach wenigen Minuten mit Wasser benetzt ist, wird zu Beginn des Versuches viel Wasser transferiert und der Nahbereich schnell „aufgefüllt“. Der Transfer nimmt aber zugleich schnell ab, weil, wie oben beschrieben, mit der Aufsättigung des Nahbereiches der Transfer verringert wird. Im Gegensatz dazu, kann auch deutlich gesehen werden, dass der Einfluss des Nahbereichs bei Versuchen mit niedriger Injektionsrate (z.B. Q145 und Q160) deutlich länger vorhanden ist (gestreckter Anstieg der Ausflussratensteigerung) als bei Versuchen mit hoher Injektionsrate (z.B. Q455).

Das hat sehr konkrete Auswirkungen: In der Abb. 3.13 ist eine vermutete Grenze zwischen Nahbereich (A) und Fernbereich (B) mit einer Linie angedeutet. Niederschläge, die eine Dauer und Intensität haben, die dazu führen, dass sich Makroporenfluss bildet, der im Bereich A zu finden ist, können ganz oder teilweise von der Matrix aufgenommen werden. Im Umkehrschluss dazu können Niederschläge, die Makroporenfluss im Bereich B erzeugen, stark zu einem Tiefenabfluss beitragen. Und der Tiefenabfluss schließlich ist entscheidend dafür, ob ein Druckimpuls durch Grundwasser- oder Porenwasserdruckanstieg in Anlehnung an die Hangbewegungshypothese dieser Arbeit erzeugt werden kann oder nicht.

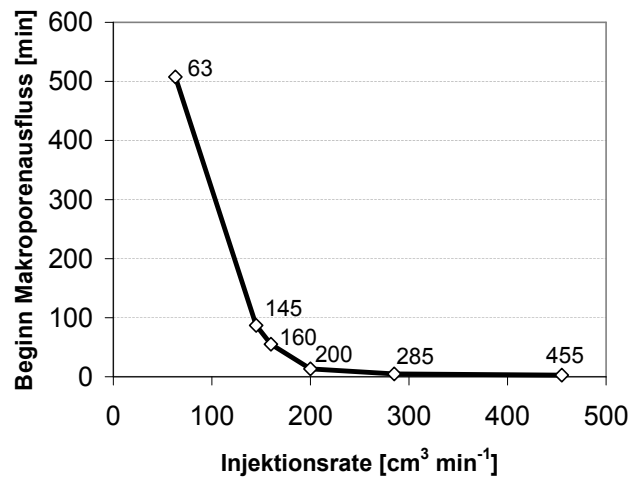


Abb. 3.12: Verhältnis von Beginn des Makroporenausflusses zur Injektionsrate des jeweiligen Versuches.

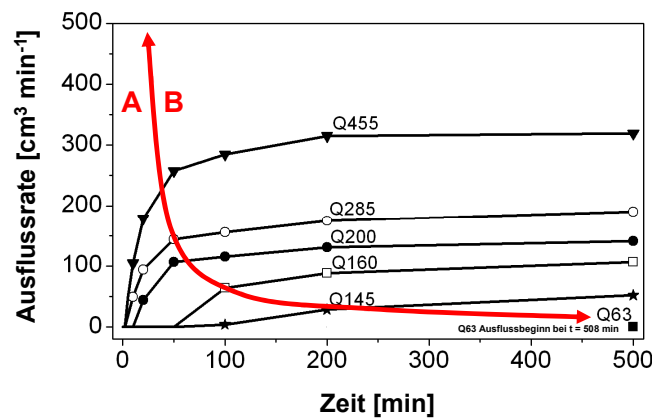


Abb. 3.13: Veränderung der Ausflussraten über die ersten 500 Minuten der Versuchsdurchläufe; der jeweilige Ausfluss ist aufgeteilt in eine Phase mit schnellem Anstieg der Rate (Bereich A, links der Linie mit Pfeilenden) und in eine Phase mit schwachem Anstieg der Rate oder mit mehr oder weniger konstanter Ausflussrate (Bereich B, rechts der Linie mit Pfeilenden); Anmerkung: Bei Versuch Q63 begann der Ausfluss erst nach 508 Minuten.

3.3.1.4 Laterale und vertikale Wasserfrontausbreitung für alle Versuche im Vergleich

Erstreaktions-Zeitpunkte ermitteln

Eine weitere Grafik (siehe Abb. 3.14) dient der genauen Betrachtung der Erstreaktionszeiten an den Tensiometern aufgrund der Wasserausbreitung im System. Sobald ein Tensiometerwert erstmalig deutlich vom Anfangswert abwich, wurde dieser Zeitpunkt festgehalten; für jedes Tensiometerniveau wurden diese Erstreaktions-Zeitpunkte mit Linien verbunden dargestellt. Somit lässt sich die laterale Ausbreitungsgeschwindigkeit und -charakteristik ablesen. Zu Beginn eines Versuches war dieser Zeitpunkt aufgrund der hohen Schärfe der Front recht deutlich zu ermitteln. Bei scharfer Front zu Beginn des Versuches stiegen die Werte auch sehr schnell innerhalb weniger Minuten von ca. -100 cm Porenwasserdruck (Anfangsbedingung) bis ca. -40 bis -30 cm Porenwasserdruck ins Hochgesättigte an (siehe Q63 in Abb. 3.17). Schneller Anstieg war entsprechend bei den Tensiometermesspunkten zu erkennen, bei denen die Wasserfront im Versuchsverlauf früh ankam. Das heißt, bei niedriger Injektionsrate insbesondere im oberen Bereich (Niveau A und B) und dort bei Tensiometern im nahen Abstand zur Makropore (2 und 6 cm). Mit höherer Injektionsrate reagierten zusätzlich die makroporennahen Messpunkte auch in den tieferen Niveaus schnell. Mit fortschreitender Wasserausbreitung dagegen „verschwimmt“ die Front und bekommt eine Unschärfe aufgrund von Diffusivität. Das zeigt sich insbesondere bei makroporenfernen Messpunkten und bei Messpunkten in den unteren Niveaus E und F. Außerdem trifft die Front in tieferen Bereichen auf leicht feuchtere Bereiche (siehe Sättigungsprofil in Abb. 3.8), was auch zu einer Unschärfe der Front führt, weil der Feuchteunterschied an der Front nicht mehr so hoch ist wie im oberen Bereich. Bei späteren Reaktionszeitpunkten stieg auch der Porenwasserdruck nur langsamer an und erreichte teilweise erst nach ca. ein bis zwei Stunden Druckbereiche von ca. -60 cm (siehe z.B. die Porenwasserdruckverläufe in 30 cm Abstand zur Makropore in Abb. 3.17).

Charakter der Frontausbreitung

Bei Versuch Q63 mit „niedriger“ Injektionsrate fanden die Erstreaktionen sowohl lateral als auch vertikal recht gleichmäßig sukzessiv vom oberen zum unteren Niveau statt. Auffällig hier allerdings noch, dass die Erstreaktionen an den Niveaus B bis F in den Abständen 6 und 14 cm deutlich vor der Erstreaktion in 2 cm-Abstand des jeweiligen Niveaus stattfanden. Was

die in Abb. 3.19 gezeigte „Apfelform“ widerspiegelt. Die Erkenntnis, dass auch die aus den dreidimensional verteilten Tensiometern gewonnenen Daten die „Apfelform“ widerspiegeln, ist ein gewisser Beweis dafür, dass das, was im Zweidimensionalen an der Scheibe gesehen wurde, auch tatsächlich in der Tiefe der Matrix im Versuchsbehälter stattfand (und somit ein zusätzlicher Beweis der radialsymmetrischen Ausbreitung neben der Visualisierung, die in Abb. 3.9 gezeigt ist).

Anders bei Versuchen mit „hoher“ Injektionsrate: Entsprechend der fotografierten Wasserfrontausbreitung, reagieren die Tensiometer nahe der Makropore in allen Tiefen im Abstand von 2 cm und 6 cm bereits nach wenigen Minuten.

Geschwindigkeit der lateralen Frontausbreitung ermitteln

Wenn man sich die verbundene Linie für die Messpunkte im Niveau A bei jedem Versuch in Abb. 3.14 anschaut, ist zu erkennen, dass sie die Form bei allen Versuchen fast gleich ist:

- Erstreaktion A2 (2 cm von Makropore entfernt) unmittelbar nach Makroporen-Injektionsbeginn
- Erstreaktion A6 (6 cm von Makropore entfernt) 2-3 Minuten nach Makroporen-Injektionsbeginn
- Erstreaktion A14 (14 cm von Makropore entfernt) ca. 8-10 Minuten nach Makroporen-Injektionsbeginn
- Erstreaktion A30 (30 cm von Makropore entfernt) ca. 90-110 Minuten nach Makroporen-Injektionsbeginn

Mit dem Fokus auf die laterale Ausbreitung der Wasserfronten in Niveau A ergibt sich die Möglichkeit, die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Experiment Q63 abzuschätzen. Zwischen den Erstreaktionszeiten an den Messstellen A2 und A6 verstrichen 3,5 Minuten, zwischen A6 und A14 9,8 Minuten und zwischen A14 und A30 84,3 Minuten. Folglich sind die Frontausbreitungsgeschwindigkeiten 1,1 und 0,8 und 0,2 cm min^{-1} . Die Geschwindigkeit sinkt also über die Zeit und war im Mittel 0,29 cm min^{-1} . Die gleichen Berechnungen für die anderen Experimente für Niveau A zeigten, dass für alle Experimente die Geschwindigkeit auf der Strecke bis 30 cm Abstand zur Makropore abnahm und im Mittel ca. 0,3 cm min^{-1} betrug.

Das heißt, sobald sich durch die Injektion ausreichend Wasser in der Makropore befindet, ist in dem Fall dieses experimentellen Versuchsaufbaus und den gewählten Anfangsbedingungen ein Transfer dieses Wassers aufgrund von Saugkräften in die die Makropore umgebende Matrix möglich. Die Transferrate wird bestimmt durch die hydraulischen Eigenschaften des Feinsandes und durch die Durchlässigkeit der Makroporenwand (hier Drahtgewebe). Diese beiden Faktoren limitieren also eine Makropore-Matrix-Transferrate bei ausreichendem Wasserangebot in der Makropore. Da bei allen Versuchen etwa die gleiche Anfangsbedingung herrschte, waren auch die hydraulischen Eigenschaften, die stark abhängig vom Sättigungsgrad sind, gleich. Das Wasserangebot in der Makropore, sozusagen das Reservoir für das Transferwasser, war in allen Versuchen ausreichend vorhanden, weil immer noch ein Teil des Wassers in der Makropore verblieb und gravitativ tiefer in der Makropore absank, bis es ab einem bestimmten Zeitpunkt ausfließen konnte. Das heißt, bei allen Versuchen war zu Beginn des Versuchs die in die Matrix transferierte Wassermenge immer die gleiche. Unterschiedlich war nur der Anteil der nicht transferierten Wassermenge. Die nicht transferierte Wassermenge, das heißt, die nicht von der Matrix absorbierte Menge, bestimmte somit das Voranschreiten der Wasserausbreitung in und entlang der Makropore weiter in die Tiefe. Das Verhältnis zwischen transferierter Wassermenge und nicht transferiertem Makroporenwasser ist zu Beginn der Versuche bei niedrigen Injektionsraten groß (>1) und bei hohen Injektionsraten klein (<1).

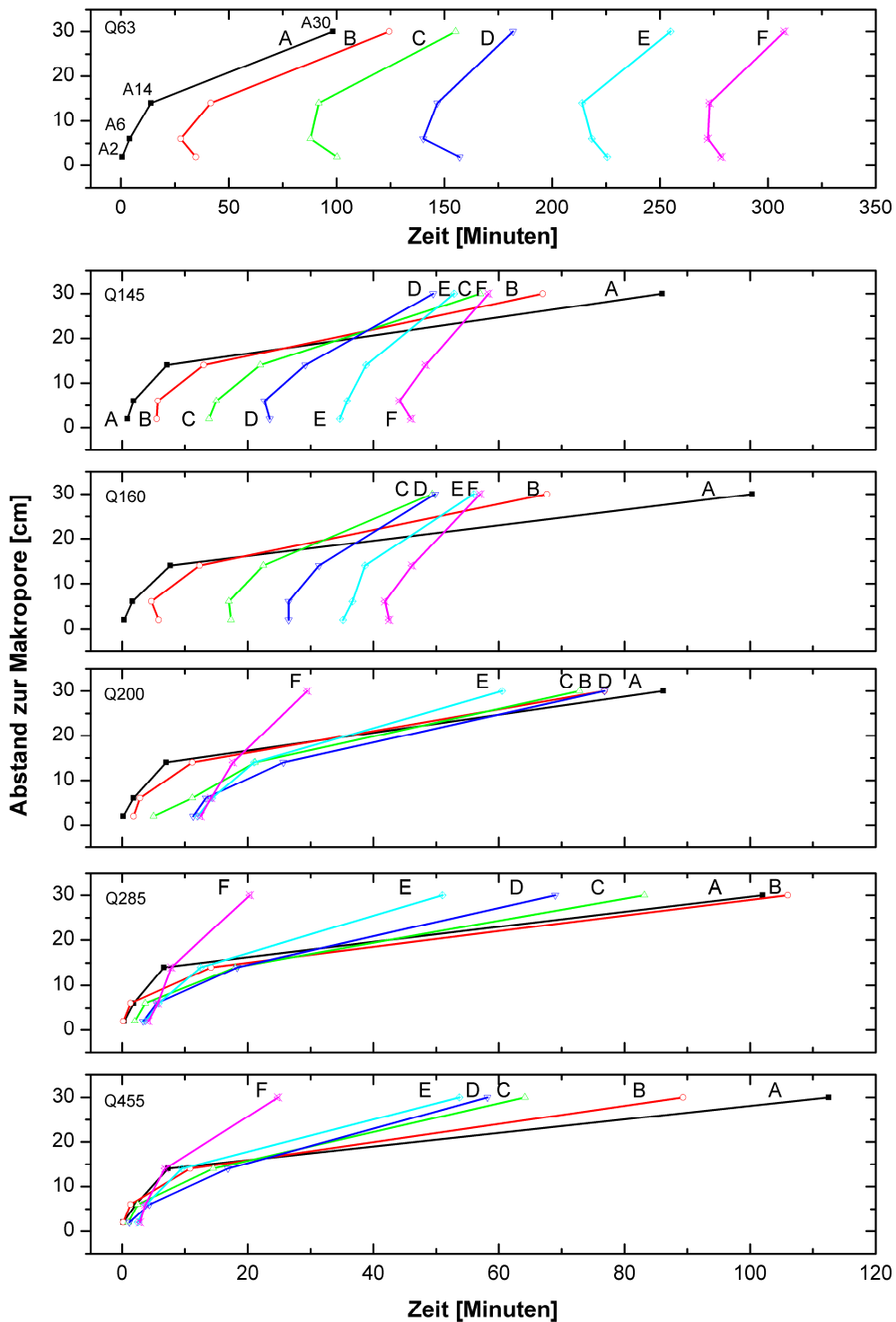


Abb. 3.14: Erstreaktionszeiten der Porenwasserdruckänderung, markiert als Zeitpunkte, an denen ein gemessener Tensiometerwert sich erstmalig und deutlich von seinem Anfangswert her gesehen erhöht; dabei sind Punkte eines Niveaus mit einer Linie „zusammenhängend“ dargestellt (beachte: abweichende Zeitachse für Versuch Q63).

Laterale Frontausbreitung vs. vertikalem Makroporenfluss

Der Vorteil des experimentellen Aufbaus mit seinem großen Radius im Vergleich zu Experimenten mit kleinen Radien lag darin, dass für die horizontale Wasserausbreitung die Möglichkeit bestand, sich bis zum Halbzylindermantel (50 cm entfernt von der Makropore) in der Matrix unlimitiert ausbreiten zu können. Das heißt, dass erst nach langen Zeitabschnitten die laterale Wasserfrontausbreitung stark durch Randbegrenzungen beeinflusst wurde.

Unter Hinzunahme der Fotosequenzen für alle Experimente war es möglich, zu den Stichzeiten 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 und 500 Minuten die befeuchteten Bereiche in ihrer Ausdehnung visuell zu messen (bei 200 und 500 Minuten zeigten sich allerdings überwiegend keine scharfen Befeuchtungsfronten mehr, so dass hier subjektiv eine mittlere Grenze innerhalb des verschwommenen Grenzbereichs abgeschätzt wurde).

Auf diese Weise war es möglich, graphisch die maximale horizontale Wasserfrontausbreitung (d_{lat}) und die Eindringtiefe des Zuflusses in die Makropore (h_{in}) zu erfassen. Beispielhaft sind die graphisch ermittelten Werte für einige Zeitschritte für Q63 in Abb. 3.15 gezeigt. Und beispielhaft sind die kompletten Werte für d_{lat} und h_{in} in Tabelle 3.4 aufgeführt.

Das Verhältnis von d_{lat} und h_{in} ergibt Werte um eins. Bei Werten größer als eins dominiert die horizontale Ausbreitung über die vertikale Wassereindringung in die Makropore. Wenn der Wert kleiner als eins ist, dann ist die vertikale Ausbreitung schneller als die maximale laterale Ausbreitung. Das Verhältnis zwischen d_{lat} und h_{in} bis zum Ausflussbeginn ist in Abb. 3.16 dargestellt. Für alle Experimente zeigt sich zumindest kurzfristig in der Startphase der Trend zur Zunahme der lateralen Ausbreitung. Die Werte steigen allerdings nur bei den Experimenten mit niedriger Injektion (Q63 und Q160) kurzzeitig über den Wert eins. Nach dem Erreichen eines Höhepunktes kehrt sich bei allen Experimenten das Geschehen um und die vertikale Ausbreitungskomponente dominiert, bis der Makroporenausfluss am unteren Rand beginnt. Bei den Experimenten mit hohen Injektionsraten konnte diese Art der Auswertung nur kurz erfolgen, weil der Makroporenausfluss in den ersten Minuten nach Injektionsbeginn begann, also die maximale Eindringtiefe, die Länge der Makropore von 110 cm, schnell erreicht wurde. Für die Experimente Q200, Q285 und Q455 war über die gesamte Laufzeit das vertikale Eindringen vorherrschend (Werte < 1).

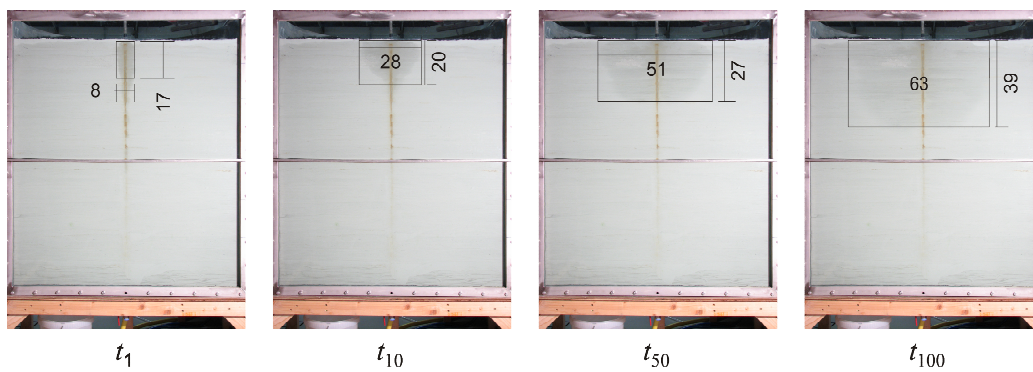


Abb. 3.15: Beispielhaft graphisch ermittelte Werte für die horizontale und vertikale Ausdehnung des Wasserausbreitungsbereiches für ausgewählte Zeitschritte für Versuch Q63.

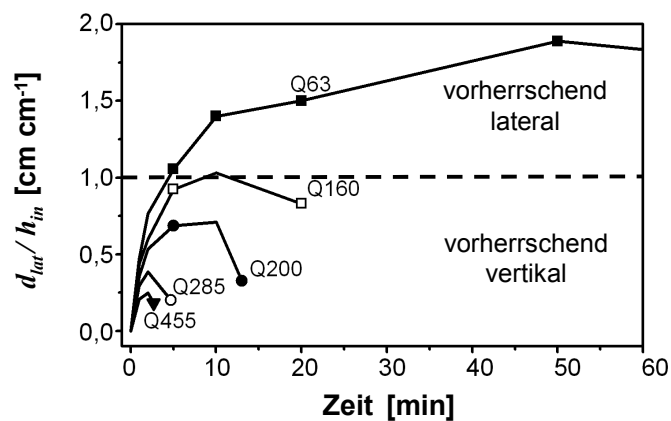


Abb. 3.16: Verlauf des Verhältnisses (d_{lat}/h_{in}) von lateraler (horizontaler) zu vertikaler Wasserausbreitung für die Versuchszeit bis zum Makroporenausflussbeginn für die Experimente Q63 bis Q455 (Anmerkung: Q145 und Verlauf bei Q63 > 60 Minuten nicht gezeigt).

Die Zunahme-Abnahme-Kurven-Form ist ein Merkmal für diese Art der Versuchsanordnung und das vorhandene Material. Die Form der Kurve wird so interpretiert, dass in der Anfangsphase die laterale Ausbreitung verstärkt auftritt, weil direkt makroporennah Matrixsaugkräfte agieren, die durch einen hohen Porenwasserdruckunterschied von wasserführender Makropore zu trockener Matrix entstehen. Später, wenn das vertikale Eindringen in die Makropore überwiegt (mit Kurvenumschlag nach unten), haben die Saugkräfte im Nahbereich nachgelassen. Zusätzlich haben die Gravitationskräfte einen größeren Einfluss auf die Wasserverteilung.

Insbesondere weil sich unter anderem die hydraulischen Durchlässigkeiten mit höherer Sättigung erhöhen und entsprechend der Zunahme der befeuchteten Matrixbereiche mehr Wasser „fließt“ als „gesaugt“ wird.

3.3.1.5 Massenbilanzen und Detailanalyse der Tensiometermessungen und Intervallfotografien für Versuch Q63 und Q285 im Vergleich

Zur Detailanalyse der Experimente wurden ein Versuch mit „niedriger“ Injektionsrate (Q63) und ein Versuch mit „mittelhoher“ Injektionsrate (Q285) ausgewählt. In Abb. 3.17 sind die Tensiometermessungen beider Versuche dargestellt, wobei hier die Tensiometerniveaus in einzelnen übereinander „gestapelten“ Grafiken dargestellt werden. Mit der einhergehenden Wasserfrontausbreitung ist die sukzessive Reaktion an den Tensiometern mit dem Abstand zur Makropore und mit der Einbautiefe detailliert erkennbar.

Bei beiden Versuchen ist zu erkennen, dass sich die Porenwasserdrücke mit dem Eindringen der Wasserfront in die Matrix stark erhöhen, aber nur bis zum Bereich von ca. -50 bis -40 cm und nicht höher. Das heißt, dass die Wasserfront eine teilgesättigte Wasserfront ist. Je nach Wahl der Retentionskurve können bei solchen Porenwasserdrücken Sättigungen nahe der Sättigung vermutet werden (bei Entwässerungskurven bis -50 cm) oder Sättigungen, die nur ca. 50% betragen (Bewässerungskurve, vgl. Abb. 3.7).

Erst nach ca. 350 Minuten steigen die Porenwasserdrücke bei Versuch Q285 über die -40 cm Marke und eine höhere Sättigung wird erreicht (siehe Abb. 3.17; nacheinander Anstiege in den Niveaus F, E und D in dem Zeitabschnitt von ca. 350 Minuten bis Versuchsende). Hierbei ist es aber nicht mehr direkt die eindringende Wasserfront, die den Porenwasserdruckanstieg auslöst, sondern die Aufsättigung des Behälters von unten her. Die Aufsättigung findet statt, weil sich die Front zum einen nicht mehr frei ausbreiten kann, weil sie an Außenmantel und Bodenplatte trifft, und zum anderen, weil der Ausfluss aus dem unteren Ende der Makropore limitiert ist durch deren Durchmesser. Bei Versuch Q285 beginnt die Aufsättigung von unten her nach ca. 300 Minuten, allerdings wurden Porenwasserdrücke größer Null (= Grundwasser) erst nach ca. 500 Minuten erreicht (bei einem Porenwasserdruck von -22,5 cm im Niveau F, welches 22,5 cm über der Bodenplatte liegt). Bei Versuch Q63 dagegen werden während der Versuchsdauer keine Porenwasserdrücke höher -40 cm erreicht, das heißt, dass das System die ganze Zeit im Ungesättigten blieb.

Bei allen Versuchen, insbesondere bei Versuch Q63 (und anderen mit niedrigerer Injektionsrate) ist zu erkennen, dass die Porenwasserdrücke in den oberen Niveaus A, B und C ausgehend von -40 cm bei Erstbefeuchtung wieder bis ca. -70 cm sinken, sobald darunter liegende Bereiche befeuchtet werden. Das Sinken der Porenwasserdrücke steht im Zusammenhang damit, dass, wenn die darunter liegenden Bereiche feuchter werden, sich deren hydraulische Durchlässigkeit erhöht. Dadurch kann verbundenes Wasser aus den oberen Bereichen zusätzlich zur kapillargetriebenen Ausbreitung in alle Richtungen, gravitativ absinken, so dass der obere Bereich dementsprechend beschleunigt wieder ungesättigter wird.

Im Zusammenhang mit dem Absinken der Porenwasserdrücke in den oberen Bereichen, wie eben beschrieben, ist aber der Zeitraum in den ersten Minuten nach Injektionsbeginn auszuklammern, weil hier eine Initialimpuls-Situation mit kurzzeitig höheren Porenwasserdrücken beobachtet wird, die insbesondere an den Tensiometermesspunkten A2 und B2 zu sehen sind. Mit dem Beginn der Injektion und in den ersten Minuten der Injektion sind hier z.B. an A2 und B2 bei Versuch Q285 (siehe Abb. 3.17) Porenwasserdrücke im Bereich von -35 cm zu sehen, die dann aber schnell um ca. 5 cm sinken, um dann auf dem länger anhaltenden ca. -40 cm Niveau zu bleiben.

Ergänzend zu den detailliert gezeigten Tensiometermessungen sind in Abb. 3.18 alle vorhandenen Flüsse und Flussraten der Versuche Q63 und Q285 massenbilanziert dargestellt und die dazugehörigen Werte in Tabelle 3.4.

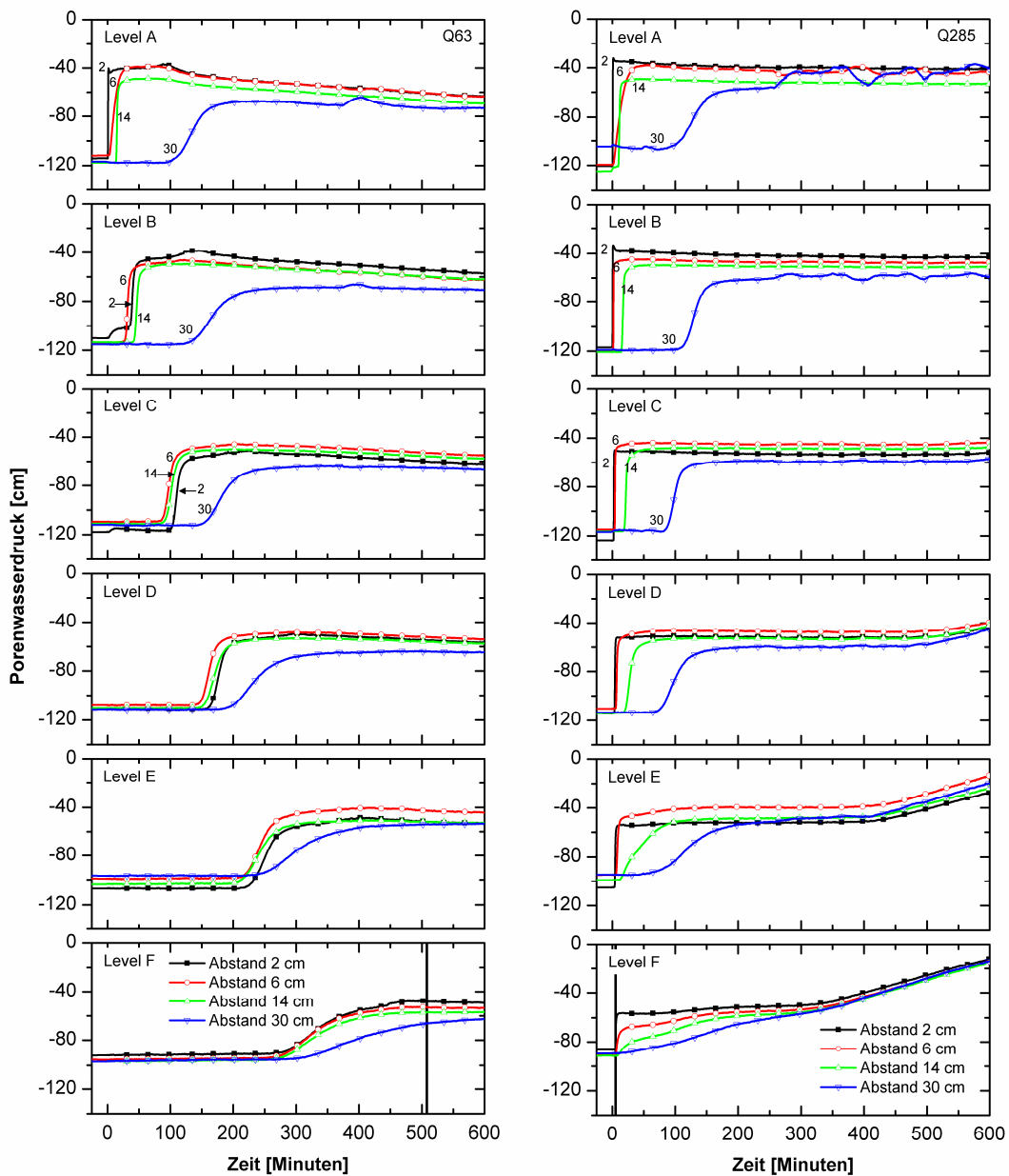


Abb. 3.17: Detaillierte Darstellung der Porenwasserdruckverläufe über die Zeit für die ausgewählten Versuche Q63 und Q285 in den Abständen 2, 4, 6 und 14 cm zur Makropore nach den sechs Tensio-
meterniveaus unterteilt; schwarze senkrechte Linien in den Diagrammen zu Niveau F markieren den
Beginn des Makroporenausflusses.

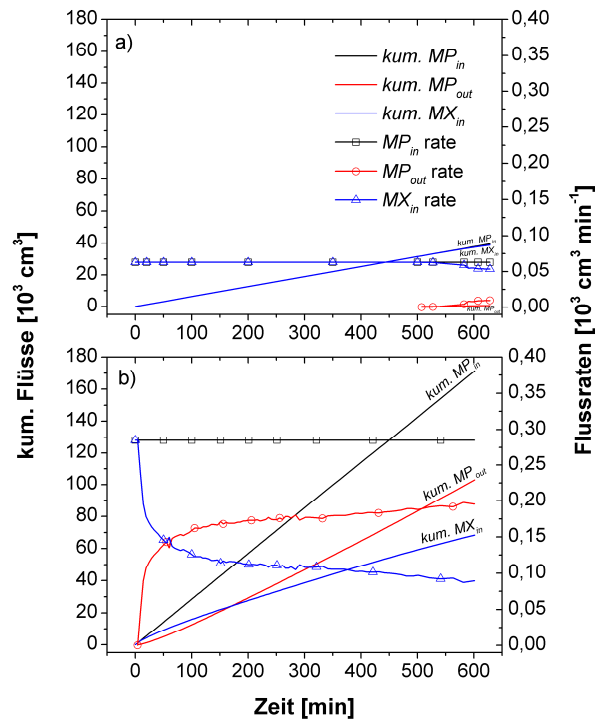


Abb. 3.18: Kumulativ dargestellt als durchgängige Linien Makroporenzufluss ($kum. MP_{in}$), Makroporenausfluss ($kum. MP_{out}$) und der aus der Differenz dieser beiden abgeleitete Makropore zu Matrixzufluss ($kum. MX_{in}$) sowie die dazugehörigen Flussraten (Linien und Symbole) für die Versuche a) Q63 (oben) und b) Q285 (unten).

Tabelle 3.4: Detaillierte Datensätze der Experimente Q63 und Q285 für ausgewählte Stichzeiten von 0 bis 500 Minuten (zusätzlich zum Ausflussbeginn bei 508 Minuten für Experiment Q63) für die laterale Wasserausbreitung und die vertikale Wassereindringtiefe sowie die Abschätzung der Makropore zu Matrix Wasser-Transfergeschwindigkeit (MP-MX $q_{transfer}$), die auf Grundlage der Makroporen Zu-Ausflussdifferenz ($MP_{in} - MP_{aus} = MX_{in}$) und der abgeschätzten befeuchteten Makropore zu Matrix Grenzfläche (MP-MX A_{inter}) erstellt wurde.

Name	Zeit	T	d_{lat}	h_{in}	d_{lat}/h_{in}	kum. MP_{in}	kum. MP_{out}	kum. MX_{in}	MP-MX A_{inter}	MP-MX $q_{transfer}$
		[min]	[cm]	[cm]	[-]	[dm ³]	[dm ³]	[dm ³]	[cm ²]	[cm min ⁻¹]
Q63 t0		0	0	0	0,00	0,000	0,000	0,000	0	0,00
Q63 t1		1	8	17	0,47	0,063	0,000	0,063	27	2,36
Q63 t2		2	13	17	0,76	0,127	0,000	0,127	27	2,36
Q63 t5		5	19	18	1,06	0,316	0,000	0,316	28	2,23
Q63 t10		10	28	20	1,40	0,630	0,000	0,630	31	2,01
Q63 t20		20	36	24	1,50	1,260	0,000	1,260	38	1,67
Q63 t50		50	51	27	1,89	3,151	0,000	3,151	42	1,49
Q63 t100		100	63	39	1,62	6,300	0,000	6,300	61	1,03
Q63 t200		200	78	60	1,30	12,600	0,000	12,600	94	0,67
Q63 t500		500	94,7	109	0,87	31,501	0,000	31,501	170	0,37
Q63 t508		508	95	110	0,86	32,004	0,000	32,004	173	0,36

Anmerkung: bei t508 ist bei Versuch Q63 der Zeitpunkt des Ausflussbeginns

Q285 t0		0	0	0	0,00	0,000	0,000	0,000	0	0,00
Q285 t1		1	10	34	0,29	0,285	0,000	0,285	53	5,34
Q285 t2		2	15	39	0,38	0,574	0,000	0,574	61	4,65
Q285 t4,7		4,7	22	110	0,20	1,340	0,000	1,340	173	1,65
Q285 t5		5	23	110	0,21	1,428	0,056	1,372	173	1,58
Q285 t10		10	30	110	0,27	2,852	0,303	2,549	173	1,47
Q285 t20		20	38	110	0,35	5,700	1,239	4,461	173	1,29
Q285 t50		50	52	110	0,47	14,252	5,553	8,699	173	1,01
Q285 t100		100	65	110	0,59	28,501	13,324	15,177	173	0,88
Q285 t200		200	81	110	0,74	57,001	30,758	26,244	173	0,76
Q285 t500		500	100	110	0,91	142,504	87,855	54,648	173	0,63

Anmerkung: bei t4,7 ist bei Versuch Q285 der Zeitpunkt des Ausflussbeginns

T	Zeit	min
d_{lat}	Laterale Wasserausbreitung in der Matrix	cm
h_{in}	Vertikale Eindringtiefe des Wassers in der Makropore	cm
kum. MP_{in}	Kumulativer Makroporenzufuss	dm ³
kum. MP_{out}	Kumulativer Makroporenausfluss	dm ³
kum. MX_{in}	Kumulativer Matrixzufuss	dm ³
MP-MX A_{inter}	Makropore-Matrix Grenzfläche	cm ²
MP-MX $q_{transfer}$	Makropore zu Matrix Transfergeschwindigkeit	cm min ⁻¹

Mit dem Fokus auf die laterale Ausbreitung der Wasserfront wird im Folgenden unter anderem der obere Bereich im Versuch genauer betrachtet. In Abb. 3.19 sind die Ausbreitungsflächen (Wasserfronten) zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Die Form ähnelt bei Versuch Q63 einem Apfel und bei Versuch Q285 zu Beginn einer Karotte. Die eingezeichneten Flächen sind von den Fotos adaptiert. Für t_{200} ist die eingezeichnete Ausdehnung abgeschätzt und stellte in Wirklichkeit keine scharfe Abgrenzung dar. Die maximale laterale Ausbreitung fand unmittelbar unter der Oberfläche statt, weil hier das Wasser initial für den Makropore-zu-Matrix-Transfer zur Verfügung stand. Beim Vergleich der Versuche Q63 und Q285 ist zu erkennen, dass die Ausdehnung der lateralen Wasserausbreitung (d_{lat} in cm) im oberen Bereich fast identisch ist (z.B. ca. 49 cm nach 100 Minuten). Das heißt, d_{lat} ist eine Funktion von $MP-MX q_{transfer}$ und eine Funktion der Injektionsdauer, ist aber keine Funktion der Injektionsrate.

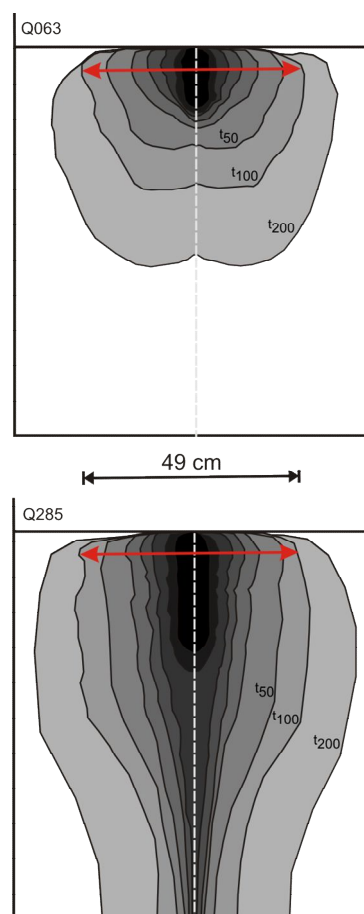


Abb. 3.19: Wasserausbreitungsflächen der Versuche Q63 und Q285 zu den Zeiten 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 und 200 Minuten adaptiert von den Fotoreihen; horizontale Pfeile zeigen die maximale Ausdehnungslänge von 49 cm nahe der Oberfläche nach 100 Minuten (t_{100}) an, die bei beiden Versuchen gleich war.

3.3.2 Zusammenhang zwischen Makropore-zu-Matrix-Transfergeschwindigkeit und dem Matrix-Porenwasserdruck

Die Grenzfläche $MP-MX A_{inter}$ zwischen Makropore und Matrix wurde unter Verwendung des Makroporenradius von 0,5 cm und unter der Annahme errechnet, dass sich der Bereich für möglichen Wassertransfer halbzyklindrisch in Richtung Matrix ausbreitet und zur Scheibe hin nicht. Unter Verwendung der über die Fotografien abgeleiteten Eindringtiefe des Wassers in der Makropore h_{in} und der eben geschilderten Makroporenhalbzyklinderannahme konnte für jeden Zeitpunkt die aktive (befeuchtete) Grenzfläche für den Wassertransfer berechnet werden.

Durch Differenzierung von dem in die Makropore injizierten Wasser und dem Makroporenausfluss war es möglich, die Menge des Wassers zu berechnen, die von der Makropore in die Matrix übergeht ($MPQ_{in} - MPQ_{out} = MXQ_{in}$).

Mit dem sich so ergebenden Wasserfluss in die Matrix und der für den Fluss verwendeten $MP-MX A_{inter}$ war es möglich, die Makropore-zu-Matrix-Wassertransfergeschwindigkeit zu berechnen ($MXQ_{in} / MP-MX A_{inter} = MP-MX q_{transfer}$).

Für alle Experimente sinkt die mittlere Transfergeschwindigkeit über die Versuchsdauer, weil die vom Wasser benetzte innere Oberfläche in der Makropore zunimmt bei gleichzeitig gleichbleibender Injektionsrate (siehe Abb. 3.20). Dieser Effekt ergibt sich solange, bis die Eindringtiefe des Wassers so weit geht, dass der Makroporenausfluss beginnt und $MP-MX A_{inter_max}$ erreicht wurde.

Nach Ausflussbeginn ist die für den Wassertransfer aktive Fläche eine konstante Grenzfläche von ca. 173 cm²; trotzdem sinkt die Transfergeschwindigkeit aufgrund der Erhöhung der Sättigung der Matrix in der Nähe der Makropore weiter. Der Rückgang der Transfergeschwindigkeit begründet die Annahme, dass eine hohe Porenwasserdruckdifferenz zwischen Makropore und Matrix eine hohe Transfergeschwindigkeit ergibt und eine geringe Druckdifferenz, die sich durch die Aufsättigung ergibt, eine niedrige Transfergeschwindigkeit.

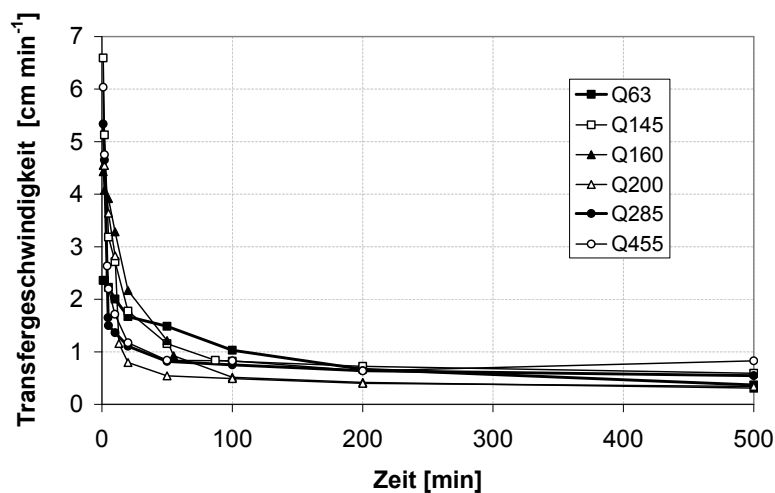


Abb. 3.20: Verlauf der mittleren Makropore-zu-Matrix-Wassertransfervgeschwindigkeiten über die Versuchsdauer von 500 Minuten für alle Experimente.

Wenn das Wasser sich in der Matrix fortbewegt, bewegt es sich weg vom Makroporennahbereich. Zugleich zeigen die Tensiometermessungen einen über lange Zeit etwa gleichbleibenden ungesättigten Zustand an, z.B. bei A2 und A6 ca. -40 cm Porenwasserdruck in Momenten, in denen die Wasserfront schon A14 passiert hat (siehe Tensiometermessungen in Abb. 3.17). Die laterale Wasserfrontausbreitung muss in Level A durch Wasser entstehen, welches mehr oder weniger lateral von der Makropore her gekommen ist. Das heißt, dass auch niedrige Porenwasserdruckunterschiede von 0 cm (Makroporengrenzfläche ist wassergesättigt) zu -40 cm (Matrix ist leicht ungesättigt) zu einem Wassertransfer führen, obwohl schon nahezu vollständige Sättigung vorliegt.

Im Kontext dieser Diskussion wird der Vorteil des relativ großen Radius des hier verwendeten Halbzylinders deutlich, weil diese Effekte bei kleineren Versuchsbehältern mit Matrixausdehnung im Zentimeterbereich (statt im Dezimeterbereich) gar nicht in der Weise auftreten würden. Es wird erwartet, dass, wenn die sich lateral ausbreitende Wasserfront früher an den äußeren Rand eines kleinen Versuchsbehälters kommen, sich die Wassersättigungsverhältnisse bis hin zum Nahbereich der Makropore verändern würden, so dass der Makroporenfluss in die Tiefe beschleunigt würde. Die Beobachtungen in zu kleineren Versuchsbehältern mit Makropore können also unrealistisch sein im Zusammenhang mit der Untersuchung von Einzelmakroporen (z.B. einer niedrigen Makroporendichte in der Natur).

Aber dennoch können die Randeffekte von kleineren Versuchsbehältern mit Makropore auch einen Effekt simulieren, der bei hohen Makroporendichten durchaus in der Natur vorhanden ist. Bei hohen Makroporendichten (z.B. im Abstand von wenigen Zentimetern) ist nämlich zu erwarten, dass sich die vom Makroporenwasser gespeisten Wasserfronten, die sich lateral in der Matrix ausbreiten, schnell treffen, verschmelzen, die laterale Ausbreitung stoppen und, wie zuvor beschrieben, den direkten Makroporenfluss in die Tiefe beschleunigen könnten, da die Matrix schneller eine hohe Sättigung erreicht (= niedrigerer Gradient für $MP-MX q_{transfer}$). In diesem Fall würde auch der Matrixfluss in die Tiefe beschleunigt, weil sich durch die höheren Sättigungen auch schnellere Durchlässigkeiten ergeben würden.

Desweiteren wurde die Beziehung zwischen den berechneten Transfargeschwindigkeiten und den Porenwasserdruck-Verhältnissen in der Matrix rund um die Makropore analysiert.

In einem **ersten Ansatz** wurde der gesamte im System vorhandene halbzyklindrische Matrix-Block (Radius = 50 cm und Höhe = 110 cm) als Raum betrachtet, der die Transferrate beeinflussen kann.

Der durchschnittliche Porenwasserdruckstatus im Gesamtsystem h_{MX} wurde mit den Tensiometern zu den Stichzeiten (0 bis 500 min) erfasst. Hierbei wurde jedem Porenwasserdruckstatus an einem Messpunkt eines Tensiometers ein proportionales Teilvolumen aus dem Gesamtvolumen zugeordnet (also insgesamt 24 Teilvolumina) und es wurde daraus ein entsprechend diesen Teilvolumen gewichteter durchschnittlicher Porenwasserdruck für das Gesamtsystem ermittelt (siehe Abb. 3.21). Die zugeordneten Teilvolumen hatten einen Anteil vom Gesamtvolumen von minimal 0,09% bei 2 cm von der Makropore entfernten Tensiometermesspunkten (z.B. B2), bis hin zu 18,72% bei 30 cm von Makropore entfernten Tensiometermesspunkten (F30).

Als Zwischenschritt zur Berechnung des durchschnittlichen Porenwasserdrucks des gesamten Matrixbereiches wurden die Tensionsmessungen jedes Tensiometerabstandes von der Makropore separat berechnet. Die gewichteten Volumenanteile waren 0,64%, 5,12%, 25,60% und 68,64% für die zusammengefassten Volumen für die Abstände 2, 6, 14 und 30 cm. Dadurch zeigt sich deutlich der hohe Anteil der 30 cm-Tensiometermessungen.

Zusätzlich wurden bei Versuchsabschnitten vor Ausflussbeginn nicht alle Niveaus berücksichtigt, sondern immer nur das oder die Niveaus bis in die (in denen), die Makropore auch

nur benetzt war (entsprechend h_{in}) plus das nächste Niveau. Durch das Einbeziehen des jeweils nächsten Niveaus wird berücksichtigt, dass gerade in dem Bereich, in dem h_{in} liegt, das Wasser auf die trockene Matrix trifft und deshalb hier die größten Gradienten bestehen, die den Transfer antreiben.

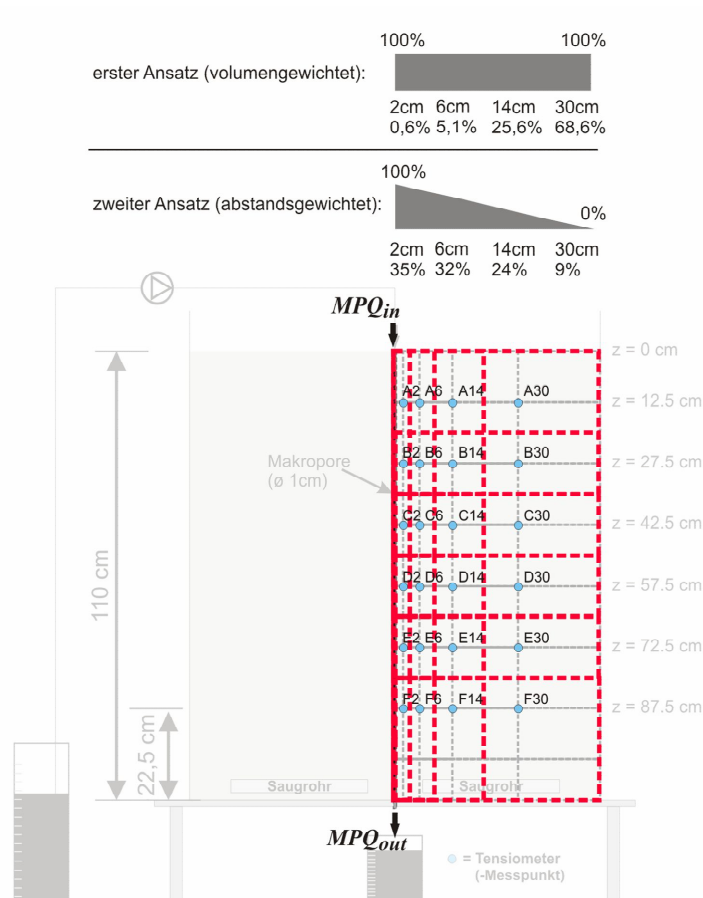


Abb. 3.21: Zuordnung eines Matrix-Volumenanteils zu jedem Tensiometermesspunkt (hier je Tensiometer jeweiliger 2D Flächenanteil innerhalb der dick gestrichelten Umrandungen, wobei in der Berechnung für den mittleren Porenwasserdruckstatus je Tensiometer das Volumen einging, welches sich hinter jeder 2D Fläche als 3D-Halbkreis erstreckt); oben Gewichtung dieser Volumenanteile in Prozent innerhalb eines Abstandes zur Makropore in Bezug zur Gesamtmatrix für beide Ansätze.

Im **zweiten Ansatz** wurde angenommen, dass die Transfergeschwindigkeit hauptsächlich durch die Porenwasserdruckverhältnisse im Nahbereich der Makropore beeinflusst wird; insbesondere in der Anfangsphase der Versuche, wenn der laterale Fluss nur wenige Zentimeter weit in die Matrix eingedrungen ist.

Dennoch kann der Einfluss des Porenwasserdruckstatus in den makroporentferneren Bereichen nicht vernachlässigt werden, weil schließlich das Fortschreiten der Wasserausbreitung durch die Matrix der trockenen Außenbereiche „angetrieben“ wird (Porenwasserdruckunterschied von Wasserfront ca. -40 cm zu trockener Matrix ca. -110 cm).

Auch im zweiten Ansatz, in Bezug auf die Beeinflussung von $q_{transfer}$ durch den Porenwasserdruckstatus der Matrix, wurde der gesamte Matrixblock des Systems (Volumen ca. 430 dm³) als relevant angesehen. Aber es wurde nun davon ausgegangen, dass der Porenwasserdruck im Makroporennahbereich die Transferraten stärker bestimmt als die Außenbereiche. Die Abnahme des Einflusses wurde nach der Entfernung zur Makropore gewichtet. Es wurde angenommen, dass der Einfluss von 100% direkt an der Makropore zu 0% direkt am Mantel hin abfällt.

Jedem Tensiometermesspunkt wurde eine Abstandsspanne zugeordnet. Hierbei wurde die Mitte zwischen zwei Tensiometermesspunkten als Grenze gesetzt. Folglich wurde dem

- Tensiometermesspunkt bei 2 cm Abstand von der Makropore die Distanzspanne von 0 bis 4 cm zugeordnet,
- für den Tensiometermesspunkt bei 6 cm Abstand von der Makropore die Spanne von 4 bis 10 cm,
- für den Tensiometermesspunkt bei 14 cm Abstand von der Makropore die Spanne von 10 bis 24 cm und
- für den Tensiometermesspunkt bei 30 cm Abstand von der Makropore die Spanne von 24 bis 50 cm.

Die Distanzspannen sind für die Tensiometer in 2, 6, 14 und 30 cm Abstand 4, 6, 14 und 26 cm lang. Unter der Voraussetzung einer linearen Abnahme des Einflusses auf die Transfertrate von 100% zu 0% von Makropore zu Mantel ergibt sich eine Gewichtung der vier Distanzspannen von 35%, 32%, 24% und 9% von Makropore zu Mantel. Die gemessenen Tensiometerwerte wurden mit der gleichen Methode wie im ersten Ansatz mit einer zusammenfas-

senden Mittelung der jeweiligen Tensiometer aus einer Distanz von oben nach unten im Matrixkörper gemittelt. Im Vergleich zum ersten Ansatz wird deutlich, dass der zweite Ansatz eine viel höhere Gewichtung der Tensiometermesswerte im Nahbereich der Makropore bei 2 und 6 cm Abstand ergibt (35% statt 0,6%). Zusätzlich wurden wie beim ersten Ansatz bei Versuchsabschnitten vor Ausflussbeginn nicht alle Niveaus berücksichtigt, sondern immer nur das oder die Niveaus bis in die (in denen), die Makropore auch nur benetzt war (entsprechend h_{in}) plus das nächste Niveau.

Für ausgewählte Stichzeiten von 0 bis 500 Minuten eines jeden Versuches wurde die für den Wassertransfer aktive Grenzfläche ermittelt (entsprechend den A_{inter} -Werten für Q63 und Q285 in Tabelle 3.4). Diese A_{inter} -Werte wurden verwendet, um die Transfargeschwindigkeiten zu ermitteln. Im folgenden Schritt konnten die Transfargeschwindigkeiten in Zusammenhang gebracht werden mit dem für die jeweilige Stichzeit ermittelten Porenwasserdruckstatus der Gesamtmatrix.

Der Zusammenhang ist für beide Ansätze in Abb. 3.22 dargestellt. Die Diagramme zeigen den grundsätzlich erwarteten Zusammenhang von $q_{transfer}$ und h_{MX} in dem Sinne, dass $q_{transfer}$ mit zunehmendem Porenwasserdruck abnimmt.

Aufgrund des ersten Ansatzes ergibt sich eine Dominanz des Einflusses auf die Transfargeschwindigkeit durch die länger trockenen Matrixbereiche, die entfernter von der Makropore liegen. Die Abnahme der Transfargeschwindigkeit bei kleinen Porenwasserdruckänderungen ist groß. Das zeigt sich zu Beginn, wenn die Porenwasserdrücke von -110 auf -80 cm steigen und gleichzeitig $q_{transfer}$ von ca. 6 auf 1 cm min^{-1} abnimmt.

Im Vergleich dazu zeigt sich durch den zweiten Ansatz ein erhöhter Einfluss der Makroporenahen Bereiche auf $q_{transfer}$. Die Abnahme der Transfargeschwindigkeit ist mit Porenwasserdruckzunahme nicht so „schnell“ wie im ersten Ansatz. Das zeigt sich anhand der Werte, bei denen $q_{transfer}$ von ca. 6 auf 1 cm min^{-1} abnimmt, während sich die Drücke von -100 auf -50 cm erhöhen.

Der Unterschied zwischen den Ansätzen zeigt, dass beim ersten Ansatz das System „länger trockener“ ist und beim zweiten Ansatz das System „schneller feucht“ wird. Der zweite Ansatz wird als der realistischere von beiden angenommen, weil der Nahbereich der Makropore

größeren Einfluss auf die Transfargeschwindigkeit bekommt und insgesamt die Entwicklung von einem trockenen zu einem feuchteren Zustand des Systems „gestreckter“ abgebildet wird. Wenn man die Ergebnisse der Transfargeschwindigkeits-Porenwasserdruck-Beziehung in den Zusammenhang mit der Retentionskurve des verwendeten Materials bringt, zeigt sich, dass die „hohen“ Transfargeschwindigkeiten von etwa 6 bis 3 cm min^{-1} bei Druckhöhen von -110 bis -80 cm auf der Retentionskurve im Bereich der Residualsättigung liegen. Das führt zu der Vermutung, dass die „hohen“ Transfargeschwindigkeiten, wie sie im Experiment auftraten, nur realistisch sind, wenn das betrachtete poröse Medium stark ungesättigt, im Bereich der Residualsättigung ist. In mittleren Sättigungsbereichen (Hauptporenbereich in der Mitte der Retentionskurve) und in den Bereichen hoher Wassersättigung sind deutlich niedrigere Transfargeschwindigkeiten zu erwarten, die bei den hier vorgestellten Experimenten im Bereich von ca. 1 cm min^{-1} lagen.

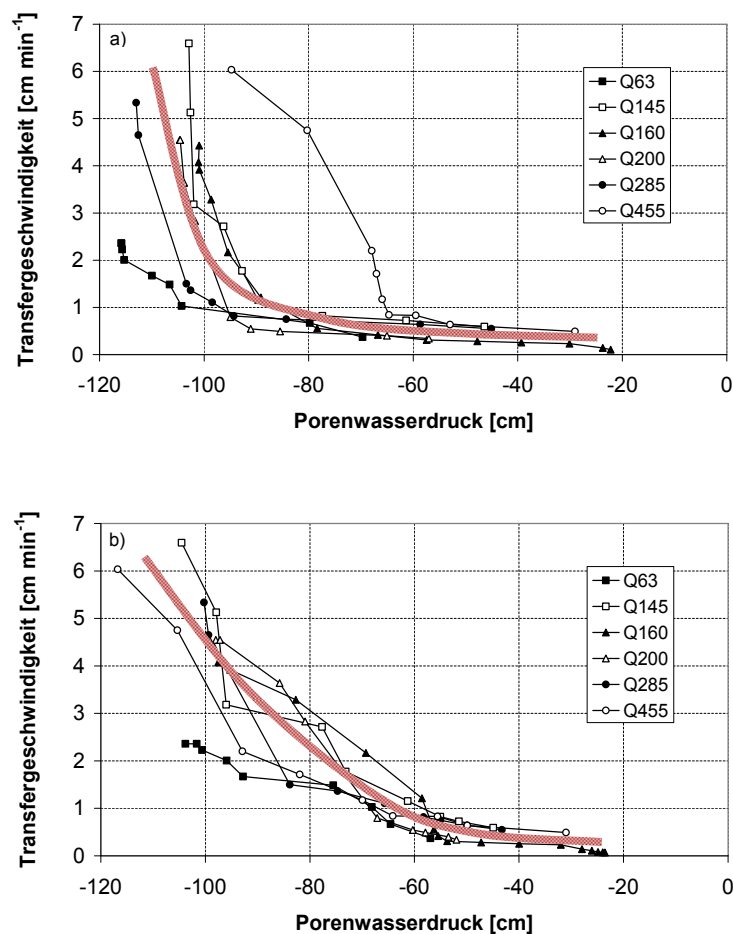


Abb. 3.22: Makropore-zu-Matrix-Wassertransfervgeschwindigkeiten in Relation zum Matrix-Porenwasserdruck, basierend auf dem sich erhöhenden Porenwasserdruck während des Versuchsverlaufs vom initial sehr trockenen Zustand zum durch den Makroporenfluss in die Matrix übergehende Wasser feuchter werdende Gesamtsystem; oben: Porenwasserdruck-Status der gesamten Matrix als gewichteter Mittelwert aus den Volumenanteilen je Tensiometermesspunkt (erster Ansatz); unten: Porenwasserdruck-Status der gesamten Matrix basierend auf einer höheren Gewichtung der makroporennaheren Tensiometermessungen (zweiter Ansatz), jeweils überliegend gezeigte dicke Linie als per Hand eingetragene Mittelwert-Trendlinie.

3.3.3 Transfervgeschwindigkeiten extrahiert aus Arbeiten anderer Autoren im Vergleich zu den hier ermittelten

Castiglione et al. (2003) entwickelten einen experimentellen Versuchsstand mit einer Säule mit einer Höhe von 75 cm, 24 cm Durchmesser und einer zentralen Makropore mit einem

Durchmesser von 0,1 cm. Bei dem experimentellen Aufbau war es möglich, zwischen Matrix- und Makroporenausfluss zu trennen. Sie verwendeten als poröses Medium einen sandigen Lehm mit einem Tonanteil von 6%. Die Makroporensäule erlaubte eine Wasserzufuhr über die gesamte obere Säulenoberfläche, die sowohl aus Makropore als auch aus Matrix bestand, so dass gleichzeitig von oben in beide Bereiche Wasser eindringen konnte.

In einem Referenzversuch wurde die gefüllte Säule ohne Makropore verwendet, wobei dann der Zufluss und Ausfluss in Bezug zur reinen Matrix charakterisiert werden konnte. Wenn anschließend dann im Experiment mit Makropore der Matrixdurchfluss des Referenzversuches abgezogen wurde, konnte der Anteil des reinen Makroporenzufusses herausgerechnet werden. Zusätzlich konnte ein in Bereiche aufgeteilter Säulenboden den Matrixausfluss vom Makroporenausfluss trennen.

In einem präsentierten Experiment konnte nun angenommen werden, dass die Differenz zwischen gemessenem Makroporenausfluss und errechnetem Makroporenzufuss der Wasseranteil ist, der in die Matrix übergeht, wenn der Makroporenausfluss kleiner ist als der Makroporenzufuss. Wenn der Zufluss gleich dem Ausfluss ist, dann wird maximale Sättigung angenommen, bei der kein Wasser mehr ausgetauscht wird, zumindest in der Nettobilanz, denn ein Eindringen von Wasser in die Matrix und ein wieder Austreten aus der Matrix zurück in die Makropore der gleichen Menge ist nicht ausgeschlossen (Matrix-Durchströmung).

Bei Experimenten mit einer initial sehr trockenen Matrix war der Makroporenausfluss nicht vorhanden oder zu Beginn des Experimentes sehr niedrig, was durch lateralen Wasserübergang von Makropore zu umgebender Matrix aufgrund von „Diffusion“ (Castiglione et al., (2003)) entsteht. Der laterale Wasserübergang entsteht aufgrund des hohen Porenwasserdruckunterschieds von Makropore zu Matrix. Nachdem aber mehr und mehr Makroporenausfluss entstand, konnte angenommen werden, dass sich die Matrix aufgesättigt hatte und die „exchange velocity“ (Wassertransfer von MP zu MX bei Castiglione et al. (2003)) mit der Zeit abnahm.

Für den Vergleich mit den hier in diesem Kapitel „Makroporenfluss-Experimente“ vorgestellten Experimenten konnte der kumulativ dargestellte „exchange flow“ bei einem Versuch von Castiglione et al. (2003) verwendet werden (dort Abbildung 12 auf Seite 220), um Transfer-

geschwindigkeiten (von MP zu MX) zu errechnen. Zur groben Abschätzung der Transfergeschwindigkeiten wurde von mir die gezeigte kumulative „exchange flow“-Kurve über die Zeit in drei Abschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt umfasst die ersten ca. drei Stunden mit einem mittleren Volumenfluss von ca. $5 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$. Die folgenden Abschnitte sind bei Castiglione et al. (2003) numerisch simuliert extrapoliert dargestellt: Abschnitt zwei von ca. drei bis vier Stunden mit Volumenflussraten von ca. $1,6 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ und Abschnitt drei ab ca. vier Stunden bis zum Ende des Versuchs mit Volumenflussraten nahe Null.

Bei Castiglione et al. (2003) kann angenommen werden, dass das transferierte Wasservolumen über die gesamte Länge der Makropore in die Matrix gelangen konnte.

Bei den hier in diesem Kapitel von mir referierten Versuchen (Q63 bis Q455) war es möglich, eine generellere Beschreibung des Transfers in Form einer Geschwindigkeit in cm min^{-1} zu ermitteln, indem der Volumenfluss auf die Grenzfläche A_{inter} bezogen wurde.

Im Fall der Experimente von Castiglione et al. (2003) war eine 75 cm lange Makropore mit einem Radius von 0,05 cm vorhanden, was einem A_{inter} -Wert von ca. $23,6 \text{ cm}^2$ entspricht. Wenn ich nun die in den drei Zeitabschnitten oben aufgeführten Volumenflüsse bei Castiglione et al. (2003) durch A_{inter} teile, ergibt sich die Möglichkeit Transfergeschwindigkeiten abzuschätzen. Für den ersten Abschnitt ergeben sich Transfergeschwindigkeiten von $0,2 \text{ cm min}^{-1}$ und im zweiten Abschnitt von $0,07 \text{ cm min}^{-1}$.

Sehr ähnliche Experimente wie von Castiglione et al. (2003) wurden von Köhne und Mohanty (2005) mit sandigen Lehm durchgeführt. Die Bodensäule war 80 cm hoch und hatte einen Durchmesser von 24,4 cm und die Makropore wurde mittels eines zentral integrierten Grobsandbereichs mit einem „großen“ Durchmesser von 2,4 cm realisiert.

Bei den Experimenten von Köhne und Mohanty (2005) war es ebenfalls möglich, den Makroporenausfluss vom Matrixausfluss zu trennen. Entsprechend meinem Vorgehen beim „Castiglione et al. (2003)“-Experiment konnten bei Köhne und Mohanty (2005) ebenfalls die Volumenströme von einer kumulativen Transferfluss-Kurve abgeleitet werden. Es wurde hierbei der Versuch betrachtet, bei dem das Wasser von unten in die Makropore zugeführt wurde, in die Matrix übergang und über die Matrix wieder austrat (Abbildung 10 in Köhne und Mohanty (2005) mit kumulativem Austauschfluss über die Zeit).

Mittlere Transferraten wurden errechnet und betragen $20 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ (erste 10 Minuten), $10 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ (10 bis 30 Minuten), $3,3 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ (30 bis 90 Minuten) und schließlich Raten

$< 3,3 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ nach 90 Minuten. Wiederum konnte A_{inter} für die Experimente von Köhne and Mohanty (2005) unter Verwendung der Makroporenlänge von 80 cm und einem Radius von 1,2 cm zu ca. $603,2 \text{ cm}^2$ errechnet werden. Es wurde angenommen, dass die gesamte A_{inter} für den Wassertransfer aktiv sein konnte. Somit konnte die gesamte A_{inter} verwendet werden, um für die oben angegebenen Zeitabschnitte die Transfargeschwindigkeiten zu $0,033 \text{ cm min}^{-1}$, $0,017 \text{ cm min}^{-1}$ und $0,006 \text{ cm min}^{-1}$ für die Zeitabschnitte bis 90 Minuten abzuschätzen.

Im Vergleich der Experimente von Castiglione et al. (2003) und Köhne und Mohanty (2005) zeigte sich, dass sich die ermittelten Transfargeschwindigkeiten zumindest für die Anfangsphasen der jeweiligen Versuche unterschieden. Mit $0,2 \text{ cm min}^{-1}$ liegt die Transfargeschwindigkeit bei Castiglione et al. (2003) rund eine Größenordnung höher als bei Köhne und Mohanty (2005) mit Werten von $0,033$ und $0,017 \text{ cm min}^{-1}$. Zwei wesentliche Einflussfaktoren werden für diesen Unterschied vermutet. Der erste ist die größere Makropore bei Köhne und Mohanty (2005). Der zweite Faktor findet sich in den Unterschieden der Anfangsbedingungen im Porenwasserdruckprofil. Bei Castiglione et al. (2003) zeigten sich Porenwasserdrücke von unten nach oben von -140 zu -150 cm, bei Köhne und Mohanty (2005) dagegen von -60 zu -120 cm von unten nach oben.

Der trockenere Anfangszustand beim Experiment von Castiglione et al. (2003) könnte die höheren Transfargeschwindigkeiten aufgrund der höheren Druckgradienten und folglich der höheren Saugkräfte erklären.

Die bei Castiglione et al. (2003) und Köhne und Mohanty (2005) vorhandenen Transfargeschwindigkeiten von maximal ca. $0,2 \text{ cm min}^{-1}$ zeigen einen deutlichen Unterschied zu den Transfargeschwindigkeiten der Experimente Q63 bis Q455 mit deutlich höheren Transfargeschwindigkeiten von 6 bis 1 cm min^{-1} . In den Experimenten der vorliegenden Arbeit wurde Feinsand und eine relativ große Makropore mit einem Durchmesser von 1 cm benutzt. Die Transfargeschwindigkeiten in den Experimenten waren viel höher als erwartet. Es wird angenommen, dass der Einfluss der höheren hydraulischen Durchlässigkeit des Feinsandes im Vergleich zu den lehmigen Materialien bei Castiglione et al. (2003) und Köhne und Mohanty (2005) hier neben der größeren Dimension des Matrixkörpers entscheidend für die höheren Transfargeschwindigkeiten war.

3.4 Makroporenfluss-Experimente: Zusammenfassung und Ausblick

Das Design und die experimentelle Prozedur der hier vorgestellten Laborstudie ist neuartig, aufgrund seiner „großen“ Abmessungen (Halbzylinder mit einem Radius von 50 cm und einer Füllhöhe von 110 cm), der Möglichkeit der visuell beobachtbaren Wasserausbreitung (durchsichtige Glasscheibe an der gedachten Zylinder-Schnittfläche), der hohen Anzahl an Tensiometermesspunkten (24 Tensiometer in sechs Tiefenniveaus und in vier Abständen zur zentral gelegenen Makropore) und der Möglichkeit, die Wasserzufuhr ausschließlich über die Einzelmakropore zu realisieren, um ausschließlich den Makroporenfluss und den Wassertransfer von Makropore zur umgebender Matrix zu erfassen (ohne Wasserinfiltration über die Oberfläche der Matrix von oben).

Es wurde gezeigt, dass der Makroporenfluss vollständig oder teilweise von der die Makropore umgebenden Matrix „absorbiert“ werden kann, und zwar so weit, dass kein oder kein relevanter vertikaler Abfluss über die Makropore in die Tiefe entsteht. Diese Situation ergab sich ausgehend von trockenen Anfangsbedingungen und niedrigen Wasserinjektionsraten. Mit anderen Worten, die Makropore stellt in dieser Situation nur eine kurzzeitige „Durchgangsstation“ für Wasserinfiltration in die Matrix nahe der Oberfläche dar.

Erst mit hohen Injektionsraten kann der direkte Makroporenfluss der lateralen „Absorption“ des Wassers in die Matrix auch unter den trockenen Anfangsbedingungen überwiegen. Dies gilt aber nur für länger anhaltende Wasserzufuhr, denn kurzfristig kann auch bei hohen Wasserzufuhrsraten der Makroporenfluss durch Wasseraufnahme in der Matrix deutlich vermindert sein. Makroporenfluss kann sich entwickeln, wenn die Wassermenge in der Makropore höher ist als die maximale lateral in die Matrix transferierbare Wassermenge. Unter diesen Bedingungen kann also über Makroporen eine relevante Wasserzufuhr tief in den Untergrund entstehen und entsprechend der Hangbewegungshypothese der hier vorliegenden Arbeit in der Tiefe des Hanges den Porenwasserdruck schnell ansteigen lassen mit der Folge von Kräfteverschiebungen hin zu einer Destabilisierung des Hanges.

Aufgrund des gewählten experimentellen Designs war es möglich, die Transfergeschwindigkeiten abzuleiten, mit der das Wasser von der Makropore in die umgebende Matrix fließt.

Weiter war es möglich, diese Transfargeschwindigkeiten in Relation zum Porenwasserdruckstatus der Feinsandmatrix zu bringen mit dem Ergebnis, dass eine klare Transfargeschwindigkeiten-Verminderung mit einer Erhöhung des Porenwasserdrucks in der Matrix (von trocken nach feucht) einhergeht.

Die erfassten Makropore-zu-Matrix-Wassertransfargeschwindigkeiten für den hier verwendeten Feinsand lagen bei 6 cm min^{-1} (sehr trockene Anfangsbedingungen) bis 1 cm min^{-1} (feuchte Matrix-Bedingungen). Durch Heranziehung von Veröffentlichungen über ähnliche Makroporenexperimente in lehmigen Materialien war es möglich, weitere Transfargeschwindigkeiten abzuschätzen. Im lehmigen Material wurden vergleichsweise niedrige Transfargeschwindigkeiten von $0,2 \text{ cm min}^{-1}$ (leicht trockene Anfangsbedingungen) bis $0,033 \text{ cm min}^{-1}$ (mittel-feuchte Anfangsbedingungen) ermittelt. Es konnte also gezeigt werden, dass die Transferraten bei Feinsand um bis zu zwei Größenordnungen höher anzunehmen sind als bei lehmigen Material.

Neben der vielfältigen Auswertbarkeit der gewonnenen Daten ergaben sich einmalige Visualisierungen des Wasserübergangs von Makropore zur umgebenden Matrix und detaillierte experimentelle Datensätze. Beides kann für numerische Simulationen sehr hilfreich sein.

Zukünftige Arbeiten könnten sich darauf fokussieren, die Porenwasserdruck-Transfargeschwindigkeits-Beziehungen detaillierter und vielfältiger zu erfassen. Dies könnte geschehen, indem der hier vorgestellte experimentelle Aufbau und die experimentelle Prozedur systematisch für verschiedene Materialien, Anfangsbedingungen und Makroporendurchmesser verwendet würde.

Zusätzlich sind Studien denkbar, bei denen die Wasserzufuhr in die Makropore nicht, wie hier vorgenommen, ausschließlich kontinuierlich geschieht, sondern dass z.B. mit schwankenden Injektionsraten und unterbrochenen Injektionen natürlichere Wasserzufuhrabläufe simuliert werden. Die Unterbrechungen könnten hierbei Tage oder Wochen andauern und ergäben die Möglichkeit zur Berücksichtigung von Evaporationsphasen. Durch die Evaporation entstünden wiederum trockenere Bedingungen, die die Wasseraufnahmekapazitäten der Matrix wieder erhöhen würden. In diesem Zusammenhang sind sicherlich Szenarien denkbar, bei denen niemals relevanter Makroporenfluss in die Tiefe entsteht, weil zugeführte und abgeführte Wassermenge immer in einem gewissen Gleichgewicht stehen.

4 Böschungsbruch-Experimente: Porenwasserdruckabhängige Böschungsstabilität

Wie bereits eingangs (siehe Kapitel 1) angemerkt, waren die experimentellen Labor-Untersuchungen streng in Infiltration (Kapitel „Makroporenfluss-Experimente“) und Deformation (dieses Kapitel „Böschungsbruch-Experimente“) getrennt. Dies lag einmal daran, dass bei einer Kombination der Versuche die Anzahl der gemessenen Parameter zu hoch und somit eine genaue Beschreibung der einzelnen Prozesse nicht möglich gewesen wäre. Der zweite Grund für die strikte Trennung lag in der experimentellen Durchführung: Bei Infiltrationsversuchen konnte, bei entsprechender Anordnung, davon ausgegangen werden, dass der Einfluss invasiver Instrumentierung (Tensiometer) auf das Fließ- und Ausbreitungsverhalten zu vernachlässigen war. Bei Deformationsversuchen kann jede Instrumentierung die Statik der Matrix nachhaltig beeinflussen und ist somit zu vermeiden.

Hangrutschungen oder ein plötzlicher Böschungsbruch treten häufig mit oder im Anschluss von heftigen oder lang anhaltenden Regenfällen auf, die eine Schwächung der hangstabilisierenden Kräfte verursachen. Oberflächenabfluss, Infiltration, Grundwasserströmung und Zwischenabfluss sowie Evaporation wirken in unterschiedlichem Ausmaß und auf sehr unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen auf einen Hang ein und beeinflussen dessen elastisches und viskoplastisches Verformungsverhalten.

Wie in der Einleitung dieser Arbeit erwähnt, ist nur durch die Analyse des Zusammenspiels von hydrologischen, hydraulischen und bodenmechanischen Prozessen ein besseres Verständnis der Ursachen für das langsame Kriechen des Heumöser Hanges zu erwarten.

Das Zusammenspiel von hydraulischen und bodenmechanischen Prozessen wurde in dieser Arbeit in einem künstlichen Böschungsmodell im Technikmaßstab mit klar definierten Rand- und Anfangsbedingungen simuliert. Der Begriff Böschung wurde hier gewählt, weil der im Technik-Modell aufgebaute Sandkörper in seiner Form einer realen Böschung oder einem Damm entspricht und weniger mit einem natürlichen „größeren“ Hang zu tun hat. Böschungsbrüche, wie sie in dem hier vorgestellten Kapitel durch Experimente erzeugt wurden, sind Brüche, die als Rotationsbrüche zu klassifizieren sind.

An der Böschung wurde eine externe Auflast verwendet, die am Böschungskopf als Randbedingung fungierte und die die im natürlichen System bergauf befindliche Auflasterweiterung, bestehend aus Korngerüst, Wasser, Schnee und sonstigen Gewichten, simulierte. In den Versuchen wurde dann entweder die externe Auflast oder die Wassersättigung in dem porösen Hangmedium variiert, bis ein Böschungsbruch (Böschungsversagen) auftrat.

Einleitend muss darauf hingewiesen werden, dass die Ergebnisse dieses Kapitels „Böschungsbruch-Experimente“ nicht die direkte Vorhersage eines Versagens eines natürlichen Hanges (z.B. Heumöser Hang) zum Ziel hatten. Die Experimente wurden unter Verwendung von homogenem Sand als porösem Medium durchgeführt, während ein natürlicher Hang eher aus heterogenen, anisotropen meist lehmigen Böden mit variablen Wasserdurchlässigkeiten besteht. Dennoch war es Ziel der Experimente, „genereller“ den Einfluss von verschiedenen Sättigungsverhältnissen und dynamisch steigendem Porenwasserdruck auf die Böschungsstabilität in einem idealisierten System zu ermitteln, um Prozessverständnis zu vertiefen und Anhaltspunkte zu bekommen, in welcher Art und Weise verschiedene Faktoren eine Hangstabilität beeinflussen können.

Zur Erstellung der Böschung in einem Container wurde Feinsand verwendet. Feinsand gleicher Art, wie er auch bei den vorangegangenen Experimenten zum Makroporefluss verwendet wurde. Die Materialkörnung und die hydraulischen Eigenschaften können dort nachgelesen werden (siehe Kapitel 3.2.2). Die Sättigungen in den Böschungsbruch-Experimenten konnten daher aus den Retentionskurven abgeschätzt werden. Aufgrund der Abmessungen des Experiments (ca. 90 cm hoch) und der Korngrößenverteilung des Sandes (hoher Lufteintrittspunkt = hoher Kapillarsaum von ca. 50 cm) war die Sandböschung insgesamt bei allen Versuchen nahezu vollständig gesättigt, unabhängig von der Lage des Grundwasserspiegels.

Dennoch konnten diese Experimente einen wichtigen Beitrag zu einem Verständnis der Abhängigkeit der Hangstabilität von externen Lasten und Porenwasserdruck leisten. Zusätzlich fanden die erfassten Datensätze ihre Verwendung bei der Verifizierung von numerischen Modellen (Ehlers et al., 2011).

4.1 Einführung

Eine Übersicht über Publikationen aus den verschiedensten Disziplinen, die niederschlagsinduzierte natürliche Erdrutsche untersuchten, wurde von Crosta und Frattini (2008) gegeben. Bisherige Untersuchungen reichten von großen Feld Monitoring-Systemen mit Methoden der Fernerkundung bis zur rein numerischen Modellierungen von Erdrutschen auf verschiedenen Skalen. Felduntersuchungen, die die niederschlagsinduzierten Hangrutschungen untersuchten und die sich auf den Zusammenhang zwischen Infiltration und Porenwasserdruck konzentrierten, wurden durch Tsaparas et al. (2003) und Rahardjo et al. (2005) veröffentlicht.

Während die genannten Studien über Feldversuche berichteten, konzentriert sich die hier vorliegende Studie auf Experimente zu Böschungsbruchstabilitäten im Labormaßstab. In der Literatur sind einige experimentelle Studien zu Böschungsbrüchen in Kisten, Containern oder Gerinnen beschrieben worden. Die meisten dieser Experimente haben den Fokus auf Schutt- oder Massenstromrutschungen, verursacht durch Erosion und durch Regenverflüssigung (Iverson et al., 1997, 2000; Wang und Sassa, 2001, 2003; Okura et al., 2002; Moriwaki et al., 2004; Lourenco et al., 2006; Olivares und Damiano, 2007; Tohari et al., 2007; Wang und Shibata, 2007; Huang et al., 2008, 2009). Bei all diesen Studien wurden keine externen Auflasten verwendet. Neben der Analyse der Veränderungen des Rutschungskörpers wurden in den meisten Fällen ausschließlich Porenwasserdrücke und/oder Feuchtemessungen durchgeführt mit dem Ziel, verschiedenste Hangversagensmuster zu ermitteln, wobei insbesondere das veränderliche Porenwasserdruckgeschehen während eines Böschungsrutsches genauer analysiert wurde. Iverson et al. (2000) fokussierten in ihren Versuchen durch steigende Porenwasserdrücke ausgelöste Rutschungen bei verschiedenen Bodenporositäten. Moriwaki et al. (2004) verwendeten eine 21,6 m lange geneigte Rinne um Skaleneffekte zu minimieren. Sie untersuchten Porenwasserdruckverhältnisse während der Rutschung, wobei hohe Sättigung herrschte, die durch Niederschläge erzeugt worden waren. Sie fanden Porenwasserdruck-Abnahme und –Zunahme-Effekte während der Rutschungsphase, die auf Dilatation und Kompaktion im sich deformierenden porösen Medium zurückzuführen sind.

Nur wenige Studien fokussieren auf die Hangdestabilisierung durch eine gezielte Erhöhung der Grundwasserströmung oder Wasserinjektion von unten her in die Modellhänge. Lou-

renço et al. (2006) generierten Porenwasserdruck (und somit Grundwasseranstieg) von unten her in sandigen Modellhängen (bestehend aus unterschiedlichen Schichten) nach Besprenkelung mit Wasser auf die Oberfläche des Hanges oder durch direkte Grundwasserinjektion von unten her, bis rückschreitende Erosionsrutschungen ausgelöst wurden.

Einige Experimente, bei denen externe Lasten verwendet wurden, können in der Forschung gefunden werden auf dem Gebiet der mechanischen Damm- und Böschungsverstärkung. Experimente auf der Meterskala mit Streifenfundamenten als externe Last auf den Böschungsköpfen wurden von Huang et al. (1994), Yoo (2001), Bathurst et al. (2003) und El Sawwaf (2007) durchgeführt. Diese Forscher fokussierten auf einen Vergleich zwischen verstärkten und unverstärkten Böschungen. Sie fanden Methoden zur Stabilisierung der Hänge durch unterschiedlich angeordnete geschichtete oder gestreifte Verstärkungselemente. Diese Studien konzentrierten sich auf die räumliche und zeitliche Verschiebung oder Nichtverschiebung der Auflasten und nicht auf den Porenwasserdruck oder die Feuchteverhältnisse im Böschungskörper.

Experimente mit externen Auflasten wurden in einem Sandbehälter von Roy und Mandal (2009) durchgeführt. Sie konzentrierten sich auf unterschiedliche Positionen der Last (realisiert als starrer Block am Böschungskopf) und untersuchten die Stabilität unter den Aspekten von Neigungswinkel und anisotropen Schichtungen im Böschungskörper. Ihre Ergebnisse zeigten unterschiedliche Verdichtungs- und Versagensphasen während des Eindringens der externen Last.

Eine Studie von Cho und Lee (2001) untersuchte Hangstabilitäten und berechnete Sicherheitsfaktoren für einen ungesättigten Hang mit Hilfe von numerischen Werkzeugen. Simulierte Regenwasserversickerung in unterschiedlich durchlässigen Materialien führte hierbei zu einer Änderung der Kapillarspannung im Hangkörper und damit zu einer Änderung des Spannungsfeldes, die folglich die Hangstabilität beeinflusst. Paul und Kumar (1997) entwickelten ein Computerprogramm, um die Stabilität von Hängen mit Baulasten zu analysieren. Einige andere Finite-Element-Berechnungen für Hangstabilitäts-Probleme wurden durchgeführt von Lao-uafa und Darve (2002), Li et al. (2003) und Ehlers et al. (2004). Li et al. (2003) zeigten unter anderem ein numerisches Beispiel für einen 19,2 m langen und 9,6 m hohen Hangkörper belastet durch eine Auflast auf seiner Hangkrone. Sie verglichen niedrige und hohe Belastungen und fokussierten auf den dadurch generierten Überschussporenwasserdruck und die damit

verbundenen plastischen Verformungen im Scherbandbereich unter Berücksichtigung von dynamischen Effekten.

4.2 Material und Methoden

4.2.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Experimente wurden an der Forschungseinrichtung für Grundwasser- und Altlastensanierung (*VEGAS*) an der Universität Stuttgart durchgeführt. Die Haupthypothese war, dass Böschungsversagen durch sich (schnell) ändernde Wassergehalte (Porenwasserdruckanstiege) im Böschungskörper ausgelöst werden können. Es wurde auf drei Experimentvarianten fokussiert. In den ersten zwei Experimentvarianten wurden unterschiedliche Grundwassersituationen hergestellt (Fall A: Statisches Grundwasser und Fall B: Stationärer Grundwasserfluss), bevor die externe Auflast schrittweise erhöht wurde, bis der Versagensfall eintrat. Das primäre Ziel dieser ersten beiden Experimente war es, geeignete Anfangsbedingungen zu bestimmen, um dann in einer dritten Reihe von Experimenten (Fall C) den Einfluss von schnell ansteigendem Porenwasserdruck in einem Hangkörper auf die Hangstabilität entsprechend der Heumöser-Hang-Bewegungshypothese testen zu können. Die Auflast fungierte bei Fall C als Repräsentant des im natürlichen System hangaufwärts befindlichen Gewichts. Die Höhe der Auflast wurde so gewählt, dass die Böschung stabil war unter der Bedingung, dass der Grundwasserspiegel tief lag und dadurch der Böschungskörper zumindest teilweise ungesättigt war. Die Auflasthöhe wurde zugleich aber auch so gewählt, dass mit steigender Wassersättigung ein Böschungsbruch zu erwarten war.

Bei der Versuchsreihe zur dritten Experimentvariante (Fall C) begannen die Versuche zunächst mit einer statischen Grundwassersituation als Anfangsbedingung (entsprechend der Experimentvariante Fall A). Ausgehend von dieser Anfangsbedingung wurde die Auflast schrittweise erhöht bis zu einer Höhe von ca. 90% der zu erwartenden maximal haltenden Auflast, die sich aus den Versuchen von Fall A ergab. Dann wurde Wasser in der Nähe des Hangfußes über einen hohen Wasserdruck injiziert und damit eine schnelle und lokale Erhöhung des Porenwasserdrucks erzeugt, der nach kurzer Zeit ein Böschungsversagen auslöste. Die Experimente wurden ausgiebig mit Messinstrumenten überwacht, um einen Einblick in das Hangverhalten zu bekommen und um umfangreiche Datensätze zur Validierung numerischer Modelle bereitstellen zu können.

Der Container für die Böschungsbruchexperimente (siehe Abb. 4.1) war 100 cm hoch, 200 cm lang und 80 cm breit und wurde aus Stahl gebaut (Germer und Braun, 2009). Die Größe des Versuchscontainers und die Dicken der Wände und Stabilisierungstreifen wurden nach vorherigen numerischen Berechnungen abgeschätzt. Eine Längsseite des Containers war aus einer Glasscheibe (Dicke 38 mm) konstruiert, um visuelle Beobachtung der Wassersättigung und der Materialdeformation zu ermöglichen. Die gegenüberliegende Längsseite („Rückseite“) wurde aus Stahl erstellt und war am unteren Rand mit Piezometer-Löchern ausgestattet (siehe Abb. 4.2). Jedes Piezometer-Loch wurde mit einem feinen Edelmetallgewebe nach innen hin abgedeckt und mit einem 0 bis 1 bar Drucktransmitter Typ SML-30.0 mit maximalem Fehlerband von 5 mbar (Firma AB Elektronik Sachsen GmbH, Klingenberg, Deutschland) von außen her bestückt, um die Porenwasserdrücke messen zu können. Beide Schmalseiten des Containers waren aufgebaut wie "Brunnen", mit denen konstante Wasserdruck-Randbedingungen eingestellt werden konnten und über die das Wasser auf der jeweiligen gesamten Schmalseitenfläche in das und aus dem Böschungs-System strömen konnte. Technisch gesehen wurden diese sich im Container befindlichen Brunnen-Kammern durch ein ca. 10 cm vor dem Schmalseitenaussenrand aufgestelltes Lochblech hergestellt. Das Lochblech war mit einem feinen Drahtgewebe bedeckt, welches Sandpartikel zurück halten konnte, aber dennoch für strömendes Wasser sehr gut durchlässig war. Die Brunnen-Kammern waren nahe dem Grund des Containers mit Konstant-Wasserdruck-Behältern verbunden und zusätzlich mit Drucktransmittern bestückt, um dort den Wasserdruck (Wasserstand) messen zu können. Der Boden des Containers war wasser- und luftdicht aus einer Stahlplatte hergestellt und der Container war nach oben hin zur Raumatmosphäre offen.

Die externe Auflast, die das im natürlichen Hangsystem hangaufwärts liegende Gewicht simuliert, konnte über eine horizontal angeordnete Druckplatte (30 cm x 78 cm) aufgebracht werden, die oben auf dem Böschungskopf positioniert war. Die Auflastplatte konnte über einen Doppel-Hydraulikzylinder in den Hang gedrückt werden. Am Hydrauliksystem war ein 0 bis 600 bar Drucktransmitter (Fa. KELLER AG für Druckmesstechnik, Winterthur, Schweiz) integriert, der die Druckverhältnisse kontinuierlich an einen Computer weiterleiten konnte. Die Hydraulikzylinder waren an ihrem oberen Ende so befestigt, dass sie an einem Schlitten horizontal in Containerlängsrichtung über einen Linearmotor verschoben werden konnten. Durch diese Konstruktion war es möglich, eine exakt vertikale Stellung der Zylinder vor und auch während des Versuchsdurchlaufes sicher zu stellen und somit auch die exakt vertikale

Einbringung der Auflast in das System zu gewährleisten (siehe Abb. 4.3). Zwei übereinander angeordnete Ultraschall-Abstandssensoren kontrollierten während des Versuchs die Stellung der Zylinder. Sobald die gemessenen Abstände an den beiden Sensoren, die auf eine Referenzfläche an den Zylindern gerichtet waren, nicht mehr gleich waren, also eine Zylinder-Schrägstellung anzeigten, wurden über den Linearmotor die Zylinder am Schlitten so weit verschoben, bis wieder eine vertikale Position der Zylinder vorhanden war. Zwei weitere Ultraschall-Abstandssensoren waren horizontal nebeneinander angeordnet und auf die Auflastplatte gerichtet (siehe Abb. 4.3). Während des Versuchsdurchlaufes konnte mit diesen Sensoren der zeitliche Verlauf des Eindrückens (vertikale Verschiebung) der Auflastplatte registriert werden.

Die Spannungssignale der Ultraschall-Sensoren und der Drucktransmitter wurden über ein „USB-LabJack UE9“-Daten-Erfassungsgerät (LabJack Corp, Denver, CO) erfasst. Die kontinuierliche Verarbeitung der Daten wurde mit „Profilab 3.0“-Software durchgeführt (Abacom Ingenieurgesellschaft, Ganderkesee, Deutschland). Diese Software wurde auch verwendet, um die fortlaufenden Ultraschallmessungen auszuwerten und auf dieser Grundlage durch Vergleichermodule und Regelungskreise die vertikale Position der Hydraulikzylinder automatisch zu steuern.

Der Container wurde mit Feinsand (GEBA siehe Kapitel 3.2.2) nass gepackt, d.h., bevor eine Schicht Sand eingefüllt wurde, wurde der Wasserspiegel um 2-3 cm angehoben. Es wurde nur soviel Sand hinzugefügt, bis der Wasserstand nur noch exakt so hoch war wie die Sandfüllung. Daraufhin wurde die Schicht mit einem Nagelbrett-Stampfer etwas verdichtet und zugleich gemischt (siehe Abb. 3.5). Die Höhe jeder horizontalen Schicht betrug dann ca. 5 cm. Diese Prozedur wurde bis zu einer Auffüllung mit einer Höhe von 90 cm sukzessive weitergeführt. Anschließend wurde das System über die seitlichen Brunnen-Kammern entwässert, wobei die Konstant-Druckbehälter als Ausfluss dienten. Diese waren auf einer Höhe von 10 cm über der Grundplatte des Containers positioniert, so dass sich ein Grundwasserspiegel von 10 cm einstellen konnte. Nach der Entwässerung wurde an der „rechten“ Seite die Böschung mit einem Winkel von 40° durch vorsichtige Sandentfernung herausmodelliert. Während der Sandentfernung wurden je zwei 250 cm^3 Proben in den Tiefen 20 und 40 cm unter der Oberfläche (Niveau Lastplatte) entnommen. Die Proben dienten zur Feststellung der Lagerungsdichte und somit der Kontrolle der Füllung. Die ermittelten gemittelten Lagerungsdichten von allen Versuchen lagen im Bereich von $1,50$ bis $1,56 \text{ g cm}^{-3}$.

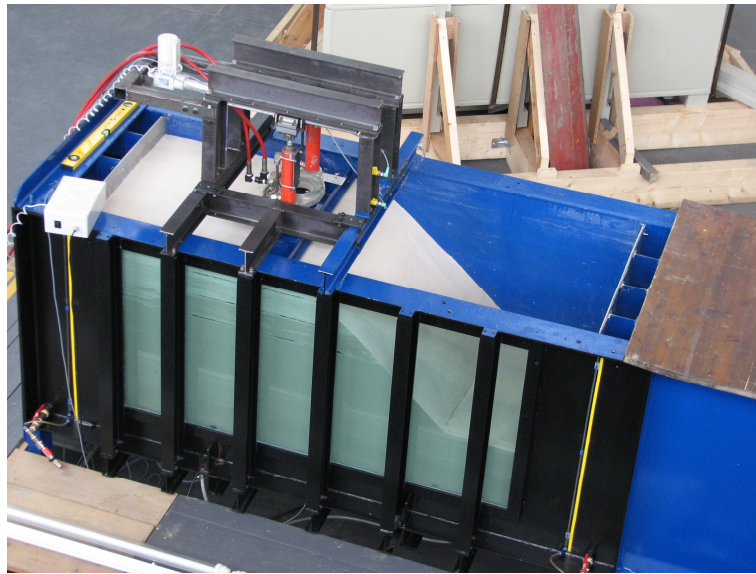


Abb. 4.1: Der ca. 200 cm lange, 100 cm hohe und 80 cm breite Container für die Böschungsbruch-Experimente mit eingebauter Sandböschung; vorne: Fensterscheibe mit vorgelagerten Scheibenstabilisierungstreifen; oben: Auflastsystem mit Hydraulikzylindern und Auflastplatte.



Abb. 4.2: Rückansicht des Containers mit Konstant-Wasserdruck Behältern (KDB) und Drucktransmittern für die Messung des Porenwasserdrucks (P1 bis P6).

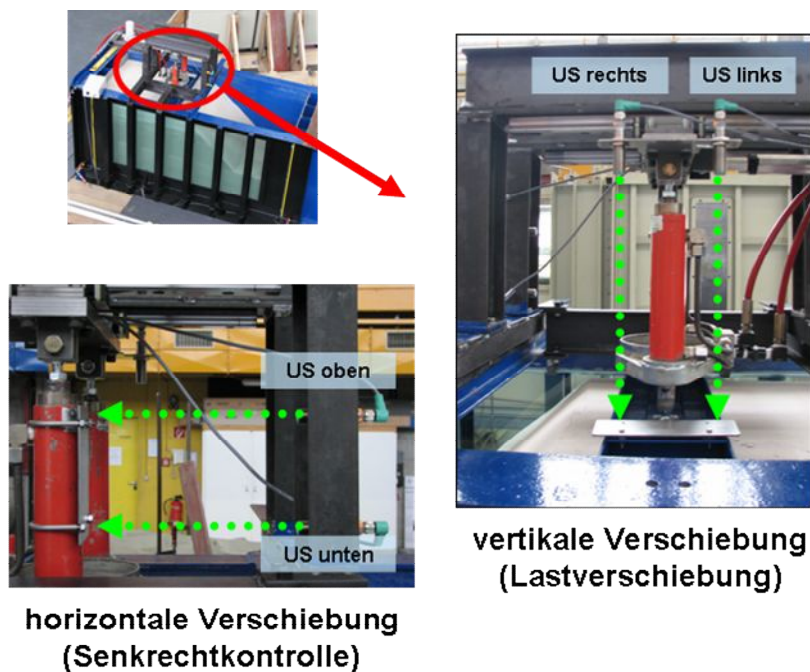


Abb. 4.3: Im Bereich der Hydraulikzylinder fixierte Ultraschall-Abstandsmesser (US) zur Messung der Lastverschiebung (US rechts und US links) und zur Kontrolle und Regulierung der senkrechten Hydraulikzylinderstellung (US oben und US unten).

4.2.2 Versuchsvarianten

Wie eingangs erwähnt wurden drei Experimentvarianten gewählt, um drei Ziele zu erreichen. Die erste Versuchsreihe (Fall A) mit statischem niedrigem Grundwasserspiegel diente der Bestimmung der angenommenen maximalen Tragfähigkeit der Böschung. Die zweite Versuchsreihe (Fall B) mit stationärem Grundwasserfluss bei hohem Grundwasserspiegel und hoher Wassersättigung der Böschung diente der Bestimmung einer angenommenen minimalen Tragfähigkeit der Böschung. Das Ziel der dritten Versuchsreihe (Fall C) mit transienter Grundwasserströmung und initial niedrigem Grundwasserspiegel war es, zu testen, in wieweit unter dynamisch aufsteigendem Porenwasserdruck die Stabilität der Böschung reduziert werden kann. Um zu zeigen, dass die Ergebnisse reproduzierbar sind, wurden zu jedem Versuchstyp mehrere Wiederholungen durchgeführt (fünf für Fall A, drei für Fall B und vier für Fall C). Lagerungsdichten und Daten zu den Randbedingungen für alle Experimente sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

4.2.2.1 Fall A: Statischer Grundwasserspiegel, niedriger Grundwasserspiegel

Der Wasserdruck (h_w) wurde auf beiden Seiten über den Konstant-Wasserdruck-Behälter gleich gesetzt (linke Seite $h_{wl} =$ rechte Seite $h_{wr} = 10$ cm), um einen statischen Grundwasserspiegel zu erhalten (siehe Abb. 4.4 A). Der Wasserspiegel befand sich somit 30 cm unter dem Niveau des Hangfußes. Daher ist der Böschungskörper (einschließlich der zu erwartenden Scherzone) im ungesättigten und die stabilisierenden Kapillarkräfte können wirken. Allerdings muss gesagt werden, dass aufgrund der sehr hohen Steighöhe des Kapillarsaums nicht sehr große Kräfte im unteren und mittleren Bereich zu erwarten sind. Die hydraulischen Randbedingungen wurden während des Experiments konstant gehalten. Die Auflast auf die Druckplatte wurde schrittweise in Schritten von bis zu 10 kN m^{-2} ca. alle ein bis zwei Minuten erhöht. Diese schrittweise Steigerung der Auflast wurde fortgesetzt, bis ein Hangversagen eintrat. Die Auflast und die entsprechende Verschiebung der Lastplatte wurden aufgezeichnet. Zusätzlich wurden die positiven Porenwasserdrücke über die Drucktransmitter an den Piezometer-Löchern während des gesamten Experimentes gemessen und aufgezeichnet.

4.2.2.2 Fall B: Stationärer Grundwasserfluss, hoher Grundwasserspiegel

Im Fall B (siehe Abb. 4.4 B) wurden die konstanten Wasserdruckbedingungen $h_{wl} = 70$ cm und $h_{wr} = 10$ cm gesetzt, was eine Wasserströmung durch die Böschung zur Folge hatte. Die Anfangsbedingung für die Experimente bestand somit aus stationärer Grundwasserströmung von der linken auf die rechte Seite. Die konstanten Wasserdruckbedingungen wurden so gewählt, dass der Grundwasserspiegel in der Nähe des Hangfußes nicht austreten konnte, sondern knapp darunter blieb. Aufgrund der Neigung des Grundwasserspiegels durch das System war ein Teil des zu erwartenden Scherbandes unter positivem Wasserdruck. Die über dem Grundwasserspiegel liegenden Bereiche waren aufgrund des hohen Kapillarsaums nahezu wassergesättigt. Somit sind keine oder nur noch minimale kapillare Stabilisierungseffekte zu erwarten. Die hydraulischen Randbedingungen wurden während des Experiments konstant aufrecht gehalten. Die externe Belastung, wurde, wie für Fall A schrittweise bis zum Versagensfall beschrieben, aufgebracht und es wurden die gleichen Parameter überwacht.

4.2.2.3 Fall C: Transiente Grundwasserströmung, initial niedriger Grundwasserspiegel

Mit Fall C (siehe Abb. 4.4 C) gab es eine Änderung im Allgemeinen experimentellen Setup: Ein perforiertes Drainagerohr wurde vor Versuchsbeginn während der Füllungsprozedur unter dem Hangfuß eingebettet. Dieses Rohr wurde mit einem hohen Konstant-Wasserdruckbehälter verbunden und erlaubte einen schnellen Anstieg des Porenwasserdrucks an der Unterseite der Böschung. Die initialen hydraulischen Bedingungen waren, wie für Fall A beschrieben, auf 10 cm Grundwasserspiegel eingestellt. Ausgehend von dieser Situation wurde die externe Auflast schrittweise bis auf 215 kN m^{-2} gesteigert (entsprechend ca. 91% der durchschnittlichen maximalen Belastung in Fall A). Dabei wurde, wie geplant, kein Böschungsversagen ausgelöst.

Die Ausgangsbedingungen (10 cm Grundwasserspiegel und 215 kN m^{-2} Auflast) wurden während des Experiments aufrecht gehalten. Als zusätzliche Randbedingung wurde über den seitlichen hohen Konstant-Wasserdruck-Behälter ein Druck von 125 cm WS angelegt, der zunächst nicht in das System wirkte, weil ein Hahn die hydraulische Verbindung zum perforierten Drainagerohr trennte. Bei Erreichen der oben genannten Anfangsbedingung von

215 kN m⁻² wurde nach ca. 10 minütiger Wartezeit schlagartig der Hahn geöffnet und Wasser konnte über das Drainagerohr in das System eindringen und ein schneller Wasseranstieg mit Druckübertrag im Bereich des Hangfußes fand statt. Zusätzlich zu den für die Fälle A und B genannten Parametern, wurde in Fall C der Wasserdruck in der Zuleitung zum Drainagerohr registriert.

Tabelle 4.1: Packungsparameter, Anfangsbedingungen (Wasserstände links h_{wl} und rechts h_{wr}) und Last (q), für Fall C die eingestellte Auflast (q_{max}) sowie die Versagensbelastungen (q_f) für die Fälle A und B und die gemessene vertikale Verschiebung; (cm WS = cm Wassersäule; n.a. = nicht anwendbar).

Fall	Name	Lagerungs-	Porosität	Konstant-		Externe Auflast		Initiale	Max. vertikale	Versagensauflast	Injektionsdauer bis
		dichte		Wasserdruck				Auflast	Verschiebung		zum Versagen (Fall C)
		ρ_b	n	(h_{wl})	(h_{wr})	Δq	Δt	q_{max}	u	q_f	
		[g cm ⁻³]	[-]	[cm WS]	[cm WS]	[kN m ⁻²]	[min]	[kN m ⁻²]	[mm]	[kN m ⁻²]	[min]
Fall A	A1	1.53	0.42	10	10	7	2	n.a.	11,9	235.6	n.a.
	A2	1.52	0.43	10	10	10	1	n.a.	12,1	237.7	n.a.
	A3	1.53	0.42	10	10	10	2	n.a.	10,0	242.0	n.a.
	A4	1.51	0.43	10	10	10	1	n.a.	8,6	224.0	n.a.
	A5	1.51	0.43	10	10	10	2	n.a.	11,9	242.5	n.a.
mittel	A	1,52	0,43	10	10				10,9	236	
Fall B	B1	1.51	0.43	69	10	7	1	n.a.	13,6	190.2	n.a.
	B2	1.52	0.43	70	10	7	1	n.a.	16,2	196.0	n.a.
	B3	1.50	0.43	71	10	7	1	n.a.	15,6	188.9	n.a.
mittel	B	1,51	0,43	70	10	7	1		15,1	192	
Fall C	C1	1.56	0.41	10	10	35	5	214.6	10,8	n.a.	6,7
	C2	1.53	0.42	10	10	35	5	215.7	9,1	n.a.	0,4
	C3	1.52	0.43	10	10	35	5	214.2	10,9	n.a.	3,4
	C4	1.56	0.41	10	10	35	5	215.1	11,4	n.a.	2,4
mittel	C	1,54	0,42	10	10	35	5	215	10,6	.	3,2

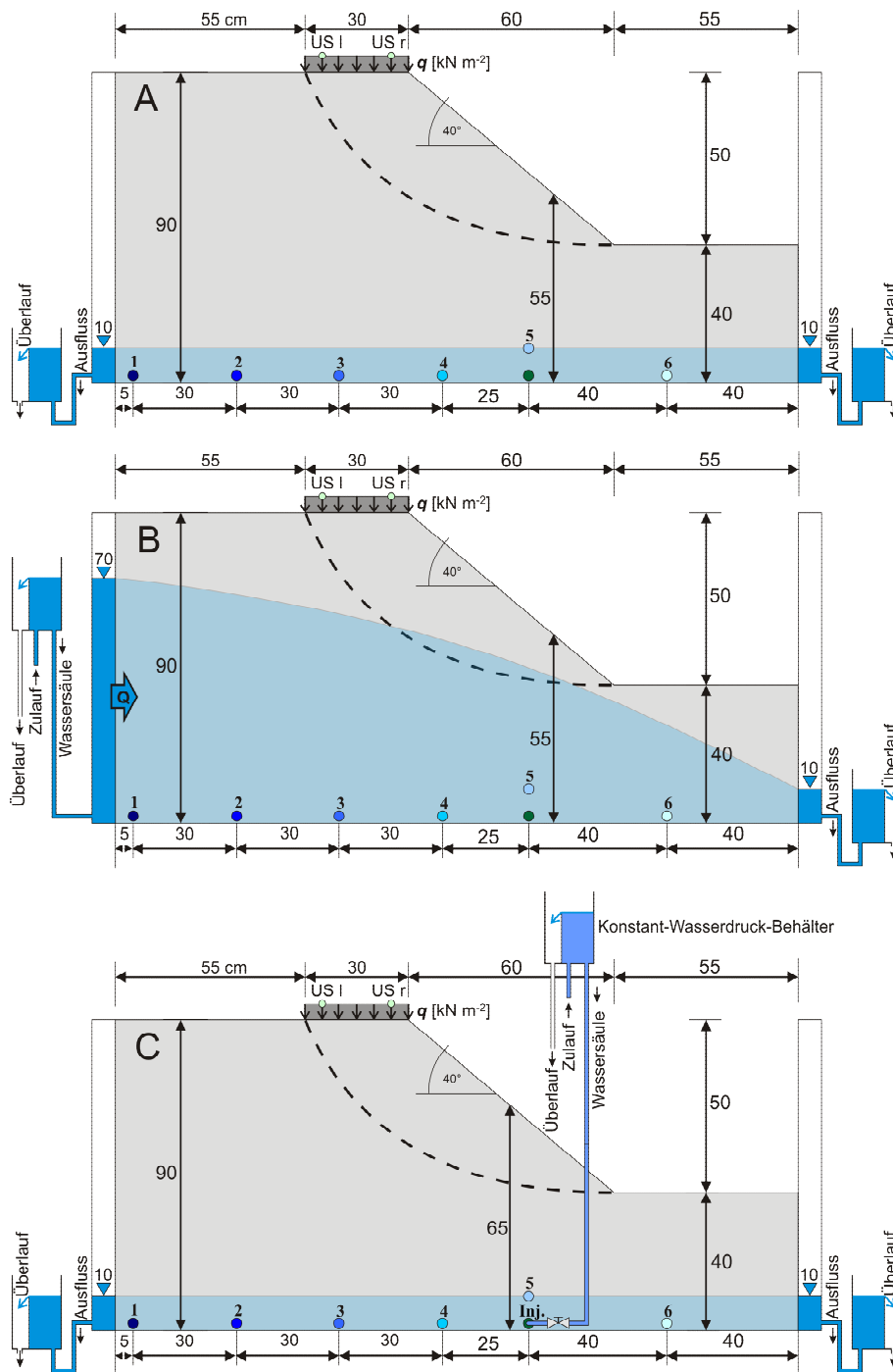


Abb. 4.4: Anfangsbedingungen für die Experimente A) Fall A, statischer Grundwasserspiegel, B) Fall B, stationärer Wasserfluss, C) Fall C, initial statischer Grundwasserspiegel; US = Messpunkt für Ultraschall-Sensor, l = links und r = rechts; Kreise mit Nummerierung von 1 bis 6 zeigen die Positionen der Porenwasserdruck Messpunkte an; Inj. = Position für die Wasserinjektion in das Drainagerohr über den hohen Konstant-Wasserdruck-Behälter bei Fall C; q = Auflast über Druckplatte.

4.3 Ergebnisse

Die wichtigsten Ergebnisse für jedes Experiment sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. In Abb. 4.5 wird für jeden Fall ein Versuch gezeigt, der beispielhaft die besonderen Merkmale des jeweiligen Falls beinhaltet. Bei Abb. 4.5 ist zu beachten, dass im jeweils späteren Zeitabschnitt die Darstellung in den Diagrammen mit einem kleineren Zeitintervall dargestellt ist.

Die Verläufe der Experimente für die Fälle A und B, mit statischem bzw. stationärem Grundwasserspiegel, lassen sich in drei Zeitphasen aufteilen. In der ersten Phase sind die gemessenen Porenwasserdrücke (P 1-6) nahezu stabil. Die Böschung bleibt dabei auch stabil, zeigt aber eine leichte Verformung aufgrund der schrittweisen Erhöhung der Auflast. In der zweiten Phase nehmen die Porenwasserdrücke deutlich ab, begleitet von einer leicht beschleunigten Verformung der Böschung, während aber die Druckbelastung durch die Auflast konstant geblieben ist. Diese zweite Phase endete mit dem strukturellen Versagen der Böschung. Die dritte Phase war initiiert durch das Böschungsversagen. Die stark gesunkenen Porenwasserdrücke stiegen wieder an aufgrund der Wasserneuverteilung, die in der nun unbelasteten Restböschung stattfinden konnte. Die dritte Phase wurde beendet, sobald weitgehend konstante Werte erreicht wurden und wieder statische bzw. stationäre Bedingungen herrschten, die den Anfangsbedingungen ähnelten. Die Abb. 4.6 zeigt ein typisches Bild einer versagten Böschung mit einer klar definierten Scherzone.

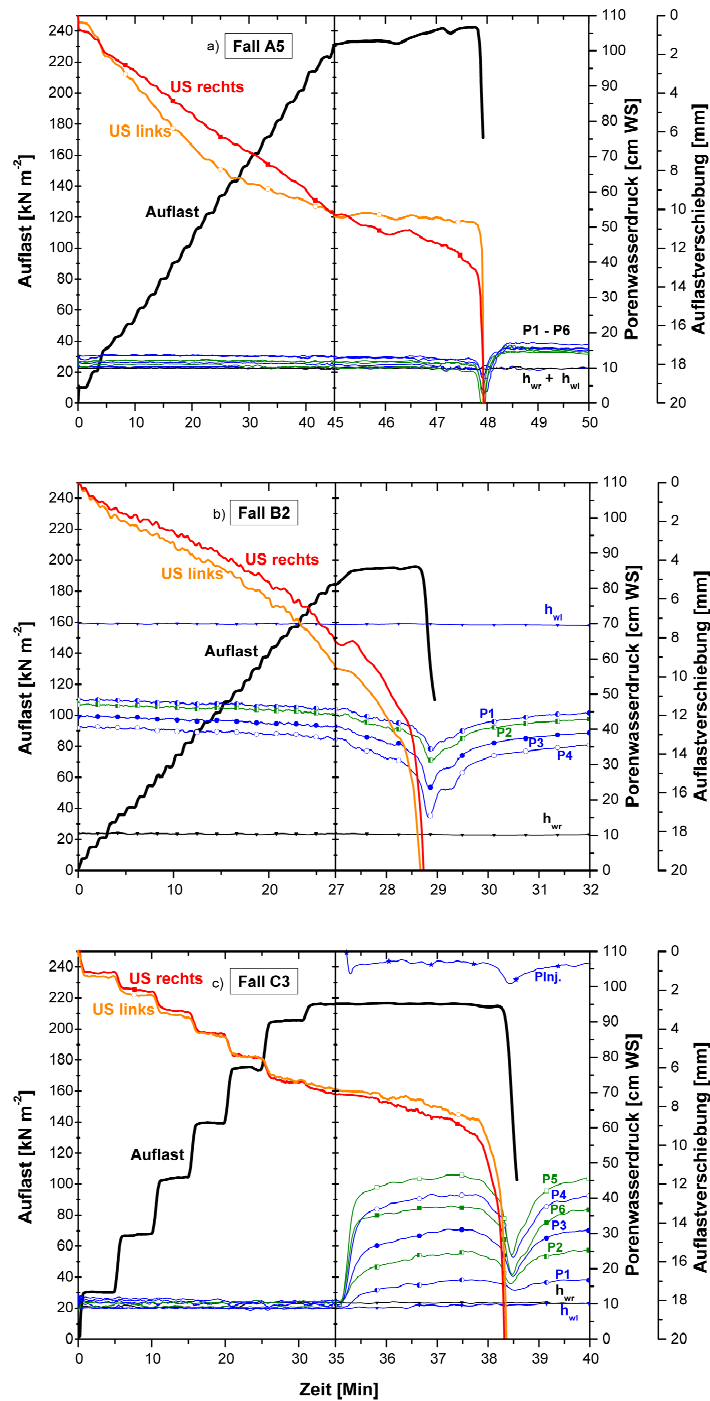


Abb. 4.5: Auflast, Porenwasserdrücke und Verdichtung zu den Böschungsbruchexperimenten a) A5, b) B2, und c) C3; US links und US rechts zeigen die Verschiebung der Referenzpunkte der vertikalen Abstandsmessungen, die mit den Ultraschallsensoren (US) durchgeführt wurden; h_{wl} und h_{wr} stehen für die linke und rechte Konstant-Wasserdruck-Randbedingung; P1 bis P6 kennzeichnen die Porenwasserdruckmessungen an den Piezometer-Löchern eins bis sechs und P_{inj} kennzeichnet den Eindringdruck des Injektionswassers bei Fall C; cm WS = Zentimeter Wassersäule.



Abb. 4.6: Böschungskörper mit sichtbarem Scherband nach dem Versagen; der hier gezeigte Versuch stellt eine spezifische Demonstration eines Böschungsexperimentes dar und wurde nicht in die quantitative Auswertung mit einbezogen, da die gefärbten Sandschichten das Materialverhalten des Gesamtkörpers leicht veränderten.

Für Fall A wurden die Experimente mit einer mittleren Lagerungsdichte von $1,52 \text{ g cm}^{-3}$ gepackt, woraus sich eine durchschnittliche Porosität von 0,43 ergab. Die externe Auflast wurde nach verschiedenen zeitlichen Mustern aufgebracht. Die typische stufenweise Erhöhung lag bei 10 kN m^{-2} pro Minute oder alle zwei Minuten. Während der Lastaufbringung wurde die vertikale Verschiebung und die Neigung der Lastplatte mit den Ultraschall-Sensoren gemessen (u in mm).

Die maximale Belastung oder Versagenslast q_f reichte von 224 bis 243 kN m^{-2} mit einer mittleren q_f von 236 kN m^{-2} und einer Standardabweichung von 7,5 kN m^{-2} . Es ist kein direkter Zusammenhang mit der Lagerungsdichte oder mit dem Verlauf der Lastaufbringung zu erkennen.

Die Abb. 4.5a zeigt als Beispiel die Ergebnisse für Fall A5. Die Auflast wurde schrittweise erhöht ($\Delta q = 10 \text{ kN m}^{-2}$ bei einer Schrittdauer von zwei Minuten) und dieses für 48 Minuten, bis die Böschung bei einer Last von etwa $q_f = 243 \text{ kN m}^{-2}$ versagte. Hierbei zeigt sich das Versagen in der Form, dass der Druck in den Hydraulikzylindern abnimmt, weil die Tragfähigkeit der Böschung schlagartig zusammenbricht und die Zylinder keinen Widerstand mehr

haben. Die Zylinder fahren bei geringem Druckaufwand weiter aus, so dass die Lastplatte mit wenig Kraftaufwand in die Böschung eindringen kann. Es ist erkennbar, dass jede Erhöhung der Auflast eine unmittelbare und schnelle Verformung (Verdichtung) des Böschungskörpers zur Folge hatte. Diese Verformungen waren sehr klein (ca. 0,5 mm). Zum Ende eines Schrittes nach ca. zwei Minuten waren die Verformungen nur noch sehr gering oder gar nicht deutlich feststellbar, so dass davon ausgegangen werden konnte, dass die Verformungskraft ausgehend von der Lastplatte weitgehend gewirkt hatte und ein neues stabiles Kräftegleichgewicht entstanden war.

Bei q_f ergab sich eine vertikale Verschiebung der Lastplatte von $u = 12$ mm (= Verdichtung oder Verdrängen des Sandes durch Einpressen der Lastplatte). Die maximale Neigung der Lastplatte (Unterschiede zwischen der linken Seite und der rechten Seite geteilt durch die Länge der kurzen Längsseite der Auflastplatte) war $< 0,005$ und kann somit vernachlässigt werden.

Bei der Betrachtung der Porenwasserdrücke kann man beobachten, dass der Grundwasserspiegel im System stabil war, was darauf hindeutet, dass die Verdichtung langsam genug war, um keine deutliche Umverteilung des Wassers zu erzeugen. Rund um die Zeit des Versagens wurde jedoch eine starke Abnahme der Porenwasserdrücke beobachtet. Die starke Veränderung der Porenwasserdrücke steht vermutlich im Zusammenhang mit der Veränderung der Porosität, die durch die Scherbandentwicklung verursacht wird.

Für Fall B betrug die durchschnittliche Packungsdichte $1,51 \text{ g cm}^{-3}$ mit einer mittleren Porosität von 0,43. Die externe Last wurde schrittweise erhöht ($\Delta q = 5 \text{ kN m}^{-2}$, Zeitschritt $\Delta t = 1 \text{ min}$). Die Abb. 4.5b zeigt stellvertretend für Fall B das Experiment B2. Für alle Experimente des Falls B wurde die konstante Wasserdruckhöhe auf der Anströmseite h_{wl} bei 70 cm und bei der Abströmseite h_{wr} auf 10 cm fixiert. Die Porenwasserdruckmessungen beim ersten Piezometer im Sandkörper 5 cm von links zeigten jedoch einen großen Abfall in der Porenwasserdruckhöhe (um ca. 20-25 cm gegenüber den eingestellten 70 cm bei h_{wl} direkt daneben). Das bedeutet, dass ein signifikanter Druckverlust durch das Drahtgeflecht auf der Lochplatte an den Brunnen-Kammern entstanden sein muss und somit die linke Randbedin-

gung (= Grundwasserspiegel am linken Rand) nicht 70 cm, sondern in der Höhe von etwa 50 cm (ausgehend von Containergrundplatte) entsprechend der Messung P1 anzusetzen ist.

In den Experimenten für Fall B versagte die Böschung im Durchschnitt bei $q_f = 192 \text{ kN m}^{-2}$. Das entspricht ca. 81% der maximalen Belastung, die für Fall A bestimmt wurde (für detaillierte Werte siehe Tabelle 4.1). Die Verformungen des Systems waren in der ersten Phase ähnlich wie die Verformungen in Fall A, jedoch war die beschleunigte vertikale Verschiebung, die mit dem Versagen und kurz vorher einhergeht nicht so plötzlich, sondern allmählich. Die Abb. 4.5b zeigt deutlich, dass sich die Verformung bei Fall B schon ca. eine Minute vor dem Versagen stark erhöhte.

Die an den Piezometer-Löchern (P1 bis P4) gemessenen Porenwasserdrücke zeigten im Gegensatz zu Fall A eine leichte aber stetige Abnahme in der Anfangsphase. Minuten vor dem Versagen zeigten sie eine weitere schnelle Abnahme parallel zur erhöhten Verschiebung der Auflastplatte.

Vergleicht man die Last-Verschiebungs-Beziehung der Fälle A und B (siehe Abb. 4.7), kann festgestellt werden, dass die Erhöhung des Grundwasserspiegels und somit der Wassersättigung in der Nähe des Scherbandes kaum Einfluss auf die Last-Verschiebungs-Beziehung hatte; bis etwa zu einer Auflast von 175 kN m^{-2} und einer Verschiebung um ca. 8 mm. Der erhöhte Grundwasserspiegel hatte jedoch großen Einfluss auf die Stabilität des Böschungssystems. Bei Fall B wurde eine Abnahme der Stabilität um ca. 19% im Vergleich zu Fall A beobachtet.

Für Fall C betrug die durchschnittliche Packungsdichte $1,54 \text{ g cm}^{-3}$ mit einer entsprechenden durchschnittlichen Porosität von 0,42. Die anfänglichen hydraulischen Bedingungen waren die gleichen wie in Fall A (statischer Grundwasserspiegel 30 cm unter dem Hangfußniveau).

Die externe Last wurde schrittweise erhöht ($\Delta q = 35 \text{ kN m}^{-2}$, $\Delta t = 5 \text{ min}$) bis ein $q_{max} = 215 \text{ kN m}^{-2}$ erreicht wurde. Experiment C3, stellvertretend für Fall C in Abb. 4.5c dargestellt, zeigte aufgrund der großen Druckerhöhungsschritte eine andere Last-Verschiebungs-Beziehung als bei den Fällen A und B. Ähnlich wie bei Fall A waren die Porenwasserdrücke aber nicht beeinflusst durch die Aufbringung der Last, was also auch hier anzeigte, dass der

Anstieg der Belastung und die entsprechende Verdichtung langsam genug waren, um keinen Einfluss auf die Wasserverteilung im System zu nehmen. Zum Zeitpunkt $t = 35$ min war q_{max} schon einige Zeit erreicht und die Wasserinjektion wurde mit einer Wasserdruckhöhe von 125 cm WS gestartet, was innerhalb von < 1 Minute zu einer starken Erhöhung der Porenwasserdrücke in der Nähe der Injektionsstelle führte. Zeitgleich erhöhte sich die vertikale Verschiebung. Etwa drei Minuten nach Injektionsbeginn sanken die Porenwasserdrücke wieder. Dies deutet auf das bevorstehende Böschungsversagen hin, welches nach ca. einer weiteren Minute eintrat. Während die Porenwasserdrücke in der letzten Minute vor dem Versagen sanken, blieb die Tragfähigkeit der Böschung aber voll bestehen (Auflast konstant gemessen). Kurz nach dem Versagen konnte sich bei weiterbetriebener Injektion das Wasser wieder frei ausbreiten und die Porenwasserdrücke stiegen wieder an.

Sobald die Wassersäule des Konstant-Wasserdruckbehälters hydraulisch mit der Böschung verbunden war, zeigte die Messung am zusätzlich an der Injektionsstelle installierten Drucktransmitter (P_{Inj.}) einen plötzlichen Abfall des Druckes von 125 cm WS auf ca. 105 cm WS. Dies deutete darauf hin, dass der Schlauch, mit dem die Injektion betrieben wurde, nicht ganz ausreichte, um für ausreichenden Durchfluss zu sorgen. Somit waren die gemessenen ca. 105 cm WS die anzunehmende Injektionsrandbedingung.

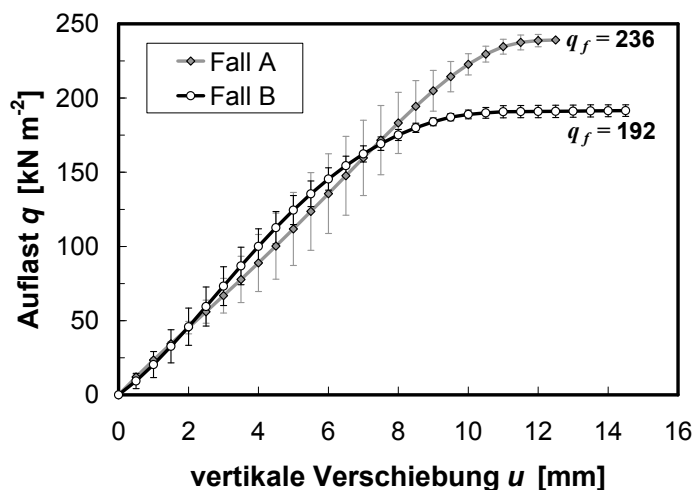


Abb. 4.7: Last-Verschiebungs-Diagramm für Fall A (Mittelwerte der Experimente A1-A5) und Fall B (Mittelwerte der Experimente B1-B3), endend mit der Last beim Böschungsversagen (q_f).

4.4 Diskussion

Es wurden drei experimentelle Versuchsreihen durchgeführt. In jeder Reihe wurden die Versuche mindestens dreifach wiederholt. Die Variabilitäten sind im akzeptablen Bereich für Experimente dieser Größenordnung, daher kann davon ausgegangen werden, dass die Reproduzierbarkeit der Experimente ausreichend war.

Auflast, Wassersättigung und Strömungsdynamik (z. B. durch die Wasser-Injektion) tragen alle potenziell zu einem Böschungsbruch bei und sind zusätzlich in ihren Wirkungen auch noch voneinander abhängig. Das Ziel des Kapitels „Böschungsbruch“ war vor allem, die Wirkung der Strömungsdynamik durch schlagartig ansteigende Porenwasserdrücke auf die Böschungsstabilität zu bestimmen (Fall C). Die Hypothese für die Experimente war, dass ein schneller Porenwasserdruckanstieg sich negativ auf die Stabilität eines Hanges im Allgemeinen auswirken kann. Der Einfluss der Sättigung, sowohl statisch als auch stationär und der Einfluss der externen Last, wurden in den ersten beiden Experimentreihen (Fälle A und B) variiert und bestimmt und dienten der Findung von geeigneten Anfangs- und Randbedingungen für Fall C.

Unter Berücksichtigung der Größe des experimentellen Aufbaus und der Retentionskurven für den verwendeten Feinsand kann die Annahme getroffen werden, dass die Wassersättigung in allen Experimenten sehr hoch war. Der Unterschied zwischen den Experimenten bestand also nicht in der Wassersättigung, sondern in den unterschiedlichen Kapillardrücken (= negative Porenwasserdrücke).

In Fall A war der Grundwasserspiegel deutlich unter der Scherzone, während in Fall B der Grundwasserspiegel bis in den Bereich des Scherbandes hineinreichte. Es wurde gezeigt, dass ein Anstieg des Grundwasserspiegels in die Scherzone hinein die Böschungsstabilität um 19% verringerte. Dies ist ein klares Indiz dafür, dass Kapillarkräfte (auch kleine für die gegebenen Sättigungen) einen starken Beitrag zur Böschungsstabilität leisten; viel mehr als die tatsächlichen Werte der Wassersättigung.

In Fall C wurde Wasser injiziert und ein transienter Wasserfluss erzeugt. Auch hier konnte gezeigt werden, dass die vorgespannte Böschung stabil blieb, solange die Porenwasserdrücke im Bereich des Scherbandes negativ waren und die Kapillarkräfte wirken konnten. Ein Anstieg des Grundwasserspiegels in die Scherzone hinein bewirkte jedoch einen Abbau der Kapillarkräfte und löste ein sofortiges Versagen der Böschung aus. Auch Auftriebskräfte, die sich mit der schnellen Wasserinjektion entwickelten, haben vermutlich zusätzlich die Destabilisierung beschleunigt.

Eine interessante Entdeckung war, dass das Versagen in jedem experimentellen Fall durch eine Abnahme der Porenwasserdrücke angekündigt wurde. Mit dem tatsächlichen Versagen (sichtbaren Versagen) fielen die Porenwasserdrücke nochmals rapide ab, was in dem Zusammenhang mit Porenaufweitungen und bodendilatantem Verhalten zu sehen ist, wie es ähnlich auch Iverson et al. (2000) beschrieben hat. Ein allmählicher Druckabfall vor dem Versagen, ähnlich den hier dargestellten Fällen, wurde auch durch Harp et al. (1990) in Feldversuchen erfasst. Eine ähnliche Abnahme der Porenwasserdrücke vor dem tatsächlichen Versagen konnte auch in den numerischen Simulations-Berechnungen gesehen werden (O. Avci, 2010, pers. Mitt.).

Die Retentionskurven zu dem verwendeten Feinsand sind in Kapitel 3.2.2 dargestellt. Es muss darauf hingewiesen werden, dass es aufgrund des markanten Hystereseverhaltens des Sandes schwierig war, genau festzustellen, welche Sättigung im System herrschte. Während die Sättigungen in den Experimenten des Falls A entlang der Entwässerungskurve abgelesen werden können, sind die Sättigungen für die Fällen B und C schwerer zu schätzen, weil diese Wasserhältnisse eher der Bewässerungskurve folgten. Die in Abb. 3.7 dargestellte Bewässerungskurve allerdings geht aus von einem trockenen Zustand, der hier im Böschungssystem nicht erreicht wurde. Somit fanden die Aufsättigungen in der Böschung durch Grundwasseranstieg oder Injektion aus einem Zwischenzustand einer Sättigung heraus statt, der irgendwo zwischen der Ent- und der Bewässerungskurve lag.

Für Fall A war der ursprüngliche Wasserstand nach der Füllprozedur bei 90 cm (die gesamte Sandfüllung war voll gesättigt). Der Wasserstand wurde dann auf 10 cm abgesenkt. Daher entspricht die Sättigungsverteilung über dem Grundwasserspiegel etwa dem Verlauf der Erstentwässerungskurve. Die Erstentwässerungskurve für den Sand zeigt einen Lufteintrittspunkt

von ca. 50 cm (siehe Abb. 3.7). Daher kann davon ausgegangen werden, dass der Sand bis zu einer Höhe von 50 bis 60 cm nahezu voll gesättigt war (Kapillarsaum). Die oberen 30 cm der Sandfüllung waren der Erstentwässerungskurve zufolge allerdings stark ungesättigt. Dies bedeutet, dass die Grenzfläche zwischen der benetzenden und der nichtbenetzenden Phase groß ist. Somit kann postuliert werden, dass diese Bedingung die Stabilität der Böschung positiv beeinflussen.

In den nachfolgenden Experimenten (Fälle B und C) wurde das Wasser aus der Sandfüllung zunächst abgelassen wie in Fall A. Für Fall B wurde der linke Grundwasserspiegel dann bis auf 70 cm angehoben, während der Grundwasserspiegel auf der rechten Seite auf 10 cm blieb. Die Sättigung über dem Grundwasserspiegel bis zur Böschungsoberfläche musste sehr hoch sein, weil die Distanz von wenigen 10er cm nicht mehr sehr groß war und hier auch ausgehend von einer Bewässerungskurve hohe Sättigungen erreicht werden konnten.

Für Fall C wurden beide Ränder bei 10 cm entsprechend Fall A fixiert. Daraufhin wurde die Wasserinjektion unter dem Böschungsfuß schlagartig initialisiert. Der eindringende Wasserstrom war schnell und dynamisch und das Versagen trat schnell auf. Es muss daher festgestellt werden, dass das Aufsättigungsverfahren noch aktiv war, als das Versagen schon eintrat, sich also bei der eindringenden Wasserfront noch gar kein Kapillarsaum bilden konnte.

In Bezug auf die Abmessungen des Experimentes müssen noch zwei Anmerkungen gemacht werden. In Wirklichkeit sind natürliche Hänge viel länger (in die Höhe) und damit ist das Ausmaß der Auflast, die die unteren Bereiche eines Hanges tragen müssen, viel höher. Mit der Auflastplatte wurde versucht, diesen Zustand zu imitieren. An einem natürlichen Hang mit seinen größeren Ausmaßen, insbesondere in der Breite, sind die zu erwartenden Reibungseffekte (ausserhalb der Scherzone, z.B. an Seitenkontakten zu Festgestein) relativ gering im Vergleich zu den hier durchgeführten Technikexperimenten, bei denen eine verhältnismäßig große Reibungsfläche zu den Containerwänden vorhanden war. Trotz dieser „Skalenprobleme“ sind die Ergebnisse und die geführte Diskussion zu den Böschungsbruch-Experimenten ausreichend hilfreich, um zumindest punktuell eine Verknüpfung zum natürlichen Hang zu ermöglichen und die Hangbewegungshypothese prinzipiell zu bestätigen.

4.5 Böschungsbruch-Experimente: Zusammenfassung und Ausblick

Böschungsbruch-Experimente an Sandböschungen aus homogenem Feinsand wurden als Benchmarks durchgeführt, um ein besseres Verständnis der Hangphysik zu erhalten. Externe Auflasten, Sättigungen und Strömungsdynamik haben alle eine deutliche Auswirkungen auf die Böschungsstabilität oder das Böschungsversagen. In drei Typen von Experimenten wurden ihre Wirkungen untersucht. Fall A (statischer Grundwasserspiegel unter dem Böschungsfuß) und Fall B (stationärer Wasserfluss mit einem Grundwasserspiegel, der in die zu erwartenden Scherzone hineinreichte) wurden durchgeführt, um den Einfluss der Sättigung auf die Böschungsstabilität zu erfassen. Es konnte gezeigt werden, dass die Böschungsstabilität maximal war, wenn die Scherzone ungesättigte war (Fall A). Sobald der Wasserstand erhöht wurde, so dass der Porenwasserdruck in Abschnitten der Scherzone positiv wurde (Fall B), versagte die Böschung bei einer viel kleineren externen Auflast. In den hier beschriebenen Experimenten wurde eine Abnahme der Stabilität um etwa 19% ermittelt.

Für das gegebene feinkörnige Material war in beiden Fällen (A und B) der größte Teil der Scherzone in einem hoch wassergesättigtem Zustand. Während in Fall A die Porenwasserdrücke im gesamten Bereich oberhalb des niedrigen Grundwasserspiegels bei hoher Sättigung negativ waren, waren sie in Fall B nur in einem kleinen Bereich nahe der Oberfläche negativ. Daher kann geschlussfolgert werden, dass eine Destabilisierung nicht als eine direkte Wirkung der Sättigung auftritt, sondern als ein Effekt der Verringerung der Kapillarkräfte. Während gezeigt werden konnte, dass Kapillarkräfte die Stabilität erhöhen und dass positive Wasserdrücke destabilisieren, konnte dem eigentlichen Wasserfließen durch die Böschung (Fall B) unter den hier verwendeten Durchführungsmethoden kein Einfluss auf die Böschungsstabilität nachgewiesen werden.

Die Untersuchung der dynamischen Wasserinjektion (Fall C) zeigte, dass ein System sehr leicht destabilisiert werden kann, wenn der Wasserdruck nahe des Hangfußes steigt und somit die destabilisierenden Einflüsse von positiven Wasserdrücken und zusätzlich von Auftriebskräften wirken können. Das Böschungsversagen trat ein, sobald die gesättigte Zone mit positivem Wasserdruck die Scherzone erreichte.

Eine sehr interessante Beobachtung war, dass jedes Böschungsversagen angekündigt wurde durch ein deutliches Absinken der Porenwasserdrücke. Dies bedeutet, dass noch Minuten bevor das Versagen visuell zu beobachten war, eine interne Relaxation des Systems stattgefunden haben muss. Dieser Effekt muss weiter untersucht werden. Denn schließlich könnte es möglich sein, ein Messsystem zu installieren, das die Porenwasserdrücke in einem realen System überwacht und dabei darauf fokussiert, eine Korrelation zwischen schnellen Porenwasserdruckveränderungen und Hangbewegung zu finden. Dabei müssten Porenwasserdruckänderungen, die durch allgemeine Wasserströmung erzeugt werden, z. B. Anstieg mit Niederschlagsereignissen und Drainage zu Trocknungsphasen, ausgeklammert werden, um hier relevante Ereignisse von Porenwasserdruckänderungen identifizieren zu können.

5 Zusammenführung und Schlussfolgerung

Im Zusammenhang mit großräumigem Hangkriechen des mehrere Hundert Meter langen und breiten Heumöser Hanges (Vorarlberg, Österreich), wurde die Art und Weise, mit der Wasser in den Hang infiltriert, als Schlüsselprozess identifiziert, mit dem Hangbewegungsschübe ausgelöst werden.

Das Infiltrationsgeschehen in die ungesättigte Bodenzone ist hier besonders einzigartig, weil hier sehr hohe Niederschlagsmengen ($> 2000 \text{ mm a}^{-1}$) auf stark durchlässige makroporöse Hangbereiche treffen und der hanghydrologische Status sich bei Niederschlagsereignissen sehr schnell verändern kann.

Es wurde die Hangbewegungshypothese aufgestellt, bei der sich ein Zusammenhang zwischen schneller Wasserinfiltration über das Makroporensystem und schnellem Porenwasserdruckanstieg in der Tiefe des Hanges ergibt. Wobei unter den besonderen Gegebenheiten der Hanggeologie der Porenwasserdruckanstieg zu Auftriebskräften und gespannten Grundwassersituationen im Hangkörper führt, die das Kräftesystem so verschieben, dass kurzzeitig die hanghaltenden Kräfte überwunden werden und ein Hangbewegungsschub einsetzt.

In der vorliegenden Arbeit wurden in einer ersten Stufe bodenhydraulische Eigenschaften in Bezug zu einem makroporösen Bereich des Heumöser Hang ermittelt. Diese Ermittlung erfolgte unter Anwendung von Durchlässigkeits-, Multi-Step-Outflow- und Evaporations-Experimenten an zwei entnommenen ungestörten „großen“ Bodenproben (Bodensäulen ca. 30 cm breit und ca. 60 cm hoch) und an vier ungestörten „kleinen“ Bodenproben (Kleinzyylinder ca. 8 cm im Durchmesser und ca. 5 cm hoch).

Die an den Proben festgestellten bodenhydraulischen Eigenschaften lassen sich sehr deutlich charakterisieren. So ergibt sich zum einen eine hohe hydraulische Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und eine sehr geringe „sprunghaft“ abgenommene Durchlässigkeit bei ungesättigten Zuständen. Das hängt damit zusammen, dass im gesättigten Zustand die Makroporen voll durchflusswirksam sind und der Makroporenfluss somit den Gesamtdurchfluss dominiert, quasi die Matrix in einer „Bypass“-Situation umströmt. Mit „geleerten“ Makroporen schon

bei leicht ungesättigten Zuständen ist der Gesamtdurchfluss um ca. zwei Größenordnungen kleiner als bei gesättigten, makroporengesättigten Zuständen. Bei noch stärker ungesättigten Zuständen fällt die Durchlässigkeit auf ein sehr niedriges Niveau, so dass nur noch minimalste Wasserbewegungen zu erwarten sind.

Ferner wurde festgestellt, dass die Bodenproben im gesättigten Zustand hydraulisch gesehen leicht anisotrop sind, da die vertikale gesättigte Durchlässigkeit etwa zweimal so hoch ist wie die laterale Durchlässigkeit.

Da sich am Heumöser Hang aber immer wieder Niederschlagsereignisse zeigten, bei denen kein schneller Porenwasserdruckanstieg in der Hangtiefe zu verzeichnen war, scheint es so zu sein, dass trotz Wasserinfiltration zeitweise kein oder nur abgeschwächter Makroporenfluss entsteht. Sollte nur geringer Makroporenfluss entstehen, so spielt durchaus die Speicherung von Wasser in der die Makroporen umgebenden Bodenmatrix eine Rolle. Das heißt, dass zeitweise Wasser, welches in die Makropore eindringt, ganz oder teilweise von der umgebenden Matrix aufgenommen wird. Es wird angenommen, dass die Wasseraufnahme in die Matrix durch Wassertransfer von Makropore zu Matrix insbesondere bei ungesättigten Zuständen (nach Trockenphasen) relevant sein kann.

Um den Wassertransfer von Makropore zu Matrix genauer studieren zu können, wurde ein vereinfachtes „künstliches“ Makropore-Matrix-System in einem Laborversuchsstand verwirklicht. In den daran durchgeführten Experimenten mit Sand konnte sehr deutlich gezeigt werden, dass nahe der Oberfläche sich bildender Makroporenfluss zeitweise komplett von der die Makropore umgebenden Matrix aufgenommen (absorbiert) werden kann.

Dieser Effekt der „Absorption“ des Makroporenwassers war im verwendeten Sand besonders deutlich, weil der Sand, wenn er trocken ist (was er bei den Experimenten war), ein besonders hohes Aufnahmevermögen zur Neuspeicherung von Wasser besaß. Übertragen auf den Hang, heißt dies, dass eine ähnlich starke Wasseraufnahme wie beim Sand nicht zu erwarten ist, da es sich am Hang um lehmiges Bodenmaterial handelt und dieses unter den herrschenden kli-

matischen Bedingungen eher sehr selten trocken wird und ein völliges Freiwerden des Speichers nicht zu erwarten ist.

Darüber hinaus sind die Transferraten, mit der Wasser von der Makropore zur Matrix transferieren könnte, im lehmigen Boden viel geringer als im Sand.

Dennoch ist davon auszugehen, dass in geringem Umfang auch am Heumöser Hang Makroporenfluss durch Wasserübergang in die umgebende Matrix zeitweise vermindert werden kann. Und somit entsprechend der Hangbewegungshypothese zeitweise kein relevanter Abfluss in die Tiefe des Hanges gelangt, der einen Bewegungsschub auslösen könnte.

Sollte aber, so wie überwiegend für den Heumöser Hang vermutet, der Makroporenfluss einen deutlichen und schnellen Porenwasserdruckanstieg in der Hangtiefe erzeugen, so ist entsprechend der Hangbewegungshypothese mit Überwindung des Scherwiderstandes durch Druckänderungen zu rechnen und ein Bewegungsschub hangabwärts ist zu erwarten. Zur Untersuchung des generellen Einflusses von steigendem Porenwasserdruck auf die Hangstabilität wurde ein vereinfachtes „künstliches“ Böschungs-Auflast-Grundwasser-System in einem Laborversuchsstand verwirklicht.

Es wurden vielfältige Böschungsbruch-Experimente durchgeführt, um den Einfluss von verschiedenen Grundwasser- und Wassersättigungsbedingungen und deren Einfluss auf Hangbewegungen und Hangversagen in einem Sand-Laborhang zu untersuchen.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Position des Grundwasserspiegels und vor allem ein variabler schneller Porenwasserdruckanstieg im Hangsystem großen Einfluss auf die Hangstabilität unter belasteten (vorgespannten) Bedingungen hatte. So zeigte sich, dass bei leicht ungesättigten Verhältnissen die Hangstabilität hoch war im Vergleich zu einer niedrigeren Stabilität bei hoch gesättigten und stationär durchströmten Bedingungen. In den durchgeführten Experimenten mit schnellem Porenwasserdruckanstieg, so wie sie stellvertretend für die schnellen Porenwasserdruckanstiege am Heumöser Hang stehen, konnte sehr deutlich gezeigt werden, dass durch schnellen Porenwasserdruckanstieg die Hangstabilität schlagartig verloren gehen kann.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass die Hangrutschungen im Laborsystem durch eine Abnahme des Porenwasserdrucks kurz vor dem eigentlichen Hangversagen angekündigt werden. In diesem Zusammenhang ist eine Echtzeit-Überwachung der Schwankung der Porenwasserdrücke in einem realen System denkbar, um Zustände für die Hangstabilität ableiten zu können und um somit Hinweise auf ein mögliches bevorstehendes Hangversagen erhalten zu können.

Neben der Abarbeit entlang der Hangbewegungshypothese wurden im Kapitel Bodensäulen-Experimente die gesättigte Durchlässigkeit (K_s)-, erweiterte Multi-Step-Outflow (XMSO)-, Evaporations (EVA)- und HYPROP-Methode angewandt, um bodenhydraulische Eigenschaften (Retentionseigenschaften und hydr. Durchlässigkeiten) zu ermitteln. Damit ergab sich die Möglichkeit zum Methodenvergleich.

Zum einen konnte mit der K_s -Methode und mit der erweiterten MSO-Methode (XMSO) gesättigte Durchlässigkeiten ermittelt werden. Es wurden zwei Bodensäulen in ca. 50 cm Abstand voneinander entnommen, bei der einen wurden die K_s -Messungen und bei der anderen die XMSO-Messungen durchgeführt. Die ermittelten vertikalen gesättigten Durchlässigkeiten unterschieden sich stark mit K_s -Werten von 400 bis $>1000 \text{ cm d}^{-1}$ (K_s -Messung) zu K_s -Werten von 8 bis 400 cm d^{-1} (aus X Phase der XMSO-Messung). Hier wird aber eher ein Unterschied aufgrund unterschiedlicher Makroporenanteile zwischen den Proben als ein methodischer Unterschied angenommen, denn trotz der größeren Abmessungen der Proben, ist man immer noch nicht bei einem repräsentativen Elementarvolumen.

Mit den Evaporationsmethoden (EVA-Großproben und HYPROP-Kleinproben) können im Gegensatz zu der XMSO-Methode keine Aussagen über gesättigte Durchlässigkeiten und Durchlässigkeiten nahe der Sättigung gemacht werden. Dies ist ein grundsätzlicher Nachteil der Evaporationsmethoden. Bei Kombination von Evaporationsmethode mit separaten K_s -Messungen ist aber wiederum zu erwarten, dass ausreichend gute Aussagen über Durchlässigkeiten bei und nahe Sättigung gemacht werden können.

In Bezug zu den ermittelten Retentionseigenschaften ergaben, grob betrachtet, die XMSO-, die EVA- und die HYPROP-Methode weitgehend übereinstimmende Retentionskurvenver-

läufe für den untersuchten lehmigen Boden. Die ermittelten Retentionseigenschaften aller Methoden beschreiben aus meiner Sicht das hydraulische Verhalten, das am Heumöser Hang zu erwarten ist, ausreichend, und die ermittelten Parameter können gut für z.B. hanghydrologische Modelle verwendet werden.

Bei genauerer Betrachtung der Retentionskurven offenbaren sich jedoch auch kleinere Unterschiede in den Methoden. So wurde an exakt denselben Teilproben-Viertelstücken der zylindrischen Bodensäule die XMSO-Methode und die EVA-Methode angewandt. Trotz sorgfältiger Aufsättigung der Proben vor Versuchsbeginn zeigte sich, dass die Anfangswassergehalte sich teilweise stark unterschieden. Auch der Verlauf der ermittelten Retentionskurven unterscheidet sich leicht, insgesamt aber ließ sich hier keine systematischer Erklärung finden, allenfalls in der Tendenz ist zu sehen, dass die XMSO-Retentionskurven im Bereich < -100 cm „steiler“ verlaufen (das heißt weniger Wasserverlust bei gleicher Porenwasserdruckänderung).

Insgesamt hat die XMSO-Methode den Vorteil, dass sowohl Durchlässigkeits- als auch Retentionseigenschaften mit den Daten von einem Versuchslauf durch inverse Simulation ermittelt werden können. In dem hier mit den großen Bodensäulen durchgeführten Versuchsläufen allerdings ist diese Methode nicht zu empfehlen, da die Datenerhebung messtechnisch aufwendig war und eine lange Versuchszeit von bis zu 100 Tagen benötigte, um Aussagen zur Retention im Bereich von einem Porenwasserdruck von „nur“ 0 bis zu ca. -600 cm machen zu können. Die EVA-Methode dagegen war messtechnisch etwas weniger aufwändig und wesentlich Zeit schonender. Mit der EVA-Methode konnten mit einer Versuchslaufzeit von weniger als 30 Tagen Aussagen über das Retentionsverhalten im Bereich von Porenwasserdrücken von 0 bis teilweise ca. -600 cm gemacht werden. Allerdings war aufgrund der Höhe der Proben von bis zu 15 cm die Schindler-Methode nicht gut ausgenutzt, weil die Zeitspanne, in der oberes und unteres Tensiometer gleichzeitig funktionierten, klein war. So zeigte sich bei einem Modul mit frühem Ausfall des oberen Tensiometers, dass ein mittlerer Porenwasserdruck nur zuverlässig bis zu -150 cm ermittelt werden konnte. Entsprechend problematisch zeigte sich die Probenlänge und die deshalb weitauseinander liegenden Tensiometer im Zusammenhang mit der Durchlässigkeitsbestimmung. Zum einen ergab sich zu Evaporationsbeginn kein ausreichender Gradient für die Durchlässigkeitsbestimmung bei und nahe Sättigung. Andererseits zeigte sich, dass, sobald der Gradient zur Durchlässigkeitsbestimmung ausrei-

chend war, dieser aber aufgrund des frühen Ausfalls des jeweils oberen Tensiometers nicht lange messbar war. Insgesamt sind also hohe Proben eher nachteilig, um über einen möglichst weiten Porenwasserdruckbereich bodenhydraulische Eigenschaften zu gewinnen. Mit den noch zusätzlich erfolgten HYPROP-Messungen, die in der Auswertung der Evaporationsmethode entspricht, konnte innerhalb von weniger als 10 Tagen Retentionseigenschaften ermittelt werden, um Aussagen zur Retention im Bereich von einem Porenwasserdruck von 0 bis zu ca. -1000 cm machen zu können. Trotz des auch hier wie bei der EVA-Methode vorhandenen Nachteils, keine Aussage über die Durchlässigkeit nahe und bei Sättigung machen zu können, ist die HYPROP-Methode im Vergleich zu den beiden zuvor genannten Methoden die unaufwendigste und zeitschonenste Methode.

Der Aufwand der einmaligen nicht standardisierten Gewinnung und der Messungen an den großen Bodensäulen-Proben hingegen hat sich in Bezug auf die Retentionseigenschaften der Bodenmatrix nicht gelohnt. Diese hätten auch ausreichend mit der „schnellen“ HYPROP-Methode erfasst werden können. Allerdings hat sich der Aufwand im Fall der vorliegenden Arbeit dennoch gelohnt, weil gerade die Probengröße es erst ermöglichte, annähernd effektive Durchflusseigenschaften zu ermitteln, die insbesondere vom Makroporenfluss abhängig sind. Und erst auf Basis der Erkenntnis der makroporendominierten Durchlässigkeiten konnten Aussagen zur Bestätigung der Hangbewegungshypothese gemacht werden. Mit wenigen Kleinproben, auch bei Kombination aus K_s - und HYPROP-Messungen, wäre es schwierig gewesen, die Relevanz des Makroporenflusses zu erfassen. Erst mit massiver Erhöhung der Kleinprobenzahl (dicht beieinander und aus verschiedenen Tiefen genommen) wäre es möglich, effektivere Eigenschaften zu erhalten, die quasi einem aus vielen Kleinproben zusammengesetztes repräsentativen Elementarvolumen entsprechen. Der Aufwand der Probennahme sehr vieler „Kleinproben“ und die damit verbundenen vielen Messungen parallel oder nacheinander würden den Aufwands- und Zeitvorteil der HYPROP-Methode wieder schmälern.

Die dem Heumöser Hang entnommenen großen und kleinen Bodenproben wurden im Labor untersucht, um die bodenhydraulischen Eigenschaften zu ermitteln. Dabei wurde neben Standardverfahren (Verdunstungsmethode HYPROP an Kleinproben) auch auf einmalig angewandte Untersuchungen zurückgegriffen, die zwar auch auf den standardisierten Prinzipien (Multi-Step-Outflow- und Verdunstungsmethode) beruhen, aber hier an größeren Proben als

üblich angewendet wurden, um eine bessere Repräsentativität zu erhalten. Zur Untersuchung der Großproben wurden einmalige experimentelle Versuchsaufbauten erstellt. Zusätzlich wurde eine neuartige Probennahmetechnik (mit Montageschaum und Folien als Probenaußenhülle) entwickelt, die den natürlich strukturierten Boden (Makroporen) als möglichst ungestörte Probe erhält. Studien anderer Autoren, die MSO- und EVA-Methoden anwandten, beschränken sich hingegen oft auf gestörte, kleinere und eher nichtlehmige Proben, diese dann meist auch strukturlos und eher homogen gepackt, so dass man sagen kann, dass es eine besondere Herausforderung und Seltenheit war, das hier vom Heumöser Hang gegebene Bodenmaterial mit seiner ausgeprägten Makroporosität und hohem Tongehalt in dieser Größenordnung zu untersuchen.

Schlussfolgerung

Die Kombination und Verknüpfung der in dieser Arbeit vorgestellten Messungen und Experimente ist aus meiner Sicht geeignet, um ausreichende Aussagen zur Bestätigung der Hangbewegungshypothese machen zu können.

Insbesondere bestätigten die Messungen an den originären Bodenproben vom Heumöser Hang, dass der Makroporenfluss sowohl vertikal als auch lateral so dominant sein kann, dass potentiell schneller Porenwasserdruckanstieg in der Tiefe erzeugt werden kann.

Dennoch kann ein Makroporenfluss generell insbesondere bei trockenen Matrixbedingungen vermindert werden. Die Verminderung des Makroporenflusses wurde anhand von Experimenten mit Sand gezeigt. Der Prozess des Wassertransfers von Makropore zu umgebender Matrix ist im Sand sehr deutlich zu sehen. Im Vergleich zu dem, was bei Lehm zu erwarten ist, quasi „überhöht“ dargestellt. Dennoch ist davon auszugehen, dass das, was an Wassertransfers von Makropore zu umgebender Matrix im Sand geschieht, auch im Lehm geschieht, allerdings nur in abgeschwächter Form.

In einem abschließenden Schritt konnte wiederum in Sand gezeigt werden, wie der Einfluss von Porenwasserdruck auf die Hangstabilität ist. Hierbei wurde zuerst gezeigt, dass ein leicht ungesättigter Hang-Böschungskörper aus Sand stabiler ist als ein hoch gesättigter Hang. Die Tragfähigkeit der untersuchten Böschung im Laborexperiment nahm durch Aufsättigung um ca. 20% ab. Dieses, so wird vermutet, überwiegend durch Verminderung der korngerüststabilisierenden Kapillarkräfte durch die Aufsättigung. In einem weiterführenden Experiment wurde „vereinfacht“ versucht, einen schnellen Porenwasserdruckanstieg zu simulieren, so wie er ähnlich am Heumöser Hang vermutet wird. Hierbei zeigte sich, dass der untersuchte Böschungskörper bei Vorspannung (Auflast) innerhalb weniger Minuten bei Eintreten von transientem Porenwasseranstieg in die Scherzone hinein seine Stabilität verlor und es zu einem Böschungsversagen kam. Die Sandversuche dienten in erster Linie der Entwicklung von Prozessverständnis und dazu den Zusammenhang von Porenwasserdruckanstieg und Hangversagen zu verdeutlichen, so wie es mit Lehm in kürzerer Zeit nicht möglich gewesen wäre. Wiederum gilt, dass das, was hier im Sand gezeigt wurde, nicht direkt auf den Heumöser Hang

Lehmboden übertragen werden kann, aber dennoch ist davon auszugehen, dass das, was im Sand geschieht, prinzipiell in ähnlicher Form auch im Lehm stattfinden könnte.

Es ist davon auszugehen, dass sich der Heumöser Hang auch ständig in einem vorgespannten Zustand, also kritischem Zustand, befindet (Auflast durch Hang selbst und gespannte Grundwassersituation) und schon kleinere Veränderungen im Porenwasserdrucksystem können ausreichen, um einen Schwellenwert zu überschreiten, der die hanghaltenden Kräfte überwindet, und ein kleiner Bewegungsschub ausgelöst werden kann. Porenwasserdruckanstieg entsteht durch schnellen Makroporenfluss, der insbesondere bei hohen Matrixsättigungen quasi an dieser vorbeifließt. Nur unter trockenen Matrixbedingungen wird der Makroporenfluss vermutlich leicht abgeschwächt durch lateralen Übergang von Makroporenwasser in die umgebende Matrix.

Die zwei entwickelten experimentellen Untersuchungsreihen zu Makropore-Matrix-Austauschprozessen (Makroporenfluss-Experimente) und die Böschungsbruch-Experimente haben den Charakter einer Grundlagenforschung und wurden nicht mit Materialien aus dem Heumöser Hang durchgeführt. Sie lieferten aber allgemein gültige Ergebnisse und auf den Hang übertragbare Erkenntnisse. Darüber hinaus konnte mit den Versuchen, die als Benchmarkversuche bezeichnet werden können, wichtige Datenreihen gesichert werden, die für die Validierung und Kalibrierung von numerischen Simulationsmodellen bereitstehen.

Im Weiteren wurden bodenhydraulische Eigenschaften an Bodenproben vom Heumöser Hang ermittelt. Diese Ermittlung erfolgte unter Anwendung von Durchlässigkeits-, Multi-Step-Outflow- und Evaporations-Experimenten. In der vorliegenden Arbeit konnten die Methoden verglichen werden und Vor- und Nachteile benannt werden. Hierbei zeigte sich, dass die zwei verwendeten Evaporationsmethoden schneller und unaufwändiger sind als die Multi-Step-Outflow-Methode. Insbesondere die Evaporationsmethode unter Verwendung der HYPROP-Anlage erwies sich als sehr schnell und komfortabel, weil hier die Datenverarbeitung und -auswertung benutzerfreundlich integriert ist. Allerdings wird angenommen, dass sich aufgrund der hohen Makroporosität des Hangbodens mit den Kleinzylinderproben, wie sie bei der HYPROP-Methode verwendet wurden, der Retentionsbereich, bei dem Makro- und Grobporen relevant sind, nicht repräsentativ abbilden lässt. Das heißt im Umkehrschluss, dass sich

nur mit den hier auch verwendeten größeren Proben die hydraulischen Eigenschaften unter den speziellen Bedingungen des Heumöser Hanges repräsentativer beschreiben liessen.

Literaturverzeichnis

- Ad-Hoc-AG Boden. (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung* (5. Aufl.). Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Ahrenholz, B., Tölke, J., Lehmann, P., Peters, A., Kaestner, A., Krafczyk, M., & Durner, W. (2008). Prediction of capillary hysteresis in a porous material using lattice-Boltzmann methods and comparison to experimental data and a morphological pore network model. *Advances in Water Resources*, 31(9), 1151-1173.
- Akay, O., & Fox, G. A. (2007). Experimental investigation of direct connectivity between macropores and subsurface drains during infiltration. *Soil Science Society of America Journal*, 71(5), 1600-1606.
- Akay, O., Fox, G. A., & Šimůnek, J. (2008). Numerical simulation of flow dynamics during macropore-subsurface drain interactions using HYDRUS. *Vadose Zone Journal*, 7(3), 909-918.
- Allaire-Leung, S. E., Gupta, S. C., & Moncrief, J. F. (2000). Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics: 1. Macropore continuity. *Journal of Contaminant Hydrology*, 41(3), 283-301.
- Allaire-Leung, S. E., Gupta, S. C., & Moncrief, J. F. (2000). Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics: 2. Macropore tortuosity. *Journal of Contaminant Hydrology*, 41(3), 303-315.
- Bathurst, R. J., Blatz, J. A., & Burger, M. H. (2003). Performance of instrumented large-scale unreinforced and reinforced embankments loaded by a strip footing to failure. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), 1067-1083.
- Beven, K., & Germann, P. (1982). Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18(5), 1311-1325.
- Bouma, J., & Dekker, L. W. (1981). A method for measuring the vertical and horizontal K_{sat} of clay soils with macropores. *Soil Science Society of America Journal*, 45(3), 662-663.
- Buttle, J. M., & Leigh, D. G. (1997). The influence of artificial macropores on water and solute transport in laboratory soil columns. *Journal of Hydrology*, 191(1), 290-313

- Castiglione, P., Mohanty, B. P., Shouse, P. J., Simunek, J., Van Genuchten, M. T., & Santini, A. (2003). Lateral water diffusion in an artificial macroporous system. *Vadose Zone Journal*, 2(2), 212-221.
- Cho, S. E., & Lee, S. R. (2001). Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration. *Computers and Geotechnics*, 28(3), 185-208.
- Clapp, R. B., & Hornberger, G. M. (1978). Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 14(4), 601-604.
- Crosta, G. B., & Frattini, P. (2008). Rainfall-induced landslides and debris flows. *Hydrological Processes*, 22(4), 473-477.
- Czapar, G. F., Horton, R., & Fawcett, R. S. (1992). Herbicide and tracer movement in soil columns containing an artificial macropore. *Journal of Environmental Quality*, 21(1), 110-115.
- Depenthal, C., & Schmitt, G. (2003). Monitoring of a landslide in Vorarlberg/Austria. In S. Stiros & S. Pytharouli (Hrsg.), *Proceedings 11th International FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini (Thera) Island, Greece, May 25-28 2003* (S. 289-295).
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1990). *Physical and chemical hydrogeology*. New York: John Wiley and Sons, Inc. .
- Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 30(2), 211-223.
- Durner, W., Schultze, B., & Zurmühl, T. (1999). State-of-the-art in inverse modeling of inflow/outflow experiments. In M.Th. van Genuchten et al. (Hrsg.). *Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media* (S. 661–681). University of California, Riverside.
- Durner, W., & Iden, S. C. (2011). Extended multistep outflow method for the accurate determination of soil hydraulic properties near water saturation. *Water Resources Research*, 47(8), W08526.
- Ehlers, W., Graf, T., & Ammann, M. (2004). Deformation and localization analysis of partially saturated soil. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193(27), 2885-2910.

-
- Ehlers, W., Avci, O., & Markert, B. (2011). Computation of Slope Movements Initiated by Rain-Induced Shear Bands in Small-Scale Tests and In Situ. *Vadose Zone Journal*, 10(2), 512-525.
- El Sawwaf, M. A. (2007). Behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand over a soft clay slope. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(1), 50-60.
- Gerke, H. H., & Genuchten, M. V. (1993a). A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resources Research*, 29(2), 305-319.
- Gerke, H. H., & Genuchten, M. V. (1993b). Evaluation of a first-order water transfer term for variably saturated dual-porosity flow models. *Water Resources Research*, 29(4), 1225-1238.
- Gerke, H. H., & van Genuchten, M. T. (1996). Macroscopic representation of structural geometry for simulating water and solute movement in dual-porosity media. *Advances in Water Resources*, 19(6), 343-357.
- Gerke, H. H. (2006). Preferential flow descriptions for structured soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169(3), 382-400.
- Germer, K., & Braun, J. (2009). Slope failure processes in a laboratory flume. In J.P. Malet, A. Rematre & T.A. Bogaard (Hrsg.). *Landslide Processes: From geomorphological mapping to dynamic modelling* (S. 115-118), Strasbourg: CERG editions.
- Germer, K., & Braun, J. (2011). Effects of saturation on slope stability: Laboratory experiments utilizing external load. *Vadose Zone Journal*, 10(2), 477-486.
- Ghodrati, M., Chendorain, M., & Chang, Y. J. (1999). Characterization of macropore flow mechanisms in soil by means of a split macropore column. *Soil Science Society of America Journal*, 63(5), 1093-1101.
- Harp, E. L., Wells, W. G., & Sarmiento, J. G. (1990). Pore pressure response during failure in soils. *Geological Society of America Bulletin*, 102(4), 428-438.
- Hintermaier-Erhard, G., & Zech, W. (1997). *Wörterbuch der Bodenkunde: Systematik, Genese, Eigenschaften, Ökologie und Verbreitung von Böden*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.

- Huang, C. C., Lo, C. L., Jang, J. S., & Hwu, L. K. (2008). Internal soil moisture response to rainfall-induced slope failures and debris discharge. *Engineering Geology*, 101(3), 134-145.
- Huang, C. C., Tatsuoka, F., & Sato, Y. (1994). Failure mechanisms of reinforced sand slopes loaded with a footing. *Soils and Foundations*, 34(2), 27-40.
- Huang, C. C., Ju, Y. J., Hwu, L. K., & Lee, J. L. (2009). Internal soil moisture and piezometric responses to rainfall-induced shallow slope failures. *Journal of Hydrology*, 370(1), 39-51.
- Iden, S. C., & Durner, W. (2007). Free-form estimation of the unsaturated soil hydraulic properties by inverse modeling using global optimization. *Water Resources Research*, 43(7), W07451.
- Iverson, R. M., Reid, M. E., & LaHusen, R. G. (1997). Debris-flow mobilization from landslides 1. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25(1), 85-138.
- Iverson, R. M., Reid, M. E., Iverson, N. R., LaHusen, R. G., Logan, M., Mann, J. E., & Brien, D. L. (2000). Acute sensitivity of landslide rates to initial soil porosity. *Science*, 290(5491), 513-516.
- Jarvis, N., (1994). *The MACRO Model (Version 3.1). Technical Description and Sample Simulations*. Reports and Dissertations 19. Department of Soil Science, Swedish University of Agricultural Science, Uppsala, Sweden.
- Jarvis, N. J. (2007). A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, 58(3), 523-546.
- Köhne, J. M., & Mohanty, B. P. (2005). Water flow processes in a soil column with a cylindrical macropore: Experiment and hierarchical modeling. *Water Resources Research*, 41(3), W03010.
- Kretz, R. (compiler). (1974-1975). Physical constants of minerals. In R.C. Weast (Hrsg.), *Handbook of Chemistry and Physics* (55. Aufl.), S. 193-197. Cleveland, OH: Chemical Rubber Co. .
- Kutilek, M., & Nielsen, D. R. (1994). *Soil hydrology: textbook for students of soil science, agriculture, forestry, geoecology, hydrology, geomorphology and other related disciplines*. Cremlingen-Destedt: Catena-Verlag.

-
- Lamy, E., Lassabatere, L., Bechet, B., & Andrieu, H. (2009). Modeling the influence of an artificial macropore in sandy columns on flow and solute transfer. *Journal of Hydrology*, 376(3), 392-402.
- Laouafa, F., & Darve, F. (2002). Modelling of slope failure by a material instability mechanism. *Computers and Geotechnics*, 29(4), 301-325.
- Li, Y., & Ghodrati, M. (1997). Preferential transport of solute through soil columns containing constructed macropores. *Soil Science Society of America Journal*, 61(5), 1308-1317.
- Li, X., Liu, Z., Lewis, R. W., & Suzuki, K. (2003). Mixed finite element method for saturated poroelastoplastic media at large strains. *International journal for numerical methods in engineering*, 57(6), 875-898.
- Lindenmaier, F., Zehe, E., Dittfurth, A., & Ihringer, J. (2005). Process identification at a slow-moving landslide in the Vorarlberg Alps. *Hydrological Processes*, 19(8), 1635-1651.
- Lindenmaier, F. (2008). *Hydrology of a large unstable hillslope at Ebnit, Vorarlberg: Identifying dominating processes and structures*. Dissertation, Universität Potsdam, URL: <http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2008/1742/>, URN: urn:nbn:de:kobv:517-opus-17424.
- Lourenço, S. D., Sassa, K., & Fukuoka, H. (2006). Failure process and hydrologic response of a two layer physical model: Implications for rainfall-induced landslides. *Geomorphology*, 73(1), 115-130.
- Moriwaki, H., Inokuchi, T., Hattanji, T., Sassa, K., Ochiai, H., & Wang, G. (2004). Failure processes in a full-scale landslide experiment using a rainfall simulator. *Landslides*, 1(4), 277-288.
- Okura, Y., Kitahara, H., Ochiai, H., Sammori, T., & Kawanami, A. (2002). Landslide fluidization process by flume experiments. *Engineering Geology*, 66(1), 65-78.
- Olivares, L., & Damiano, E. (2007). Postfailure mechanics of landslides: laboratory investigation of flowslides in Pyroclastic soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(1), 51-62.
- Paul, D. K., & Kumar, S. (1997). Stability analysis of slope with building loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 16(6), 395-405.

- Pertassek, T., Peters, A., & Durner, W. (2011). *HYPROP Data Evaluation Software User's Manual, V.1.0*. München: UMS GmbH, Gmunder Str. 37, 81379 München.
- Peters, A., & Durner, W. (2008a). Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, 356(1), 147-162.
- Peters, A., & Durner, W. (2008b). A simple model for describing hydraulic conductivity in unsaturated porous media accounting for film and capillary flow. *Water Resources Research*, 44(11), W11417.
- Rahardjo, H., Lee, T. T., Leong, E. C., & Rezaur, R. B. (2005). Response of a residual soil slope to rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 340-351.
- Roy, S., & Mandal, N. (2009). Modes of hill-slope failure under overburden loads: Insights from physical and numerical models. *Tectonophysics*, 473(3), 324-340.
- Schelle, H., Iden, S. C., Peters, A., & Durner, W. (2010). Analysis of the Agreement of Soil Hydraulic Properties Obtained from Multistep-Outflow and Evaporation Methods. *Vadose Zone Journal*, 9(4), 1080-1091.
- Schindler, U. (1980). Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden und Stechzylinderproben. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, 24, 1-7.
- Schindler, U., & Müller, L. (2006). Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169(5), 623-629.
- Schindler, U., Durner, W., Von Unold, G., & Müller, L. (2010a). Evaporation method for measuring unsaturated hydraulic properties of soils: Extending the measurement range. *Soil Science Society of America Journal*, 74(4), 1071-1083.
- Schindler, U., Durner, W., von Unold, G., Mueller, L., & Wieland, R. (2010b). The evaporation method: Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(4), 563-572.
- Schindler, U., Mueller, L., da Veiga, M., Zhang, Y., Schlindwein, S., & Hu, C. (2012). Comparison of water-retention functions obtained from the extended evaporation method and the standard methods sand/kaolin boxes and pressure plate extractor. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(4), 527-534.

-
- Schneider, U. (1999). *Geotechnische Untersuchungen, satellitengestützte (GPS) Bewegungsanalysen und Standsicherheitsüberlegungen an einem Kriechhang in EBNIT, Vorarlberg*. Dissertation, Universität Karlsruhe,
URL: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/55999>, URN: urn:nbn:de:swb:90-AAA559990.
- Shokri, N., & Or, D. (2011). What determines drying rates at the onset of diffusion controlled stage-2 evaporation from porous media?. *Water Resources Research*, 47(9), W09513.
- Simunek, J., Jarvis, N. J., Van Genuchten, M. T., & Gärdenäs, A. (2003). Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of Hydrology*, 272(1), 14-35.
- Simunek, J., Sejna, M., Saito, H., Sakai, M., & Van Genuchten, M. T. (2008). *The HYDRUS-1D Software package for simulating onedimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Version, 4.07*. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside.
- Tohari, A., Nishigaki, M., & Komatsu, M. (2007). Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(5), 575-587.
- Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D. G., & Leong, E. C. (2003). Infiltration characteristics of two instrumented residual soil slopes. *Canadian geotechnical journal*, 40(5), 1012-1032.
- UMS GmbH München. (2012). HYPROP© - *Laborverdunstungsverfahren zur Bestimmung der pF-Kurve und der ungesättigten Leitfähigkeit*.
http://www.umsmuc.de/fileadmin/produkt_downloads/Bodenlabor/Hyprop_Anleitung.pdf.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Wang, G., & Sassa, K. (2001). Factors affecting rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests. *Geotechnique*, 51(7), 587-599.
- Wang, G., & Sassa, K. (2003). Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content. *Engineering Geology*, 69(1), 109-125.

- Wang, F., & Shibata, H. (2007). Influence of soil permeability on rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1128-1136.
- Wienhöfer, J., Germer, K., Lindenmaier, F., Färber, A., & Zehe, E. (2009). Applied tracers for the observation of subsurface stormflow at the hillslope scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(7), 1145-1161.
- Wienhöfer, J., Lindenmaier, F., & Zehe, E. (2011). Challenges in understanding the hydrologic controls on the mobility of slow-moving landslides. *Vadose Zone Journal*, 10(2), 496-511.
- Wind, G. P. (1968). Capillary conductivity data estimated by a simple method. In P.E. Rijtema & H. Wassink (Hrsg.), *Water in the unsaturated zone. Proceedings of the Wageningen Symposium Volume I* (S. 181-191). Gentbrugge, Niderlande & UNESCO, Paris, Frankreich: International Association of Scientific Hydrology.
- Yoo, C. (2001). Laboratory investigation of bearing capacity behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand slope. *Geotextiles and Geomembranes*, 19(5), 279-298.
- Zurmühl, T. (1996). Evaluation of different boundary conditions for independent determination of hydraulic parameters using outflow methods. In P. DuChateau & J. Gottlieb (Hrsg.), *Parameter Identification and Inverse Problems in Hydrology, Geology and Ecology*, Vol. 23 (S. 165-184). Dordrecht: Water Science and Technology Library, Kluwer.
- Zurmühl, T., & Durner, W. (1998). Determination of parameters for bimodal hydraulic functions by inverse modeling. *Soil Science Society of America Journal*, 62(4), 874-880.

Anhang A: Probenaufstellung in der VEGAS Versuchshalle

Nach der Probennahme am Heumöser Hang wurden die beiden Säulen abtransportiert und für weitere Untersuchungen in der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) positioniert und vorbereitet. Dafür wurde ein robustes Podest aufgebaut, auf dem sich die bis zu 80 kg schweren Säulen (mit Hüll-Modulen) aufstellen ließen. Die Säulen ließen sich auf vorgesehenen Löchern in der Podestplatte positionieren, so dass ein Zugriff von unten möglich war (siehe Abb. A.1).



Abb. A.1: Zylindrische und quadratische Bodensäule aufgestellt auf einem Podest in der Technikum-Halle von VEGAS; die Podestplatte hat an vier Stellen Löcher ($D = 15\text{ cm}$), die es ermöglichten, die Säulen exakt so zu positionieren, dass ein Zugang zur jeweiligen Säulengrundfläche möglich war (siehe Locher jeweils hinten links der Säulen).

Anhang B: Probenvorbereitung und Versuchsaufbau zu den K_s Messungen mit der quadratischen Bodensäule

Nach Probennahme und Aufstellung der quadratischen Säule in der *VEGAS* Versuchshalle (für die gesättigten Durchflusseexperimente) wurde der untere Rand der quadratischen Säule (= Bodensäulengrundfläche) im Labor vom Transportdeckel freigelegt und sorgfältig mit einem feinen Messer präpariert, so dass eine angeraute und somit offene und plane Oberfläche hergestellt wurde. An dieser Grundfläche wurde ein Lochplattenmodul (34 x 34 x 3 cm) befestigt. In diesem Modul aus Kunststoff ist auf der Oberseite ein 30 x 30 cm großes Lochblech (Dicke = 0,3 cm) mit Löchern mit einem Durchmesser von 0,5 cm in einem mittleren Abstand von 0,3 cm eingefasst. Unter dem Lochblech befindet sich ein Hohlraum, der nur von der Unterseite des Moduls durch eine Öffnung zugänglich ist. Diese Öffnung befindet sich zentral in der Unterseite des Moduls (Gewindebohrung $\frac{1}{4}$ “). Das Modul ist ansonsten an der Unterseite und an den Rändern undurchlässig. Das Lochplattenmodul wurde an der Bodensäulenunterseite dicht befestigt. Dabei wurde als Kontaktfläche zwischen Lochplatte und unterer Bodenoberfläche eine feine Gaze gelegt. Die Gaze diente der besseren kapillaren Kontakthanbindung und verringerte die freie Wasserdurchlässigkeit nur minimal. Außerdem diente sie als Filter für das später einströmende Wasser und als Rückhalt und Stabilisierung der Bodenoberfläche, so dass kein, oder nur in geringen Mengen Bodenmaterial in den Hohlraum des Lochplattenmoduls gelangen konnte. Der Versuchsaufbau ist in Abb. A.2 zu sehen.

Die im Versuch verwendeten Tensiometer wurden selbst hergestellt, wobei „one bar“-Keramiken der Firma Soil Moisture (Fa. Soilmoisture Equipment Corp., Goleta, Kalifornien) und 0,8 bis +0,2 bar Drucktransmitter Typ SML 30.0 mit max. Fehlerband 5 mbar der Firma AB Elektronik Sachsen GmbH (Klingenberg, Deutschland) und Edelstahlschäfte mit einem Durchmesser von 0,7 cm verwendet wurden.

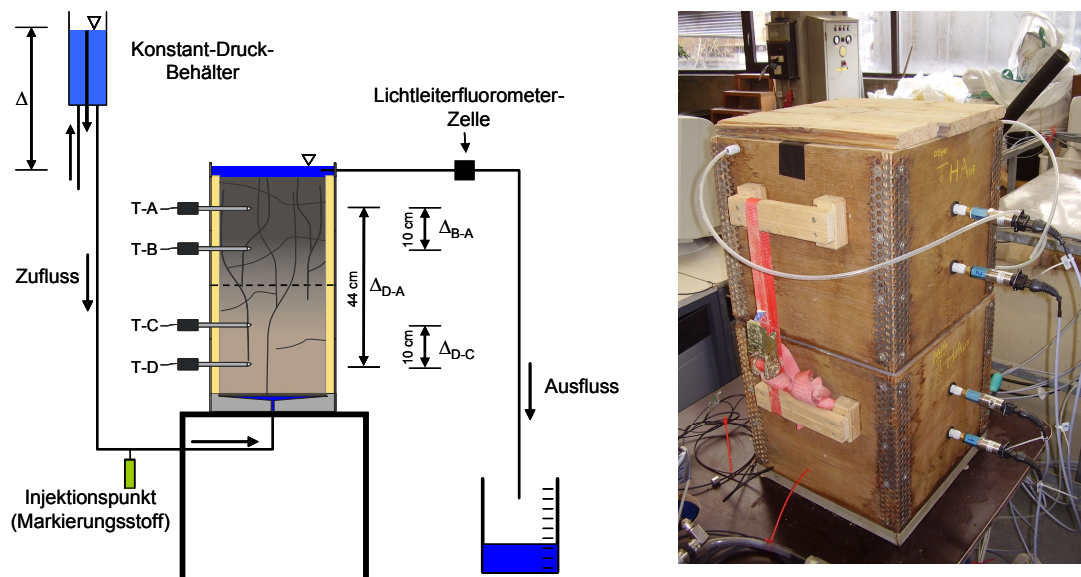


Abb. A.2: Die ca. 60 cm hohe quadratische Bodensäule in Vorbereitung eines gesättigten Durchfluss-experiments; in vier Tiefen sind Tensiometer installiert, deren Druckaufnehmer sich außerhalb der Säule befinden; die Tensiometerschäfte stecken innen bis ca. 8 cm in den Boden hinein.

Anhang C: Probenvorbereitung und Versuchsaufbau zu den Multi-Step-Outflow Experimenten mit der zylindrischen Bodensäule

Bei der zylindrischen Bodensäule (für die Multi-Step-Outflow- und Evaporationsversuche) wurde der untere Rand (= Bodensäulengrundfläche) im Labor vom Transportdeckel freigelegt und mit einem feinen Messer präpariert, so dass eine angeraute und somit offene und plane Oberfläche hergestellt wurde.

Am unteren Rand der Säule wurde ein Saugplattenmodul befestigt. Das Saugplattenmodul ist kreisrund und hat einen Durchmesser von 36 cm. An der Oberseite des Moduls ist eine Saugplatte aus einer porösen Polyethylen-Polyamid-Membran-Kombination eingefasst (Fa. eco-Tech Umwelt-Meßsysteme GmbH, Bonn, Deutschland). Diese Platte hat eine Membran mit einer durchschnittlichen Porenweite von 0,45 μm , ist sehr dünn ($< 1\text{mm}$), hat bei vollständiger Sättigung einen Lufteintrittspunkt von $>1000\text{ cm WS}$ (Druck in Zentimeter-Wassersäule) und hat eine firmenseitig angegebene hydraulische Durchlässigkeit von ca. 5 cm d^{-1} (siehe Abb. A.3). Unter der Saugplatte befindet sich ein Hohlraum, der nur an der Modulunterseite zentral zugänglich ist (Gewindebohrung $\frac{1}{4}$ “). Das Modul konnte am Flansch des unteren Säulenmoduls wasser- und luftdicht befestigt werden. Dabei wurde darauf geachtet, dass zwischen Saugplattenoberfläche und Bodenoberfläche an der Bodensäulengrundfläche guter Kontakt hergestellt wurde. Originäres Bodenmaterial wurde mit eingeschlämmt und die Saugplatte leicht angepresst, damit ausreichend kapillarer Kontakt entstehen konnte (siehe Abb. A.4). Durch diese Prozedur ist es nicht ausgeschlossen, dass Makroporen leicht verschlossen wurden. An der Oberseite des Moduls wurde während eines Versuchsdurchlaufes die Säulenhülle um ein 5 cm hohes Randmodul erhöht und eine Platte aus Holz mit zwischengelagerter Folie als Evaporationsschutz aufgeschraubt. Der Evaporationsschutz wurde nur leicht befestigt, so dass sich noch ausreichend Luftdurchlass ergab, um einen Luftdruckausgleich zu ermöglichen.

Entsprechend den vier aufeinander stehenden äußeren Mantelmodulen wurden vier Tensiometer (T-A bis T-D) jeweils zentral in der Modul-Mitte horizontal eingefügt. Die Tensiometer dienten in dieser Position der Erfassung des mittleren Porenwasserdrucks für das jeweilige Modul während des gesamten Versuchsablaufs. Die Tensiometerschäfte reichten ca. 8 bis 10 cm in den Boden hinein. Es wurde zusätzlich in der mittleren Tiefe pro Modul ein zweites Tensiometer in einem Abstandswinkel von 120° zum ersten Tensiometer eingebaut,

allerdings wurde später zur Auswertung aufgrund der besseren Güte der Messungen nur ein Vierer-Set (T-A, T-B, T-C und T-D) verwendet (siehe Abb. A.5). Die Tensiometermessungen, die später in die Auswertung eingingen, waren Messungen von selbst konstruierten Tensiometern aus „one bar“-Soil Moisture Keramiken (Fa. Soilmoisture Equipment Corp., Goleta, Kalifornien) und Druckaufnehmertransmittern der Serie 33 X -1 bis +2 bar (Fa. KELLER AG für Druckmesstechnik, Winterthur, Schweiz). Das digitale Ausgangssignal der Tensiometer-Drucktransmitter wurde mittels eines Konverters K 104 (Fa. KELLER AG für Druckmesstechnik) in permanenter Verbindung zu einem Computer erfasst. Das Fehlerband der Drucktransmitter beträgt 1,5 mbar (Herstellerangabe).

Für die Bodenwasserlösung, die über die Saugplatte aus der Bodensäule abgesaugt wurde, wurde eine luftdichte Schlauchverbindungsstrecke zu einem Auffangbehälter geschaffen. In diese Schlauchstrecke unterhalb des Saugplattenmoduls wurde ein Drucktransmitter (Fa. Keller, Typ 23 S, -1 bis +1 bar) am unteren Rand (P-UR) integriert, der den dort herrschenden Druck (insbesondere Luftunterdruck als untere Randbedingung während des MSO-Versuchsdurchlaufs) in cm WS messen kann (Beschreibung des Tensiometers in Abb. A.5). Der Auffangbehälter war luftdicht mit einer Vakuumpumpe verbunden. Der Auffangbehälter stand auf einer Waage Typ PCE WS 30 (Fa. PCE Deutschland GmbH (PCE Int.), Meschede, Deutschland) mit einem Messbereich von 0-30 kg, einer Ablesbarkeit von 0,5 g und einem Fehlerband von 1,5 g (Herstellerangabe). Die Waage war zur permanenten Messwertaufzeichnung dauerhaft mit einem Computer verbunden. Die Schläuche zwischen Auffangbehälter einerseits und Bodensäule und Vakuumpumpe andererseits waren auf Zugentlastung verlegt, so dass sich das Schlauchgewicht und Positionsveränderungen der Probe nicht auf die Gewichtsmessung auswirkten.

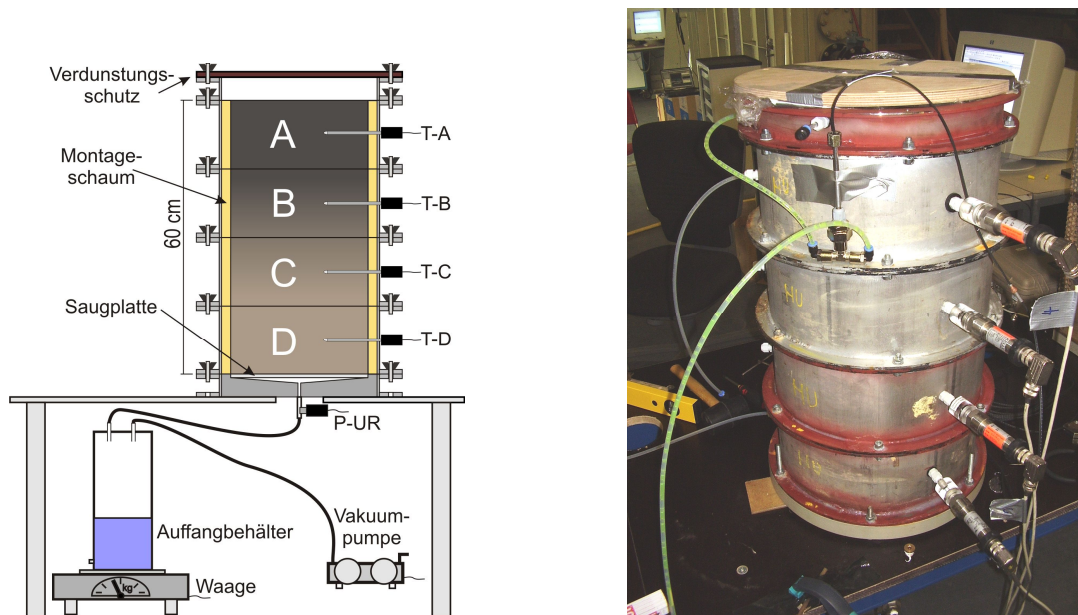


Abb. A.3: Schematische Darstellung und Foto des Versuchsaufbaus zum Multi-Step-Outflow-Versuch. Die Bodensäule steht auf einem Podest und ist am unteren Rand über das Saugplattenmodul mit dem Wasserauffangbehälter (auf Waage stehend) verbunden; über die Vakuumpumpe wird ein Luftunterdruck erzeugt, der sich im System über den Auffangbehälter bis in den Hohlraum an der Unterseite der Saugplatte ausbreitet; zudem gekennzeichnet sind die Tensiometer (T-A bis T-D) und ein Druckaufnehmer am unteren Rand (P-UR); rechts: aufgestellte Säule mit vier Tensiometern in vier Tiefen, entsprechend den vier aufeinander stehenden äußeren Mantelmodulen und unten in grau das angeschraubte Saugplattenmodul.



Abb. A.4: Links: Saugplattenmodul für die Befestigung am unteren Rand; rechts: sichtbare untere Grundfläche der Bodensäule (Bodensäule steht auf dem Kopf) mit Einschleimsschicht kurz vor dem Aufpressen des Saugplattenmoduls und der Befestigung am unteren Flansch.

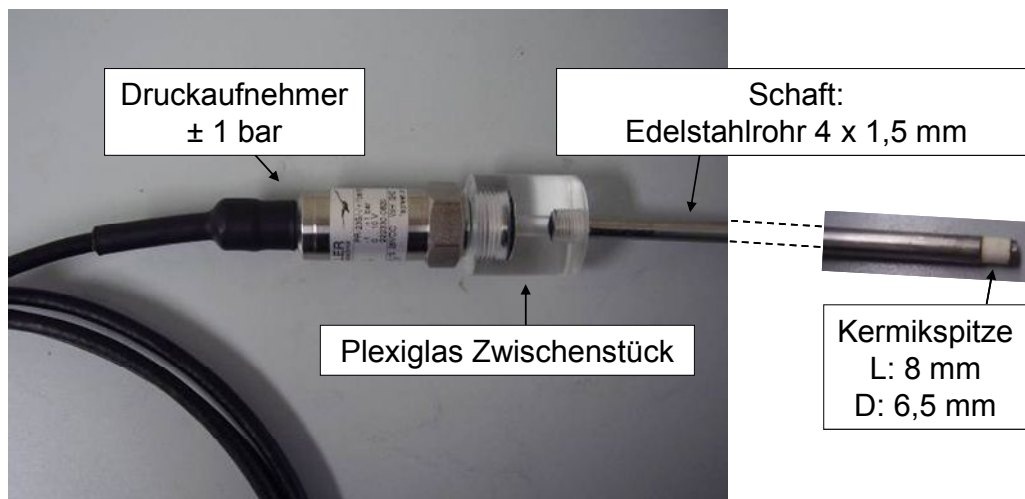


Abb. A.5: Detaildarstellung eines selbst konstruierten und verwendeten Tensiometers mit Konstruktionsdetails; Länge des Plexiglas-Zwischenstückes ca. 3 cm, es dient als Verbindung zwischen Druckaufnehmer und Schaft und ermöglicht aufgrund seiner Transparenz eine Luftblasenkontrolle; Edelstahlrohr mit 7 mm Außendurchmesser; L = Länge und D = Durchmesser.

Anhang D: Probenvorbereitung und Versuchsaufbau zu den Evaporationsexperimenten

Bei den zuvor beschriebenen MSO-Experimenten war je Modul ein Tensiometer in zentraler Höhe vorhanden ($z = 7,5$ cm). Für die Evaporationsexperimente wurden die Module mit weiteren seitlichen Zugängen versehen, so dass nun je Modul in zwei bis drei Tiefen Tensiometer installiert werden konnten. Unter der Annahme, dass die jeweilige Boden-Zylindergrundfläche = unterer Rand (= Kontaktfläche zwischen Bodenzylinder und Saugplatte bei den MSO-Versuchen) der Höhe $z = 0,0$ cm entspricht, befanden sich in jedem Modul zwei Tensiometer in den Höhen $z = 3,75$ cm (T_unten_1 und T_unten_2) und zwei Tensiometer in der Höhe $z = 11,25$ cm (T_oben_1 und T_oben_2), das heißt, dass jeweils symmetrisch im Abstand von $3,25$ cm oberhalb und unterhalb der Probenmitte Tensiometer vorhanden waren (bei Modul B, C und D). Bei Modul A wurden insgesamt drei Tensiometer verbaut, ein Tensiometer unten (T_unten_A), ein Tensiometer oben (T_oben_A) und zusätzlich ein Tensiometer in der Mitte bei $z = 7,5$ cm (T_mitte_A).

Jeweils ein Bodensäulenviertelmodul wurde auf eine Plattformwaage Typ PCE-TS 60 (Fa. PCE Deutschland GmbH (PCE Int.) Meschede, Deutschland) mit Messbereich 0 bis 60 kg mit einer Grundfläche von ca. 40 cm x 50 cm gestellt. Die Ablesegenauigkeit der Waage liegt bei 10 g und das Fehlerband bei 20 g. Die Waagen und Tensiometer waren permanent zur Datenerfassung mit einem Computer verbunden. Die Verkabelungen der Tensiometer wurden zugentlastet und schlaufig an der Waagenplattform befestigt, so dass die Gewichtsmessung nicht beeinträchtigt wurde. Den 15 cm hohen Modulen wurde noch ein 5 cm hohes Modul aufgesetzt (runder Mantelrand). Es fungierte als obere Seitenbegrenzung, um einen späteren Wasserüberstau zu Beginn der Versuchsdurchführung zu ermöglichen. Das Gesamtsystem war nach oben hin offen zur Atmosphäre (*VEGAS* Versuchshalle), um eine freie Evaporation entsprechend der Experimentidee zu gestatten. Die Saugplattenmodule, welche noch von den XMSO-Versuchen vorhanden waren, wurden am unteren Rand wasser- und luftdicht verschlossen, indem ein Stopfen in die $\frac{1}{4}$ “ Gewindebohrung eingeschraubt wurde. In Abb. A.6 und Abb. A.7 ist der Versuchsaufbau schematisch und photographisch zu sehen.

Mit zwei zur Verfügung stehenden gleichen Versuchsaufbauten konnten zwei von vier Bodensäulenteilstücken gleichzeitig der Evaporationsprozedur ausgesetzt werden.

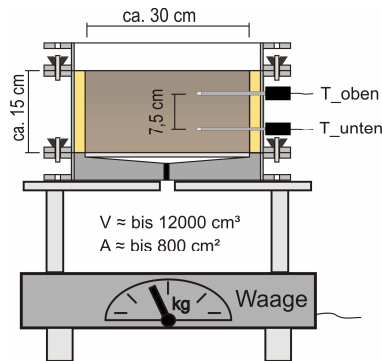
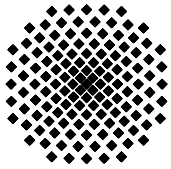


Abb. A.6: Schematische Darstellung des Evaporationsexperimentes mit einem 15 cm hohen Bodensäulenviertelmodul, stehend auf einer Plattformwaage und bestückt mit Tensiometern in zwei Höhen (V = Gesamtvolumen Probe, A = Grundfläche oben = Evaporationsoberfläche).



Abb. A.7: In der VEGAS-Versuchshalle aufgestellte Bodensäulenviertelmodule während eines Evaporationsexperiments; die zwei 15 cm hohen Module wurden zeitgleich auf jeweils eigener Plattformwaage stehend der freien Evaporation ausgesetzt; die Tensiometer stehen waagrecht aus den Modulen heraus; rechts oben im Foto Tensiometerdatenerfassungs-Box und Computer mit angeschlossenen Waagen zur permanenten Gewichtswerteerfassung.



Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 61
70569 Stuttgart (Vaihingen)
Telefon (0711) 685 - 64717/64749/64752/64679
Telefax (0711) 685 - 67020 o. 64746 o. 64681
E-Mail: iws@iws.uni-stuttgart.de
<http://www.iws.uni-stuttgart.de>

Direktoren

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy
Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig
Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nowak

Vorstand (Stand 1.3.2016)

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. A. Bárdossy
Prof. Dr.-Ing. R. Helmig
Prof. Dr.-Ing. S. Wieprecht
Prof. Dr. J.A. Sander Huisman
Jürgen Braun, PhD
apl. Prof. Dr.-Ing. H. Class
Dr.-Ing. H.-P. Koschitzky
Dr.-Ing. M. Noack
Prof. Dr.-Ing. W. Nowak
Dr. rer. nat. J. Seidel
Dr.-Ing. K. Terheiden
Dr.-Ing. habil. Sergey Oladyshkin

Emeriti

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Jürgen Giesecke
Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. E.h. Helmut Kobus, PhD

Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht
Stellv.: Dr.-Ing. Kristina Terheiden
Versuchsanstalt für Wasserbau
Leiter: Dr.-Ing. Markus Noack

Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig
Stellv.: apl. Prof. Dr.-Ing. Holger Class

Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie

Leiter: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy
Stellv.: Dr. rer. nat. Jochen Seidel
Hydrogeophysik der Vadosen Zone
(mit Forschungszentrum Jülich)
Leiter: Prof. Dr. J.A. Sander Huisman

Lehrstuhl für Stochastische Simulation und Sicherheitsforschung für Hydrosysteme

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nowak
Stellv.: Dr.-Ing. habil. Sergey Oladyshkin

VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung

Leitung: Jürgen Braun, PhD, AD
Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky, AD

Verzeichnis der Mitteilungshefte

- 1 Röhnisch, Arthur: *Die Bemühungen um eine Wasserbauliche Versuchsanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart*, und Fattah Abouleid, Abdel: *Beitrag zur Berechnung einer in lockeren Sand gerammten, zweifach verankerten Spundwand*, 1963
- 2 Marotz, Günter: *Beitrag zur Frage der Standfestigkeit von dichten Asphaltbelägen im Großwasserbau*, 1964
- 3 Gurr, Siegfried: *Beitrag zur Berechnung zusammengesetzter ebener Flächentragwerke unter besonderer Berücksichtigung ebener Stauwände, mit Hilfe von Randwert- und Lastwertmatrizen*, 1965
- 4 Plica, Peter: *Ein Beitrag zur Anwendung von Schalenkonstruktionen im Stahlwasserbau*, und Petrikat, Kurt: *Möglichkeiten und Grenzen des wasserbaulichen Versuchswesens*, 1966

- 5 Plate, Erich: *Beitrag zur Bestimmung der Windgeschwindigkeitsverteilung in der durch eine Wand gestörten bodennahen Luftschicht, und*
Röhnisch, Arthur; Marotz, Günter: *Neue Baustoffe und Bauausführungen für den Schutz der Böschungen und der Sohle von Kanälen, Flüssen und Häfen; Gesteungskosten und jeweilige Vorteile, sowie*
Unny, T.E.: *Schwingungsuntersuchungen am Kegelstrahlschieber, 1967*
- 6 Seiler, Erich: *Die Ermittlung des Anlagenwertes der bundeseigenen Binnenschiffahrtsstraßen und Talsperren und des Anteils der Binnenschifffahrt an diesem Wert, 1967*
- 7 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Arthur Röhnisch mit Beiträgen von* Benk, Dieter; Breitling, J.; Gurr, Siegfried; Haberhauer, Robert; Honekamp, Hermann; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg; Miller, Rudolf; Plate, Erich J.; Radomski, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1967
- 8 Jumikis, Alfred: *Beitrag zur experimentellen Untersuchung des Wassernachschubs in einem gefrierenden Boden und die Beurteilung der Ergebnisse, 1968*
- 9 Marotz, Günter: *Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund, 1968*
- 10 Radomski, Helge: *Untersuchungen über den Einfluß der Querschnittsform wellenförmiger Spundwände auf die statischen und rammtechnischen Eigenschaften, 1968*
- 11 Schwarz, Helmut: *Die Grenztragfähigkeit des Baugrundes bei Einwirkung vertikal gezogener Ankerplatten als zweidimensionales Bruchproblem, 1969*
- 12 Erbel, Klaus: *Ein Beitrag zur Untersuchung der Metamorphose von Mittelgebirgsschneedecken unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Bestimmung der thermischen Schneequalität, 1969*
- 13 Westhaus, Karl-Heinz: *Der Strukturwandel in der Binnenschifffahrt und sein Einfluß auf den Ausbau der Binnenschiffskanäle, 1969*
- 14 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Ein Beitrag zur Berechnung des Erdwiderstandes unter Ansatz der logarithmischen Spirale als Gleitflächenfunktion, 1970*
- 15 Schulz, Manfred: *Berechnung des räumlichen Erddruckes auf die Wandung kreiszylindrischer Körper, 1970*
- 16 Mobasseri, Manoutschehr: *Die Rippenstützmauer. Konstruktion und Grenzen ihrer Standsicherheit, 1970*
- 17 Benk, Dieter: *Ein Beitrag zum Betrieb und zur Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken, 1970*

- 18 Gál, Attila: *Bestimmung der mitschwingenden Wassermasse bei überströmten Fischbauchklappen mit kreiszylindrischem Staublech*, 1971, vergriffen
- 19 Kuz, Klaus Dieter: *Ein Beitrag zur Frage des Einsetzens von Kavitationserscheinungen in einer Düsenströmung bei Berücksichtigung der im Wasser gelösten Gase*, 1971, vergriffen
- 20 Schaak, Hartmut: *Verteilleitungen von Wasserkraftanlagen*, 1971
- 21 *Sonderheft zur Eröffnung der neuen Versuchsanstalt des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart mit Beiträgen von* Brombach, Hansjörg; Dirksen, Wolfram; Gál, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Holthoff, Franz-Josef; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Minor, Hans-Erwin; Petrikat, Kurt; Röhnisch, Arthur; Rueff, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1972
- 22 Wang, Chung-su: *Ein Beitrag zur Berechnung der Schwingungen an Kegelstrahlschiebern*, 1972
- 23 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Erdwiderstandsbeiwerte nach dem Ohde-Variationsverfahren*, 1972
- 24 Minor, Hans-Erwin: *Beitrag zur Bestimmung der Schwingungsanfachungsfunktionen überströmter Stauklappen*, 1972, vergriffen
- 25 Brombach, Hansjörg: *Untersuchung strömungsmechanischer Elemente (Fluidik) und die Möglichkeit der Anwendung von Wirbelkammerelementen im Wasserbau*, 1972, vergriffen
- 26 Wildenhahn, Eberhard: *Beitrag zur Berechnung von Horizontalfilterbrunnen*, 1972
- 27 Steinlein, Helmut: *Die Eliminierung der Schwebstoffe aus Flußwasser zum Zweck der unterirdischen Wasserspeicherung, gezeigt am Beispiel der Iller*, 1972
- 28 Holthoff, Franz Josef: *Die Überwindung großer Hubhöhen in der Binnenschifffahrt durch Schwimmerhebwerke*, 1973
- 29 Röder, Karl: *Einwirkungen aus Baugrundbewegungen auf trog- und kastenförmige Konstruktionen des Wasser- und Tunnelbaues*, 1973
- 30 Kretschmer, Heinz: *Die Bemessung von Bogenstaumauern in Abhängigkeit von der Talform*, 1973
- 31 Honekamp, Hermann: *Beitrag zur Berechnung der Montage von Unterwasserpipelines*, 1973
- 32 Giesecke, Jürgen: *Die Wirbelkammertriode als neuartiges Steuerorgan im Wasserbau*, und
Brombach, Hansjörg: *Entwicklung, Bauformen, Wirkungsweise und Steuereigenschaften von Wirbelkammerverstärkern*, 1974

- 33 Rueff, Helge: *Untersuchung der schwingungserregenden Kräfte an zwei hintereinander angeordneten Tiefschützen unter besonderer Berücksichtigung von Kavitation*, 1974
- 34 Röhnisch, Arthur: *Einpreßversuche mit Zementmörtel für Spannbeton - Vergleich der Ergebnisse von Modellversuchen mit Ausführungen in Hüllwellrohren*, 1975
- 35 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Kurt Petrikat mit Beiträgen von:* Brombach, Hansjörg; Erbel, Klaus; Flinspach, Dieter; Fischer jr., Richard; Gál, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Haberhauer, Robert; Hafner Edzard; Hausenblas, Bernhard; Horlacher, Hans-Burkhard; Hutarew, Andreas; Knoll, Manfred; Krummet, Ralph; Marotz, Günter; Merkle, Theodor; Miller, Christoph; Minor, Hans-Erwin; Neumayer, Hans; Rao, Syamala; Rath, Paul; Rueff, Helge; Ruppert, Jürgen; Schwarz, Wolfgang; Topal-Gökceli, Mehmet; Vollmer, Ernst; Wang, Chung-su; Weber, Hans-Georg; 1975
- 36 Berger, Jochum: *Beitrag zur Berechnung des Spannungszustandes in rotations-symmetrisch belasteten Kugelschalen veränderlicher Wandstärke unter Gas- und Flüssigkeitsdruck durch Integration schwach singulärer Differentialgleichungen*, 1975
- 37 Dirksen, Wolfram: *Berechnung instationärer Abflußvorgänge in gestauten Gerinnen mittels Differenzenverfahren und die Anwendung auf Hochwasserrückhaltebecken*, 1976
- 38 Horlacher, Hans-Burkhard: *Berechnung instationärer Temperatur- und Wärmespannungsfelder in langen mehrschichtigen Hohlzylindern*, 1976
- 39 Hafner, Edzard: *Untersuchung der hydrodynamischen Kräfte auf Baukörper im Tiefwasserbereich des Meeres*, 1977, ISBN 3-921694-39-6
- 40 Ruppert, Jürgen: *Über den Axialwirbelkammerverstärker für den Einsatz im Wasserbau*, 1977, ISBN 3-921694-40-X
- 41 Hutarew, Andreas: *Beitrag zur Beeinflußbarkeit des Sauerstoffgehalts in Fließgewässern an Abstürzen und Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-41-8, vergriffen
- 42 Miller, Christoph: *Ein Beitrag zur Bestimmung der schwingungserregenden Kräfte an unterströmten Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-42-6
- 43 Schwarz, Wolfgang: *Druckstoßberechnung unter Berücksichtigung der Radial- und Längsverschiebungen der Rohrwandung*, 1978, ISBN 3-921694-43-4
- 44 Kinzelbach, Wolfgang: *Numerische Untersuchungen über den optimalen Einsatz variabler Kühlsysteme einer Kraftwerkskette am Beispiel Oberrhein*, 1978, ISBN 3-921694-44-2
- 45 Barczewski, Baldur: *Neue Meßmethoden für Wasser-Luftgemische und deren Anwendung auf zweiphasige Auftriebsstrahlen*, 1979, ISBN 3-921694-45-0

- 46 Neumayer, Hans: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in radialen Wirbelkammerverstärkern*, 1979, ISBN 3-921694-46-9
- 47 Elalfy, Youssef-Elhassan: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in Wirbelkammerdioden und -drosseln*, 1979, ISBN 3-921694-47-7
- 48 Brombach, Hansjörg: *Automatisierung der Bewirtschaftung von Wasserspeichern*, 1981, ISBN 3-921694-48-5
- 49 Geldner, Peter: *Deterministische und stochastische Methoden zur Bestimmung der Selbstdichtung von Gewässern*, 1981, ISBN 3-921694-49-3, vergriffen
- 50 Mehlhorn, Hans: *Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwasserreinleitungen*, 1982, ISBN 3-921694-50-7, vergriffen
- 51 Hafner, Edzard: *Rohrleitungen und Behälter im Meer*, 1983, ISBN 3-921694-51-5
- 52 Rinnert, Bernd: *Hydrodynamische Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Dichteunterschieden auf die Vertikalvermischung in horizontaler Strömung*, 1983, ISBN 3-921694-52-3, vergriffen
- 53 Lindner, Wulf: *Steuerung von Grundwasserentnahmen unter Einhaltung ökologischer Kriterien*, 1983, ISBN 3-921694-53-1, vergriffen
- 54 Herr, Michael; Herzer, Jörg; Kinzelbach, Wolfgang; Kobus, Helmut; Rinnert, Bernd: *Methoden zur rechnerischen Erfassung und hydraulischen Sanierung von Grundwasserkontaminationen*, 1983, ISBN 3-921694-54-X
- 55 Schmitt, Paul: *Wege zur Automatisierung der Niederschlagsermittlung*, 1984, ISBN 3-921694-55-8, vergriffen
- 56 Müller, Peter: *Transport und selektive Sedimentation von Schwebstoffen bei gestautem Abfluß*, 1985, ISBN 3-921694-56-6
- 57 El-Qawasmeh, Fuad: *Möglichkeiten und Grenzen der Tropfbewässerung unter besonderer Berücksichtigung der Verstopfungsanfälligkeit der Tropfelemente*, 1985, ISBN 3-921694-57-4, vergriffen
- 58 Kirchenbaur, Klaus: *Mikroprozessorgesteuerte Erfassung instationärer Druckfelder am Beispiel seegangsbelasteter Baukörper*, 1985, ISBN 3-921694-58-2
- 59 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1984/85 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart), 1985, ISBN 3-921694-59-0, vergriffen
- 60 Spitz, Karlheinz: *Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Inhomogenitäten und Dichteunterschieden*, 1985, ISBN 3-921694-60-4, vergriffen
- 61 Kobus, Helmut: *An Introduction to Air-Water Flows in Hydraulics*, 1985, ISBN 3-921694-61-2

- 62 Kaleris, Vassilios: *Erfassung des Austausches von Oberflächen- und Grundwasser in horizontalebene Grundwassermodellen*, 1986, ISBN 3-921694-62-0
- 63 Herr, Michael: *Grundlagen der hydraulischen Sanierung verunreinigter Porengrundwasserleiter*, 1987, ISBN 3-921694-63-9
- 64 Marx, Walter: *Berechnung von Temperatur und Spannung in Massenbeton infolge Hydratation*, 1987, ISBN 3-921694-64-7
- 65 Koschitzky, Hans-Peter: *Dimensionierungskonzept für Sohlbelüfter in Schußrinnen zur Vermeidung von Kavitationsschäden*, 1987, ISBN 3-921694-65-5
- 66 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1986/87 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart) 1987, ISBN 3-921694-66-3
- 67 Söll, Thomas: *Berechnungsverfahren zur Abschätzung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser*, 1988, ISBN 3-921694-67-1
- 68 Dittrich, Andreas; Westrich, Bernd: *Bodenseeufererosion, Bestandsaufnahme und Bewertung*, 1988, ISBN 3-921694-68-X, vergriffen
- 69 Huwe, Bernd; van der Ploeg, Rienk R.: *Modelle zur Simulation des Stickstoffhaushaltes von Standorten mit unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung*, 1988, ISBN 3-921694-69-8, vergriffen
- 70 Stephan, Karl: *Integration elliptischer Funktionen*, 1988, ISBN 3-921694-70-1
- 71 Kobus, Helmut; Zilliox, Lothaire (Hrsg.): *Nitratbelastung des Grundwassers, Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Grundwasser- und Rohwasserbeschaffenheit und Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers*. Vorträge des deutsch-französischen Kolloquiums am 6. Oktober 1988, Universitäten Stuttgart und Louis Pasteur Strasbourg (Vorträge in deutsch oder französisch, Kurzfassungen zweisprachig), 1988, ISBN 3-921694-71-X
- 72 Soyeaux, Renald: *Unterströmung von Stauanlagen auf klüftigem Untergrund unter Berücksichtigung laminarer und turbulenter Fließzustände*, 1991, ISBN 3-921694-72-8
- 73 Kohane, Roberto: *Berechnungsmethoden für Hochwasserabfluß in Fließgewässern mit überströmten Vorländern*, 1991, ISBN 3-921694-73-6
- 74 Hassinger, Reinhard: *Beitrag zur Hydraulik und Bemessung von Blocksteinrampen in flexibler Bauweise*, 1991, ISBN 3-921694-74-4, vergriffen
- 75 Schäfer, Gerhard: *Einfluß von Schichtenstrukturen und lokalen Einlagerungen auf die Längsdispersion in Porengrundwasserleitern*, 1991, ISBN 3-921694-75-2
- 76 Giesecke, Jürgen: *Vorträge, Wasserwirtschaft in stark besiedelten Regionen; Umweltforschung mit Schwerpunkt Wasserwirtschaft*, 1991, ISBN 3-921694-76-0

- 77 Huwe, Bernd: *Deterministische und stochastische Ansätze zur Modellierung des Stickstoffhaushalts landwirtschaftlich genutzter Flächen auf unterschiedlichem Skalenniveau*, 1992, ISBN 3-921694-77-9, vergriffen
- 78 Rommel, Michael: *Verwendung von Kluftdaten zur realitätsnahen Generierung von Kluftnetzen mit anschließender laminar-turbulenter Strömungsberechnung*, 1993, ISBN 3-92 1694-78-7
- 79 Marschall, Paul: *Die Ermittlung lokaler Stofffrachten im Grundwasser mit Hilfe von Einbohrloch-Meßverfahren*, 1993, ISBN 3-921694-79-5, vergriffen
- 80 Ptak, Thomas: *Stofftransport in heterogenen Porenaquiferen: Felduntersuchungen und stochastische Modellierung*, 1993, ISBN 3-921694-80-9, vergriffen
- 81 Haakh, Frieder: *Transientes Strömungsverhalten in Wirbelkammern*, 1993, ISBN 3-921694-81-7
- 82 Kobus, Helmut; Cirpka, Olaf; Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter: *Versuchseinrichtung zur Grundwasser und Altlastensanierung VEGAS, Konzeption und Programmrahmen*, 1993, ISBN 3-921694-82-5
- 83 Zang, Weidong: *Optimaler Echtzeit-Betrieb eines Speichers mit aktueller Abflußregenerierung*, 1994, ISBN 3-921694-83-3, vergriffen
- 84 Franke, Hans-Jörg: *Stochastische Modellierung eines flächenhaften Stoffeintrages und Transports in Grundwasser am Beispiel der Pflanzenschutzmittelproblematik*, 1995, ISBN 3-921694-84-1
- 85 Lang, Ulrich: *Simulation regionaler Strömungs- und Transportvorgänge in Karst-aquiferen mit Hilfe des Doppelkontinuum-Ansatzes: Methodenentwicklung und Parameteridentifikation*, 1995, ISBN 3-921694-85-X, vergriffen
- 86 Helmig, Rainer: *Einführung in die Numerischen Methoden der Hydromechanik*, 1996, ISBN 3-921694-86-8, vergriffen
- 87 Cirpka, Olaf: *CONTRACT: A Numerical Tool for Contaminant Transport and Chemical Transformations - Theory and Program Documentation -*, 1996, ISBN 3-921694-87-6
- 88 Haberlandt, Uwe: *Stochastische Synthese und Regionalisierung des Niederschlages für Schmutzfrachtberechnungen*, 1996, ISBN 3-921694-88-4
- 89 Croisé, Jean: *Extraktion von flüchtigen Chemikalien aus natürlichen Lockergesteinen mittels erzwungener Luftströmung*, 1996, ISBN 3-921694-89-2, vergriffen
- 90 Jorde, Klaus: *Ökologisch begründete, dynamische Mindestwasserregelungen bei Ausleitungskraftwerken*, 1997, ISBN 3-921694-90-6, vergriffen
- 91 Helmig, Rainer: *Gekoppelte Strömungs- und Transportprozesse im Untergrund - Ein Beitrag zur Hydrosystemmodellierung-*, 1998, ISBN 3-921694-91-4, vergriffen

- 92 Emmert, Martin: *Numerische Modellierung nichtisothermer Gas-Wasser Systeme in porösen Medien*, 1997, ISBN 3-921694-92-2
- 93 Kern, Ulrich: *Transport von Schweb- und Schadstoffen in staugeregelten Fließgewässern am Beispiel des Neckars*, 1997, ISBN 3-921694-93-0, vergriffen
- 94 Förster, Georg: *Druckstoßdämpfung durch große Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen* 1997, ISBN 3-921694-94-9
- 95 Cirpka, Olaf: *Numerische Methoden zur Simulation des reaktiven Mehrkomponententransports im Grundwasser*, 1997, ISBN 3-921694-95-7, vergriffen
- 96 Färber, Arne: *Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1997, ISBN 3-921694-96-5
- 97 Betz, Christoph: *Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1998, ISBN 3-921694-97-3
- 98 Xu, Yichun: *Numerical Modeling of Suspended Sediment Transport in Rivers*, 1998, ISBN 3-921694-98-1, vergriffen
- 99 Wüst, Wolfgang: *Geochemische Untersuchungen zur Sanierung CKW-kontaminierter Aquifere mit Fe(0)-Reaktionswänden*, 2000, ISBN 3-933761-02-2
- 100 Sheta, Hussam: *Simulation von Mehrphasenvorgängen in porösen Medien unter Einbeziehung von Hysterese-Effekten*, 2000, ISBN 3-933761-03-4
- 101 Ayros, Edwin: *Regionalisierung extremer Abflüsse auf der Grundlage statistischer Verfahren*, 2000, ISBN 3-933761-04-2, vergriffen
- 102 Huber, Ralf: *Compositional Multiphase Flow and Transport in Heterogeneous Porous Media*, 2000, ISBN 3-933761-05-0
- 103 Braun, Christopherus: *Ein Upscaling-Verfahren für Mehrphasenströmungen in porösen Medien*, 2000, ISBN 3-933761-06-9
- 104 Hofmann, Bernd: *Entwicklung eines rechnergestützten Managementsystems zur Beurteilung von Grundwasserschadensfällen*, 2000, ISBN 3-933761-07-7
- 105 Class, Holger: *Theorie und numerische Modellierung nichtisothermer Mehrphasenprozesse in NAPL-kontaminierten porösen Medien*, 2001, ISBN 3-933761-08-5
- 106 Schmidt, Reinhard: *Wasserdampf- und Heißluftinjektion zur thermischen Sanierung kontaminierter Standorte*, 2001, ISBN 3-933761-09-3
- 107 Josef, Reinhold: *Schadstoffextraktion mit hydraulischen Sanierungsverfahren unter Anwendung von grenzflächenaktiven Stoffen*, 2001, ISBN 3-933761-10-7

- 108 Schneider, Matthias: *Habitat- und Abflussmodellierung für Fließgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen*, 2001, ISBN 3-933761-11-5
- 109 Rathgeb, Andreas: *Hydrodynamische Bemessungsgrundlagen für Lockerdeckwerke an überströmbaren Erddämmen*, 2001, ISBN 3-933761-12-3
- 110 Lang, Stefan: *Parallele numerische Simulation instationärer Probleme mit adaptiven Methoden auf unstrukturierten Gittern*, 2001, ISBN 3-933761-13-1
- 111 Appt, Jochen; Stumpp Simone: *Die Bodensee-Messkampagne 2001, IWS/CWR Lake Constance Measurement Program 2001*, 2002, ISBN 3-933761-14-X
- 112 Heimerl, Stephan: *Systematische Beurteilung von Wasserkraftprojekten*, 2002, ISBN 3-933761-15-8, vergriffen
- 113 Iqbal, Amin: *On the Management and Salinity Control of Drip Irrigation*, 2002, ISBN 3-933761-16-6
- 114 Silberhorn-Hemminger, Annette: *Modellierung von Kluftaquifersystemen: Geostatistische Analyse und deterministisch-stochastische Kluftgenerierung*, 2002, ISBN 3-933761-17-4
- 115 Winkler, Angela: *Prozesse des Wärme- und Stofftransports bei der In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen*, 2003, ISBN 3-933761-18-2
- 116 Marx, Walter: *Wasserkraft, Bewässerung, Umwelt - Planungs- und Bewertungsschwerpunkte der Wasserbewirtschaftung*, 2003, ISBN 3-933761-19-0
- 117 Hinkelmann, Reinhard: *Efficient Numerical Methods and Information-Processing Techniques in Environment Water*, 2003, ISBN 3-933761-20-4
- 118 Samaniego-Eguiguren, Luis Eduardo: *Hydrological Consequences of Land Use / Land Cover and Climatic Changes in Mesoscale Catchments*, 2003, ISBN 3-933761-21-2
- 119 Neunhäuserer, Lina: *Diskretisierungsansätze zur Modellierung von Strömungs- und Transportprozessen in geklüftet-porösen Medien*, 2003, ISBN 3-933761-22-0
- 120 Paul, Maren: *Simulation of Two-Phase Flow in Heterogeneous Poros Media with Adaptive Methods*, 2003, ISBN 3-933761-23-9
- 121 Ehret, Uwe: *Rainfall and Flood Nowcasting in Small Catchments using Weather Radar*, 2003, ISBN 3-933761-24-7
- 122 Haag, Ingo: *Der Sauerstoffhaushalt staugeregelter Flüsse am Beispiel des Neckars - Analysen, Experimente, Simulationen -*, 2003, ISBN 3-933761-25-5
- 123 Appt, Jochen: *Analysis of Basin-Scale Internal Waves in Upper Lake Constance*, 2003, ISBN 3-933761-26-3

- 124 Hrsg.: Schrenk, Volker; Batereau, Katrin; Barczewski, Baldur; Weber, Karolin und Koschitzky, Hans-Peter: *Symposium Ressource Fläche und VEGAS - Statuskolloquium 2003, 30. September und 1. Oktober 2003*, 2003, ISBN 3-933761-27-1
- 125 Omar Khalil Ouda: *Optimisation of Agricultural Water Use: A Decision Support System for the Gaza Strip*, 2003, ISBN 3-933761-28-0
- 126 Batereau, Katrin: *Sensorbasierte Bodenluftmessung zur Vor-Ort-Erkundung von Schadensherden im Untergrund*, 2004, ISBN 3-933761-29-8
- 127 Witt, Oliver: *Erosionsstabilität von Gewässersedimenten mit Auswirkung auf den Stofftransport bei Hochwasser am Beispiel ausgewählter Stauhaltungen des Oberrheins*, 2004, ISBN 3-933761-30-1
- 128 Jakobs, Hartmut: *Simulation nicht-isothermer Gas-Wasser-Prozesse in komplexen Kluft-Matrix-Systemen*, 2004, ISBN 3-933761-31-X
- 129 Li, Chen-Chien: *Deterministisch-stochastisches Berechnungskonzept zur Beurteilung der Auswirkungen erosiver Hochwasserereignisse in Flusstauhaltungen*, 2004, ISBN 3-933761-32-8
- 130 Reichenberger, Volker; Helmig, Rainer; Jakobs, Hartmut; Bastian, Peter; Niessner, Jennifer: *Complex Gas-Water Processes in Discrete Fracture-Matrix Systems: Upscaling, Mass-Conservative Discretization and Efficient Multilevel Solution*, 2004, ISBN 3-933761-33-6
- 131 Hrsg.: Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter; Weber, Karolin; Wege, Ralf: *VEGAS - Statuskolloquium 2004*, Tagungsband zur Veranstaltung am 05. Oktober 2004 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2004, ISBN 3-933761-34-4
- 132 Asie, Kemal Jabir: *Finite Volume Models for Multiphase Multicomponent Flow through Porous Media*. 2005, ISBN 3-933761-35-2
- 133 Jacoub, George: *Development of a 2-D Numerical Module for Particulate Contaminant Transport in Flood Retention Reservoirs and Impounded Rivers*, 2004, ISBN 3-933761-36-0
- 134 Nowak, Wolfgang: *Geostatistical Methods for the Identification of Flow and Transport Parameters in the Subsurface*, 2005, ISBN 3-933761-37-9
- 135 Süß, Mia: *Analysis of the influence of structures and boundaries on flow and transport processes in fractured porous media*, 2005, ISBN 3-933761-38-7
- 136 Jose, Surabhin Chackiath: *Experimental Investigations on Longitudinal Dispersive Mixing in Heterogeneous Aquifers*, 2005, ISBN: 3-933761-39-5
- 137 Filiz, Fulya: *Linking Large-Scale Meteorological Conditions to Floods in Mesoscale Catchments*, 2005, ISBN 3-933761-40-9

- 138 Qin, Minghao: *Wirklichkeitsnahe und recheneffiziente Ermittlung von Temperatur und Spannungen bei großen RCC-Staumauern*, 2005, ISBN 3-933761-41-7
- 139 Kobayashi, Kenichiro: *Optimization Methods for Multiphase Systems in the Sub-surface - Application to Methane Migration in Coal Mining Areas*, 2005, ISBN 3-933761-42-5
- 140 Rahman, Md. Arifur: *Experimental Investigations on Transverse Dispersive Mixing in Heterogeneous Porous Media*, 2005, ISBN 3-933761-43-3
- 141 Schrenk, Volker: *Ökobilanzen zur Bewertung von Altlastensanierungsmaßnahmen*, 2005, ISBN 3-933761-44-1
- 142 Hundecha, Hirpa Yeshewatersfa: *Regionalization of Parameters of a Conceptual Rainfall-Runoff Model*, 2005, ISBN: 3-933761-45-X
- 143 Wege, Ralf: *Untersuchungs- und Überwachungsmethoden für die Beurteilung natürlicher Selbstreinigungsprozesse im Grundwasser*, 2005, ISBN 3-933761-46-8
- 144 Breiting, Thomas: *Techniken und Methoden der Hydroinformatik - Modellierung von komplexen Hydrosystemen im Untergrund*, 2006, 3-933761-47-6
- 145 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Müller, Martin: *Ressource Untergrund: 10 Jahre VEGAS: Forschung und Technologieentwicklung zum Schutz von Grundwasser und Boden*, Tagungsband zur Veranstaltung am 28. und 29. September 2005 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2005, ISBN 3-933761-48-4
- 146 Rojanschi, Vlad: *Abflusskonzentration in mesoskaligen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung des Sickerraumes*, 2006, ISBN 3-933761-49-2
- 147 Winkler, Nina Simone: *Optimierung der Steuerung von Hochwasserrückhaltebecken-systemen*, 2006, ISBN 3-933761-50-6
- 148 Wolf, Jens: *Räumlich differenzierte Modellierung der Grundwasserströmung alluvialer Aquifere für mesoskalige Einzugsgebiete*, 2006, ISBN: 3-933761-51-4
- 149 Kohler, Beate: *Externe Effekte der Laufwasserkraftnutzung*, 2006, ISBN 3-933761-52-2
- 150 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias: *VEGAS-Statuskolloquium 2006*, Tagungsband zur Veranstaltung am 28. September 2006 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2006, ISBN 3-933761-53-0
- 151 Niessner, Jennifer: *Multi-Scale Modeling of Multi-Phase - Multi-Component Processes in Heterogeneous Porous Media*, 2006, ISBN 3-933761-54-9
- 152 Fischer, Markus: *Beanspruchung eingeeerdeter Rohrleitungen infolge Austrocknung bindiger Böden*, 2006, ISBN 3-933761-55-7

- 153 Schneck, Alexander: *Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung unter Berücksichtigung der Belange der Wasserversorgung, der Landwirtschaft und des Naturschutzes*, 2006, ISBN 3-933761-56-5
- 154 Das, Tapash: *The Impact of Spatial Variability of Precipitation on the Predictive Uncertainty of Hydrological Models*, 2006, ISBN 3-933761-57-3
- 155 Bielinski, Andreas: *Numerical Simulation of CO₂ sequestration in geological formations*, 2007, ISBN 3-933761-58-1
- 156 Mödinger, Jens: *Entwicklung eines Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungssystems für eine nachhaltige regionale Grundwasserbewirtschaftung*, 2006, ISBN 3-933761-60-3
- 157 Manthey, Sabine: *Two-phase flow processes with dynamic effects in porous media - parameter estimation and simulation*, 2007, ISBN 3-933761-61-1
- 158 Pozos Estrada, Oscar: *Investigation on the Effects of Entrained Air in Pipelines*, 2007, ISBN 3-933761-62-X
- 159 Ochs, Steffen Oliver: *Steam injection into saturated porous media – process analysis including experimental and numerical investigations*, 2007, ISBN 3-933761-63-8
- 160 Marx, Andreas: *Einsatz gekoppelter Modelle und Wetterradar zur Abschätzung von Niederschlagsintensitäten und zur Abflussvorhersage*, 2007, ISBN 3-933761-64-6
- 161 Hartmann, Gabriele Maria: *Investigation of Evapotranspiration Concepts in Hydrological Modelling for Climate Change Impact Assessment*, 2007, ISBN 3-933761-65-4
- 162 Kebede Gurmessa, Tesfaye: *Numerical Investigation on Flow and Transport Characteristics to Improve Long-Term Simulation of Reservoir Sedimentation*, 2007, ISBN 3-933761-66-2
- 163 Trifković, Aleksandar: *Multi-objective and Risk-based Modelling Methodology for Planning, Design and Operation of Water Supply Systems*, 2007, ISBN 3-933761-67-0
- 164 Götzinger, Jens: *Distributed Conceptual Hydrological Modelling - Simulation of Climate, Land Use Change Impact and Uncertainty Analysis*, 2007, ISBN 3-933761-68-9
- 165 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias: *VEGAS – Kolloquium 2007*, Tagungsband zur Veranstaltung am 26. September 2007 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2007, ISBN 3-933761-69-7
- 166 Freeman, Beau: *Modernization Criteria Assessment for Water Resources Planning; Klamath Irrigation Project, U.S.*, 2008, ISBN 3-933761-70-0

- 167 Dreher, Thomas: *Selektive Sedimentation von Feinstschwebstoffen in Wechselwirkung mit wandnahen turbulenten Strömungsbedingungen*, 2008, ISBN 3-933761-71-9
- 168 Yang, Wei: *Discrete-Continuous Downscaling Model for Generating Daily Precipitation Time Series*, 2008, ISBN 3-933761-72-7
- 169 Kopecki, Ianina: *Calculational Approach to FST-Hemispheres for Multiparametrical Benthos Habitat Modelling*, 2008, ISBN 3-933761-73-5
- 170 Brommundt, Jürgen: *Stochastische Generierung räumlich zusammenhängender Niederschlagszeitreihen*, 2008, ISBN 3-933761-74-3
- 171 Papafotiou, Alexandros: *Numerical Investigations of the Role of Hysteresis in Heterogeneous Two-Phase Flow Systems*, 2008, ISBN 3-933761-75-1
- 172 He, Yi: *Application of a Non-Parametric Classification Scheme to Catchment Hydrology*, 2008, ISBN 978-3-933761-76-7
- 173 Wagner, Sven: *Water Balance in a Poorly Gauged Basin in West Africa Using Atmospheric Modelling and Remote Sensing Information*, 2008, ISBN 978-3-933761-77-4
- 174 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias; Schrenk, Volker: *VEGAS-Kolloquium 2008 Ressource Fläche III*, Tagungsband zur Veranstaltung am 01. Oktober 2008 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2008, ISBN 978-3-933761-78-1
- 175 Patil, Sachin: *Regionalization of an Event Based Nash Cascade Model for Flood Predictions in Ungauged Basins*, 2008, ISBN 978-3-933761-79-8
- 176 Assteerawatt, Anongnart: *Flow and Transport Modelling of Fractured Aquifers based on a Geostatistical Approach*, 2008, ISBN 978-3-933761-80-4
- 177 Karnahl, Joachim Alexander: *2D numerische Modellierung von multifraktionalem Schwebstoff- und Schadstofftransport in Flüssen*, 2008, ISBN 978-3-933761-81-1
- 178 Hiester, Uwe: *Technologieentwicklung zur In-situ-Sanierung der ungesättigten Bodenzone mit festen Wärmequellen*, 2009, ISBN 978-3-933761-82-8
- 179 Laux, Patrick: *Statistical Modeling of Precipitation for Agricultural Planning in the Volta Basin of West Africa*, 2009, ISBN 978-3-933761-83-5
- 180 Ehsan, Saqib: *Evaluation of Life Safety Risks Related to Severe Flooding*, 2009, ISBN 978-3-933761-84-2
- 181 Prohaska, Sandra: *Development and Application of a 1D Multi-Strip Fine Sediment Transport Model for Regulated Rivers*, 2009, ISBN 978-3-933761-85-9

- 182 Kopp, Andreas: *Evaluation of CO₂ Injection Processes in Geological Formations for Site Screening*, 2009, ISBN 978-3-933761-86-6
- 183 Ebigbo, Anozie: *Modelling of biofilm growth and its influence on CO₂ and water (two-phase) flow in porous media*, 2009, ISBN 978-3-933761-87-3
- 184 Freiboth, Sandra: *A phenomenological model for the numerical simulation of multiphase multicomponent processes considering structural alterations of porous media*, 2009, ISBN 978-3-933761-88-0
- 185 Zöllner, Frank: *Implementierung und Anwendung netzfreier Methoden im Konstruktiven Wasserbau und in der Hydromechanik*, 2009, ISBN 978-3-933761-89-7
- 186 Vasin, Milos: *Influence of the soil structure and property contrast on flow and transport in the unsaturated zone*, 2010, ISBN 978-3-933761-90-3
- 187 Li, Jing: *Application of Copulas as a New Geostatistical Tool*, 2010, ISBN 978-3-933761-91-0
- 188 AghaKouchak, Amir: *Simulation of Remotely Sensed Rainfall Fields Using Copulas*, 2010, ISBN 978-3-933761-92-7
- 189 Thapa, Pawan Kumar: *Physically-based spatially distributed rainfall runoff modeling for soil erosion estimation*, 2010, ISBN 978-3-933761-93-4
- 190 Wurms, Sven: *Numerische Modellierung der Sedimentationsprozesse in Retentionsanlagen zur Steuerung von Stoffströmen bei extremen Hochwasserabflussergebnissen*, 2011, ISBN 978-3-933761-94-1
- 191 Merkel, Uwe: *Unsicherheitsanalyse hydraulischer Einwirkungen auf Hochwasserschutzdeiche und Steigerung der Leistungsfähigkeit durch adaptive Strömungsmodellierung*, 2011, ISBN 978-3-933761-95-8
- 192 Fritz, Jochen: *A Decoupled Model for Compositional Non-Isothermal Multiphase Flow in Porous Media and Multiphysics Approaches for Two-Phase Flow*, 2010, ISBN 978-3-933761-96-5
- 193 Weber, Karolin (Hrsg.): *12. Treffen junger WissenschaftlerInnen an Wasserbauinstituten*, 2010, ISBN 978-3-933761-97-2
- 194 Bliedernicht, Jan-Geert: *Probability Forecasts of Daily Areal Precipitation for Small River Basins*, 2011, ISBN 978-3-933761-98-9
- 195 Hrsg.: Koschitzky, Hans-Peter; Braun, Jürgen: *VEGAS-Kolloquium 2010 In-situ-Sanierung - Stand und Entwicklung Nano und ISCO -*, Tagungsband zur Veranstaltung am 07. Oktober 2010 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2010, ISBN 978-3-933761-99-6

- 196 Gafurov, Abror: *Water Balance Modeling Using Remote Sensing Information - Focus on Central Asia*, 2010, ISBN 978-3-942036-00-9
- 197 Mackenberg, Sylvia: *Die Quellstärke in der Sickerwasserprognose: Möglichkeiten und Grenzen von Labor- und Freilanduntersuchungen*, 2010, ISBN 978-3-942036-01-6
- 198 Singh, Shailesh Kumar: *Robust Parameter Estimation in Gauged and Ungauged Basins*, 2010, ISBN 978-3-942036-02-3
- 199 Doğan, Mehmet Onur: *Coupling of porous media flow with pipe flow*, 2011, ISBN 978-3-942036-03-0
- 200 Liu, Min: *Study of Topographic Effects on Hydrological Patterns and the Implication on Hydrological Modeling and Data Interpolation*, 2011, ISBN 978-3-942036-04-7
- 201 Geleta, Habtamu Itefa: *Watershed Sediment Yield Modeling for Data Scarce Areas*, 2011, ISBN 978-3-942036-05-4
- 202 Franke, Jörg: *Einfluss der Überwachung auf die Versagenswahrscheinlichkeit von Staustufen*, 2011, ISBN 978-3-942036-06-1
- 203 Bakimchandra, Oinam: *Integrated Fuzzy-GIS approach for assessing regional soil erosion risks*, 2011, ISBN 978-3-942036-07-8
- 204 Alam, Muhammad Mahboob: *Statistical Downscaling of Extremes of Precipitation in Mesoscale Catchments from Different RCMs and Their Effects on Local Hydrology*, 2011, ISBN 978-3-942036-08-5
- 205 Hrsg.: Koschitzky, Hans-Peter; Braun, Jürgen: *VEGAS-Kolloquium 2011 Flache Geothermie - Perspektiven und Risiken*, Tagungsband zur Veranstaltung am 06. Oktober 2011 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2011, ISBN 978-3-933761-09-2
- 206 Haslauer, Claus: *Analysis of Real-World Spatial Dependence of Subsurface Hydraulic Properties Using Copulas with a Focus on Solute Transport Behaviour*, 2011, ISBN 978-3-942036-10-8
- 207 Dung, Nguyen Viet: *Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models – development of the concept and an application in the Mekong Delta*, 2011, ISBN 978-3-942036-11-5
- 208 Hung, Nguyen Nghia: *Sediment dynamics in the floodplain of the Mekong Delta, Vietnam*, 2011, ISBN 978-3-942036-12-2
- 209 Kuhlmann, Anna: *Influence of soil structure and root water uptake on flow in the unsaturated zone*, 2012, ISBN 978-3-942036-13-9

- 210 Tuhtan, Jeffrey Andrew: *Including the Second Law Inequality in Aquatic Ecodynamics: A Modeling Approach for Alpine Rivers Impacted by Hydropeaking*, 2012, ISBN 978-3-942036-14-6
- 211 Tolossa, Habtamu: *Sediment Transport Computation Using a Data-Driven Adaptive Neuro-Fuzzy Modelling Approach*, 2012, ISBN 978-3-942036-15-3
- 212 Tatomir, Alexandru-Bodgan: *From Discrete to Continuum Concepts of Flow in Fractured Porous Media*, 2012, ISBN 978-3-942036-16-0
- 213 Erbertseder, Karin: *A Multi-Scale Model for Describing Cancer-Therapeutic Transport in the Human Lung*, 2012, ISBN 978-3-942036-17-7
- 214 Noack, Markus: *Modelling Approach for Interstitial Sediment Dynamics and Reproduction of Gravel Spawning Fish*, 2012, ISBN 978-3-942036-18-4
- 215 De Boer, Cjestmir Volkert: *Transport of Nano Sized Zero Valent Iron Colloids during Injection into the Subsurface*, 2012, ISBN 978-3-942036-19-1
- 216 Pfaff, Thomas: *Processing and Analysis of Weather Radar Data for Use in Hydrology*, 2013, ISBN 978-3-942036-20-7
- 217 Lebreuz, Hans-Henning: *Addressing the Input Uncertainty for Hydrological Modeling by a New Geostatistical Method*, 2013, ISBN 978-3-942036-21-4
- 218 Darcis, Melanie Yvonne: *Coupling Models of Different Complexity for the Simulation of CO₂ Storage in Deep Saline Aquifers*, 2013, ISBN 978-3-942036-22-1
- 219 Beck, Ferdinand: *Generation of Spatially Correlated Synthetic Rainfall Time Series in High Temporal Resolution - A Data Driven Approach*, 2013, ISBN 978-3-942036-23-8
- 220 Guthke, Philipp: *Non-multi-Gaussian spatial structures: Process-driven natural genesis, manifestation, modeling approaches, and influences on dependent processes*, 2013, ISBN 978-3-942036-24-5
- 221 Walter, Lena: *Uncertainty studies and risk assessment for CO₂ storage in geological formations*, 2013, ISBN 978-3-942036-25-2
- 222 Wolff, Markus: *Multi-scale modeling of two-phase flow in porous media including capillary pressure effects*, 2013, ISBN 978-3-942036-26-9
- 223 Mosthaf, Klaus Roland: *Modeling and analysis of coupled porous-medium and free flow with application to evaporation processes*, 2014, ISBN 978-3-942036-27-6
- 224 Leube, Philipp Christoph: *Methods for Physically-Based Model Reduction in Time: Analysis, Comparison of Methods and Application*, 2013, ISBN 978-3-942036-28-3
- 225 Rodríguez Fernández, Jhan Ignacio: *High Order Interactions among environmental variables: Diagnostics and initial steps towards modeling*, 2013, ISBN 978-3-942036-29-0

- 226 Eder, Maria Magdalena: *Climate Sensitivity of a Large Lake*, 2013, ISBN 978-3-942036-30-6
- 227 Greiner, Philipp: *Alkoholinjektion zur In-situ-Sanierung von CKW Schadensherden in Grundwasserleitern: Charakterisierung der relevanten Prozesse auf unterschiedlichen Skalen*, 2014, ISBN 978-3-942036-31-3
- 228 Lauser, Andreas: *Theory and Numerical Applications of Compositional Multi-Phase Flow in Porous Media*, 2014, ISBN 978-3-942036-32-0
- 229 Enzenhöfer, Rainer: *Risk Quantification and Management in Water Production and Supply Systems*, 2014, ISBN 978-3-942036-33-7
- 230 Faigle, Benjamin: *Adaptive modelling of compositional multi-phase flow with capillary pressure*, 2014, ISBN 978-3-942036-34-4
- 231 Oladyschkin, Sergey: *Efficient modeling of environmental systems in the face of complexity and uncertainty*, 2014, ISBN 978-3-942036-35-1
- 232 Sugimoto, Takayuki: *Copula based Stochastic Analysis of Discharge Time Series*, 2014, ISBN 978-3-942036-36-8
- 233 Koch, Jonas: *Simulation, Identification and Characterization of Contaminant Source Architectures in the Subsurface*, 2014, ISBN 978-3-942036-37-5
- 234 Zhang, Jin: *Investigations on Urban River Regulation and Ecological Rehabilitation Measures, Case of Shenzhen in China*, 2014, ISBN 978-3-942036-38-2
- 235 Siebel, Rüdiger: *Experimentelle Untersuchungen zur hydrodynamischen Belastung und Standsicherheit von Deckwerken an überströmbaren Erddämmen*, 2014, ISBN 978-3-942036-39-9
- 236 Baber, Katherina: *Coupling free flow and flow in porous media in biological and technical applications: From a simple to a complex interface description*, 2014, ISBN 978-3-942036-40-5
- 237 Nuske, Klaus Philipp: *Beyond Local Equilibrium — Relaxing local equilibrium assumptions in multiphase flow in porous media*, 2014, ISBN 978-3-942036-41-2
- 238 Geiges, Andreas: *Efficient concepts for optimal experimental design in nonlinear environmental systems*, 2014, ISBN 978-3-942036-42-9
- 239 Schwenck, Nicolas: *An XFEM-Based Model for Fluid Flow in Fractured Porous Media*, 2014, ISBN 978-3-942036-43-6
- 240 Chamorro Chávez, Alejandro: *Stochastic and hydrological modelling for climate change prediction in the Lima region, Peru*, 2015, ISBN 978-3-942036-44-3
- 241 Yulizar: *Investigation of Changes in Hydro-Meteorological Time Series Using a Depth-Based Approach*, 2015, ISBN 978-3-942036-45-0

- 242 Kretschmer, Nicole: *Impacts of the existing water allocation scheme on the Limari watershed – Chile, an integrative approach*, 2015, ISBN 978-3-942036-46-7
- 243 Kramer, Matthias: *Luftbedarf von Freistrahlturbinen im Gegendruckbetrieb*, 2015 ISBN 978-3-942036-47-4
- 244 Hommel, Johannes: *Modeling biogeochemical and mass transport processes in the subsurface: Investigation of microbially induced calcite precipitation*, 2016 ISBN 978-3-942036-48-1
- 245 Germer, Kai: *Wasserinfiltration in die ungesättigte Zone eines makroporösen Hanges und deren Einfluss auf die Hangstabilität*, 2016 ISBN 978-3-942036-49-8

Die Mitteilungshefte ab der Nr. 134 (Jg. 2005) stehen als pdf-Datei über die Homepage des Instituts: www.iws.uni-stuttgart.de zur Verfügung.