



AUFGABENSTELLUNG FÜR DIE DIPLOMARBEIT

IN DER FACHRICHTUNG: Hydrologie / Wasserbewirtschaftung

NAME DES DIPLOMANDEN: Marc Walther

THEMA: Untersuchung von Wasserfluss und Stofftransport im Übergangsbereich zwischen gesättigter und ungesättigter Zone im Labor- und Feldmaßstab am Beispiel der SUIR-Beprobungsvorrichtung in Wagna, Österreich

ZIELSETZUNG:

Der Übergangsbereich zwischen vadoser Zone und Aquifer (Saturated-Unsaturated Interface Region – SUIR) hat für die Beurteilung einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung eine deutlich größere Bedeutung als bisher in der Literatur angenommen. Der Wasserfluss und der Stofftransport werden aktuell mit einer innovativen Anlage zur tiefendifferenzierten Boden- und Grundwasserbeprobung auf einem Testfeld in Wagna/Steiermark (Österreich) näher untersucht. Die bisher mit der neuen Probenahmetechnik ermittelten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die untersuchten Bereiche stark durch dynamische Prozesse geprägt sind, welche die Sonderstellung des SUIR unterstreichen.

Das Ziel der Diplomarbeit besteht darin, die Funktionsweise der Beprobungsanlage zu untersuchen. Dabei ist zu analysieren, ob die Messanlage im derzeitigen Ausbau den konzeptionellen Vorstellungen zur Beprobung der SUIR entspricht. Mögliche Fehlerquellen sollen identifiziert und Lösungsvorschläge sowie Adaptionen zur alternativen Verwendung der Anlage erarbeitet werden.

AUFGABENSTELLUNG:

Im Rahmen der Diplomarbeit soll die Beprobungsanlage im Bereich des SUIR näher untersucht werden. Dazu sollen die bisherigen Untersuchungen ausgewertet werden. Darüberhinaus ist mit Hilfe von Laborversuchen die Probenahmetechnik auf Laborebene zu validieren. Feldmessvorrichtung sowie Laborexperiment sind mit Hilfe eines geeigneten Modells durch Simulationen abzubilden.

ARBEITSPUNKTE:

- 1) Der aktuelle Stand der Forschung in Bezug auf tiefenorientierte Probenahme im Bereich ungesättigte – gesättigte Zone ist zu dokumentieren und festzuhalten. Wenn vorhanden, sind die mit dem Saugkerzenbaum der Station Wagna vergleichbare Anlagen beispielhaft darzustellen und zu bewerten.



- 2) Der lokale Anstrom des am Feldstandort Wagna vorhandenen Saugkerzenbaums soll mit Hilfe eines numerischen Modells (HYDRUS) durch eine 3D-Simulation einzelner Saugkerzen detailliert untersucht werden.

Dabei ist die Untersuchung durch geeignete Modellansätze auf den entscheidenden Übergangsbereich (ungesättigte Zone, Kapillarsaum, gesättigte Zone im Bereich der Grundwasseroberfläche) zu beschränken.

Die Ergebnisse sind auf Basis des Strömungsfeldes am Feldstandort Wagna, hinsichtlich des Ursprungs der Proben auszuwerten.

- 3) Zur weiteren Validierung soll die Messeinrichtung im Labormaßstab nachgebildet werden. Dazu sind die Saugkerzen in ein Gerinne (50 x 30 x 10 cm³) zu überführen. Folgende Teilaufgaben sind zu bearbeiten:

- Auswahl geeigneter Markierungsstoffe (Nachweis optisch und mit Hilfe der vorhandenen Laborausstattung des Instituts für Grundwasserwirtschaft)
- Einbau des Lockersediments in zwei geeigneten Varianten (homogener und heterogener Untergrund)
- Auswahl eines geeigneten zeitlichen Versuchsablaufs mit variierenden Randbedingungen, um instationäre Verhältnisse nachzubilden
- Durchführung und Auswertung der Versuche

- 4) Die durchgeführten Laborexperimente sind mit Hilfe eines geeigneten Ansatzes numerisch nachzubilden (Software HYDRUS).

- 5) Auf Basis der Literaturrecherche, der Untersuchungen im Labor und Feld sowie der Ergebnisse der numerischen Simulationen soll die bestehende Anlage bewertet werden. Darüber hinaus sind mögliche Modifikationen sowie alternative Anwendungsmöglichkeiten der entwickelten Anlage zu erarbeiten.

- 6) Die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit sind auf einem Poster darzustellen.

Ausgehändigt am:	3. Juni 2008
Präsentation Zwischenstand:	Anfang September 2008
Einzureichen am:	3. November 2008
Betreuer:	Univ. Doz. Dr. Johann Fank (Joanneum Research Graz) Prof. Dr. Rudolf Liedl (TU Dresden, IGW) Dipl.-Ing. Thomas Reimann (TU Dresden, IGW) Prof. Dr. G. Schmitz (TU Dresden, IHM)

Verantwortlicher Betreuer
Joanneum Research Graz

Verantwortlicher Hochschullehrer

.....
Univ. Doz. Dr. Johann Fank Prof. Dr. Rudolf Liedl Prof. Dr. G. Schmitz

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

FAKULTÄT FÜR FORST-, GEO- UND HYDROWISSENSCHAFTEN

INSTITUT FÜR GRUNDWASSERWIRTSCHAFT

Untersuchung von Wasserfluss und Stofftransport im Übergangsbereich
zwischen gesättigter und ungesättigter Zone im Labor- und Feldmaßstab
am Beispiel der SUIR-Beprobungsvorrichtung in Wagna, Österreich

Freie wissenschaftliche Arbeit

zur Erlangung des Grades

Diplom-Hydrologe

Dresden, 03. November 2008

Verantwortlicher Hochschullehrer:

Prof. Dr. Rudolf Liedl (TU Dresden)

Prof. Dr. Gerd Schmitz (TU Dresden)

Betreuer:

Univ.-Doz. Dr. Johann Fank (JOANNEUM RESEARCH, Graz)

Dipl.-Ing. Thomas Reimann (TU Dresden)

Bearbeiter:

Marc Walther

Hydrologie 2002-07

Matr.-Nr. 29 24 575

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form weder einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt, noch wurde sie veröffentlicht. Ich bin mir bewusst, dass eine unwahre Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Dresden, den 03. November

Marc Walther

Thesen

- 1) Der Übergangsbereich von der ungesättigten zur gesättigten Zone hat für Stofftransport und Stoffumsatzprozesse sowie biologische und (bio-)chemische Vorgänge eine größere Bedeutung, als bisher im Großteil der Fachliteratur angenommen.
- 2) Eine Störung der Ausprägung des Kapillarsaums aufgrund von Veränderungen im Kornspektrum des Aquifers oder dem Aufbau des Bodenkörpers verändert die Verteilung und den Transportweg eines ober- oder innerhalb des Kapillarsaum transportierten Stoffes.
- 3) Mit der tiefengestaffelten Probenahmeverrichtung, wie sie im Testfeld Wagna installiert ist, kann eine detailliert horizontspezifische Probenahme im ungesättigten Bereich, in der SUIR und der gesättigten Zone durchgeführt werden.
- 4) Bei der Probenahme mit der derzeitigen Anlagenform inklusive Filterkies kommt es zu einer erheblichen Störung der hydraulischen Verhältnisse im Bereich des wiederverfüllten, gesiebten Materials.
- 5) Nach einer Modifikation der bestehenden Anlage ist es möglich, die durch die Probenahme entstehende Veränderung der hydraulischen Verhältnisse im nahen Umfeld der Probenahmeverrichtung signifikant zu reduzieren sowie den vertikalen Umfang der Probenahme den lokalen Gegebenheiten des Aquifers anzupassen.
- 6) In der Literatur ist kein Instrument zur tiefenspezifischen Probenahme dokumentiert, welches, bei gleicher oder ähnlicher Einbauweise, eine so detaillierte Beprobung der ungesättigten Zone, der SUIR und des gesättigten Bereiches erlaubt, wie es mit der in Wagna errichteten Anlage möglich ist.
- 7) Eine Implementierung der in Wagna installierten Anlage in die Laborumgebung ist als Grundlage für Laborexperimente zur Nachbildung der Feldsituation möglich.
- 8) Mit Hilfe eines numerischen Modells können sowohl die Feldanlage als auch die Laborexperimente in ausreichendem Detailgrad für hydraulische Untersuchungen modelliert werden. Mit den Modelluntersuchungen ist es möglich, das Einzugsgebiet der jeweiligen Saugkerzen zu bestimmen.

Zusammenfassung – Abstract

Eine vertikal hochaufgelöste Probenahme im Übergangsbereich zwischen gesättigter und ungesättigter Zone (SUIR) ist zu deren detaillierter Erkundung, dem Prozessstudium biologischer und chemischer Stoffumsatzvorgänge oder der Identifikation des hydraulischen Fließverhaltens und des Stofftransports innerhalb der SUIR anzustreben. Auf dem Testfeld Wagna, Österreich, wurden im Herbst 2007 zwei neuartige Instrumente zur tiefenspezifischen Probenahme installiert; die Anlagen bestehen jeweils aus mehreren, untereinander angeordneten Saugkerzen, mit welchen eine Beprobung des gesamten Bereiches der gesättigten Zone, der SUIR und der ungesättigten Zone ermöglicht werden soll. Um die Funktionsweise der Anlage zu überprüfen, wurden das Prinzip dieser Saugkerzenbäume (SKB) in die Laborumgebung überführt und mit einem künstlichen Gerinne Experimente zum Stofftransport in der SUIR durchgeführt sowie die Möglichkeit der Probenahme mit dem SKB evaluiert. Zusätzlich sind sowohl die Feldanlage als auch das künstliche Laborgerinne (inkl. SKB) in ein numerisches Modell zur Lösung der ungesättigten und gesättigten Grundwasserströmungsgleichung implementiert worden, um das lokale Umfeld während der Probenahme auf die Veränderung der hydraulischen Verhältnisse und das Einzugsgebiet der in den unterschiedlichen Höhengniveaus situierten Saugkerzen zu untersuchen. Anhand der numerischen Modellierung war es möglich, Fehlerquellen der bestehenden Anlage zu identifizieren und Verbesserungsvorschläge für eine modifizierte Anlage sowie alternative Einsatzmöglichkeiten abzuleiten. Es konnte gezeigt werden, dass sich der SKB in jetziger Form zur tiefendifferenzierten Probenahme im gesättigten Bereich und mit geringen Einschränkungen in der SUIR und dem ungesättigten Bereich eignet. Die durchgeführten Laborexperimente bestätigten sowohl die Relevanz als auch die Möglichkeit der horizontspezifischen Probenahme mit einer solchen Anlage innerhalb der SUIR in Verbindung mit Transportvorgängen. Ferner verwiesen die Experimente erneut auf die Diskrepanz zwischen der bisherigen, noch weit verbreiteten Vorstellung und des tatsächlich zu beobachtenden Migrationsverhaltens eines aus der ungesättigten Zone perkolierenden (Schad-)Stoffes.

For a detailed investigation of the saturated-unsaturated-interface-region (SUIR), as well as the study of biological and chemical processes or the identification of hydraulic flow paths and mass transport a vertically high resolution sampling is necessary. In autumn 2007, two innovative instruments for depth specific sample drawing were installed at the testing field in Wagna, Austria; the multi-layer-sampling devices (SKB - "Saugkerzenbaum") are equipped each with several suction cups arranged one below the other for the purpose of achieving samples from the whole extend of the aquifer, i.e. the saturated zone, the SUIR and the unsaturated zone. To verify the function of the sampling system tracer experiments were conducted within the SUIR implementing the SKB's working principle into an artificial tank. Furthermore, the experiments and the testing field including the device were transferred into a numerical model solving the unsaturated and saturated groundwater flow equation to analyze the influence of the sampling process on the soil's hydraulic properties and the catchment area of the specific suction cups. It was possible to locate the existing device's sources of error and to derive ideas for improvement, modifications and different potential fields of application. It could also be shown, that the present tool can be used for a multi-level sampling in the saturated zone and with some constraint in the unsaturated zone. The experiments confirmed both the importance of the SUIR for the solute transport and the necessity of such a multi-level sampling device.

Inhaltsverzeichnis

Thesen	II
Zusammenfassung – Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungen	VII
Tabellen	XI
Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Probenahme im Übergangsbereich ungesättigte-gesättigte Zone.....	1
1.1 Der Übergangsbereich gesättigte-ungesättigte Zone – SUIR	1
1.2 Monitoring und Beprobung eines Systems.....	3
1.2.1 Behördliche Vorschriften zur Probenahme im Aquifer.....	3
1.2.2 Stofftransport im Kapillarsaum und der SUIR – Die Relevanz einer tiefenspezifischen Probenahme in der SUIR.....	5
1.3 Anlagen zur tiefengestaffelten Probenahme.....	5
1.3.1 Großräumige Untersuchungen auf Feldskala.....	5
1.3.2 Kleinräumige Experimente	8
1.3.3 Andere Probenahmemethoden	10
1.3.4 Instrumente zur Beprobung des gesamten Bereiches der ungesättigten und gesättigten Zone, inklusive der SUIR.....	11
1.4 Das Testfeld Wagna in der Südsteiermark, Österreich, und die tiefengestaffelte Probenahme mit dem Saugkerzenbaum	11
2 Laborexperimente zur Nachbildung des Saugkerzenbaums.....	13
2.1 Verwendete Materialien	13
2.1.1 Laborsand.....	13
2.1.2 Glasperlen	14
2.1.3 Geräte und Software	15
2.1.4 Ermittlung des k_f -Wertes der Saugkerzen SMS1	15
2.1.5 Photometrische Analyse des Tracers Brilliant Blue.....	18
2.1.6 Kurzversuch Wechselwirkung Kaliumbromid KBr und Brilliant Blue BB	19

2.2	Vorversuch	20
2.2.1	Ziel, Aufbau und Vorgehen.....	20
2.2.2	Ergebnisse des Vorversuchs	21
2.2.3	Erkenntnisse aus dem Vorversuch	23
2.3	Experiment 1	24
2.3.1	Ziel, Aufbau und Vorgehen.....	24
2.3.2	Ergebnisse des Experiment 1	25
2.3.3	Erkenntnisse aus Experiment 1	27
2.4	Experiment 2	28
2.4.1	Ziel, Aufbau und Vorgehen.....	28
2.4.2	Ergebnisse des Experiment 2B	29
2.4.3	Ergebnisse des Experiment 2A	31
2.4.4	Vergleich von Experiment 1 und Experiment 2A	33
2.4.5	Erkenntnisse aus den Experimenten 2A und 2B	35
2.5	Zusammenfassung der Laborexperimente	35
3	Simulationen mit einem numerischen Modell.....	36
3.1	Simulation der Gerinneexperimente	36
3.1.1	Motivation	36
3.1.2	Konzeptionelles und numerisches Modell	37
3.1.3	Ergebnisse der Simulation des Experiment 1	41
3.1.4	Ergebnisse der Simulation des Experiment 2.....	44
3.1.5	Zusammenfassung der Simulationen der Laborexperimente	45
3.2	Simulation des Saugkerzenbaums im Versuchsfeld Wagna	46
3.2.1	Motivation	46
3.2.2	Parametrisierung des Mualem-van-Genuchten-Modells.....	46
3.2.3	Konzeptionelles und numerisches Modell	50
3.2.4	Szenarios, Anfangs- und Randbedingungen.....	56
3.2.5	Bestimmung des Einzugsgebiets der Saugkerzen	62
3.2.6	Vergleich der Simulationen mit Feldmessungen	69
3.2.7	Simulationen ohne Filterkies.....	70

3.2.8	Zusammenfassung der Simulationen der Feldanlage	71
4	Eignung des Saugkerzenbaums als Instrument zur tiefengestaffelten Probenahme und alternative Einsatzmöglichkeiten.....	73
4.1	Erkenntnisse aus Laborexperimenten, Felddaten und zugehörigen Simulationen	73
4.2	Anpassungen und Modifikationen der tiefendifferenzierten Probeanlage sowie alternative Anwendungsmöglichkeiten	74
4.3	Ausblick – weiterer Forschungsbedarf mit einer tiefenspezifischen Probevorrichtung unter Beachtung des Stofftransports im Kapillarsaum.....	76
5	Anhang	A
	Literaturverzeichnis.....	A
	Struktur digitaler Anhang	E

Abbildungen

Abb. 1-1 Übergangsbereich gesättigte – ungesättigte Zone	1
Abb. 1-2 „Ort der Beurteilung“, „Handbuch Altlasten“, Hessen [2002]	3
Abb. 1-3 “Abstrombereich mit Verschmutzungsfahne bei idealisierten Verhältnissen“ aus: „Material zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz“, NRW [2003], S.61	4
Abb. 1-4 Mehrbrunnensystem verteuft in verschiedenen Niveaus, verändert nach [Graham, 2006]	6
Abb. 1-5 Mehrbrunnensystem verteuft in verschiedenen Grundwasserleitern, verändert nach [Griggs, et al., 2003]	6
Abb. 1-6 „Suction-type Multilevel Point-sampler“, verändert nach [Cherry, et al., 1983]	7
Abb. 1-7 „Packersystem“, verändert nach [Graham, 2006]	7
Abb. 1-8 „Multilevel-Sampler-fenceline“ nach [Ryan, et al., 2000]	8
Abb. 1-9 „Passive Multilayer-Sampler“ nach [Laor, et al., 2003]	9
Abb. 1-10 Kleinräumiges Probenahmeprofil mit hoher Sensorbestückung nach [Behera, et al., 2003]; Breite ca. 5m, TM – Tensiometer, SS – Saugkerze, PM – Piezometer	9
Abb. 1-11 „Auger-head suction sampler“ nach [Cherry, et al., 1983]; Maße unbekannt, Schätzung wenige Dezimeter	10
Abb. 1-12 “Vadose zone monitoring shaft” nach [Twardowska, 1995]	10
Abb. 1-13 Ausschnitt Spitze Saugkerzenbaum, Länge ca. 0.5m	10
Abb. 1-14 Grundwasserstand GWS und Nitratkonzentrationen NO_3 – in unterschiedlicher Beprobungstiefe	12
Abb. 1-15 Grundwasserstand GWS und Probevolumina PV in unterschiedlicher Beprobungstiefe	12
Abb. 2-1 Saugspannungs-Sättigungs-Kurve Modellsand und Glasperlen	13
Abb. 2-2 Kornsummenlinie Modellsand	14
Abb. 2-3 Experimentaufbau im Laborkeller des IGW	15
Abb. 2-4 Skizze Versuchsaufbau Bestimmung k_f -Werte Saugkerzen	16
Abb. 2-5 Volumen-Zeit-Ganglinie für Saugkerze 1, Versuchsnummer 1	17
Abb. 2-6 Zeitlicher Verlauf hydraulische Leitfähigkeit Saugkerze 1, Versuchsnummer 1	17
Abb. 2-7 Messpunkte und Eichbeziehung für Brilliant Blue für die drei Experimentaufbauten	19
Abb. 2-8 Skizze Aufbau Vorversuch	20
Abb. 2-9 Durchbruchskurve Brilliant Blue, Vorversuch	22
Abb. 2-10 Konstruktion „Saugkerzenbaum“ für Laborversuche	23
Abb. 2-11 Skizze Versuchsaufbau, Experiment 1	25
Abb. 2-12 Exp1, Tracerinjektion	26
Abb. 2-13 Exp1, Tracerverlauf 10min nach Injektion	26
Abb. 2-14 Exp1, Tracerverlauf 30min nach Injektion	26
Abb. 2-15 Exp1, Tracerverlauf 40min nach Injektion	26
Abb. 2-16 Exp1, Tracerverlauf 1h30min nach Injektion	26
Abb. 2-17 Exp1, Tracerverlauf 7h nach Injektion	26
Abb. 2-18 Durchbruchskurve Brilliant Blue in unterschiedlichen Tiefen, Experiment 1	27
Abb. 2-19 Skizze Aufbau Experiment 2	28
Abb. 2-20 Exp2B, Tracerinjektion	30

Abb. 2-21 Exp2B, Tracerverlauf 22min nach Injektion	30
Abb. 2-22 Exp2B, Tracerverlauf 40min nach Injektion	30
Abb. 2-23 Exp2B, Tracerverlauf 1h nach Injektion	30
Abb. 2-24 Exp2B, Tracerverlauf 1h15min nach Injektion	30
Abb. 2-25 Exp2B, Tracerverlauf 1h30min nach Injektion	30
Abb. 2-26 Durchbruchskurve KBr, Experiment 2B.....	31
Abb. 2-27 Exp2A, Tracerinjektion.....	32
Abb. 2-28 Exp2A, Tracerverlauf 12min nach Injektion	32
Abb. 2-29 Exp2A, Tracerverlauf 20min nach Injektion	32
Abb. 2-30 Exp2A, Tracerverlauf 35min nach Injektion	32
Abb. 2-31 Exp2A, Tracerverlauf 1h nach Injektion	32
Abb. 2-32 Exp2A, Tracerverlauf 5h nach Injektion	32
Abb. 2-33 Durchbruchskurve Brilliant Blue, Experiment 2A.....	33
Abb. 2-34 Vergleich Tracerbahnen; grün: Experiment 1 ohne Glasperlenfilter, rot: Experiment 2A mit Glasperlenfilter	33
Abb. 2-35 Vergleich Durchbruchskurven Brilliant Blue, Experiment 1 und Experiment 2A	34
Abb. 3-1 Konzeptionelles Modell, 2D	36
Abb. 3-2 Konzeptionelles Modell, Labor, Maße in [cm], Abbildung nicht maßstabgetreu	37
Abb. 3-3 Numerisches Modell, Labor, Ausschnitt Saugkerzenbaum Layer 13-16 (SK2, SK3); Höhe 3.5cm, Breite 2.5cm	38
Abb. 3-4 Numerisches Modell, Labor, 3D-Sicht; Länge 60cm, Höhe 30cm, Tiefe 10cm.....	38
Abb. 3-5 Saugspannungs-Sättigungs-Kurve für gewählte Mualem-van-Genuchten-Parameter, Simulation Labor	40
Abb. 3-6 Labor-"Saugkerzenbaum", Maße in [cm]; v.l.n.r.: Foto, konzeptionelles Modell, numerisches Modell	41
Abb. 3-7 Skala Matrixpotential [cm]	41
Abb. 3-8 Skala Sättigung [–]	41
Abb. 3-9 Skala Geschwindigkeit [cm · d – 1]	41
Abb. 3-10 Ruhezustand Simulation für Experiment 1, Rechter Modellrand: Fließvektoren (Skala Abb. 3-9), Sättigung (Skala Abb. 3-8); rote Senkrechte stellt Schnitt für Abb. 3-11 dar	42
Abb. 3-11 Fließgeschwindigkeit [cm · d – 1] und Sättigung [–] aufgetragen über Matrixpotential [cmWS], Experiment 1, Schnitt in Abb. 3-10.....	42
Abb. 3-12 Simulation Experiment 1, Detailausschnitt SK3 (Übergangsbereich Layer 9-10); Geschwindigkeitsvektoren (Skala Abb. 3-9), Matrixpotential (Skala Abb. 3-7)	43
Abb. 3-13 Simulation Exp1, Querschnitt in Fließrichtung durch SK3, Fließvektoren (Skala Abb. 3-9), Matrixpotential (Skala Abb. 3-7)	43
Abb. 3-14 Simulation Experiment 1, Detailausschnitt SK1 (Übergangsbereich Layer 5-6); Geschwindigkeitsvektoren (Skala Abb. 3-9), Matrixpotential (Skala Abb. 3-7)	44
Abb. 3-15 Ruhezustand Simulation für Experiment 2, rechter Modellrand; Fließvektoren (Skala Abb. 3-9), Sättigung (Skala Abb. 3-8)	44
Abb. 3-16 Simulation Experiment 2, Detailausschnitt SK1 (Übergangsbereich Layer 5-6); Geschwindigkeitsvektoren (Skala Abb. 3-9), Matrixpotential (Skala Abb. 3-7)	45
Abb. 3-17 Kornsummenlinie, Ergebnisse der Profilaufnahmen des Standortes Wagna Ost [2005]	46

Abb. 3-18 Saugspannungs-Sättigungs-Kurve, Bodenanalyse und Feldmessung Wagna sowie Umhüllende; Daten „Feld_180cm“ als Mittelwerte dargestellt (Zeitraum November 2004 bis August 2005)	47
Abb. 3-19 $\psi - k$ -Beziehung des Aquifermaterials Wagna aus Lysimeter- und Labormessungen.....	48
Abb. 3-20 Saugspannungs-Sättigungs-Kurve für gewählte Mualem-van-Genuchten-Parameter, Feldsimulation	49
Abb. 3-21 $\psi - k$ -Beziehung, Annahmen Feldsimulation	50
Abb. 3-22 Konzeptionelles Modell, Feld; Maße in [cm], Abbildung nicht maßstabgetreu	51
Abb. 3-23 Übersicht SK20 (v.l.n.r.): Foto Spitze SKB (Georg v. Unold, Fa. UMS München), Skizze Aufbau SK20 (verändert, aus [UMS GmbH München, 2008]), Konzeptionelles Modell SK20, Numerische Realisierung SK20; Maße in [cm].....	51
Abb. 3-24 Seitenansicht Layer inkl. SKB	52
Abb. 3-25 Durchfluss-Saugspannungs-Beziehung in Abhängigkeit unterschiedlicher k_f , SK20-Werte	54
Abb. 3-26 Numerisches Modell, Feld, Draufsicht Bereich Saugkerzenbaum, Darstellung ca. 40x30cm ²	55
Abb. 3-27 Numerisches Modell, Feld, 3D-Darstellung; Länge 400cm, Höhe 207cm, Tiefe 100cm	55
Abb. 3-28 Idealer Anstrombereich Grundwasser-Multi-layer-sampler im Pumpbetrieb; aus [Graham, 2006], figure 6, S. 6...56	56
Abb. 3-29 Skala Geschwindigkeit [cm · d – 1]	58
Abb. 3-30 Skala Matrixpotential [cmWS]	58
Abb. 3-31 Grundwasserströmung (Skala Abb. 3-29) und Matrixpotential (Skala Abb. 3-30) Szenario T-H, rechte Modellkante; dargestellt sind die letzten 150cm vor Auslauf.....	58
Abb. 3-32 Matrixpotential (linke Ordinate) und Sättigung (rechte Ordinate) in 175cm oberhalb GWS, 2D-Modell, Material 1 (Boden „lower“).....	60
Abb. 3-33 Matrixpotential (linke Ordinate) und Sättigung (rechte Ordinate) in 175cm oberhalb GWS, 2D-Modell, Material 2 (Boden, gesiebt).....	60
Abb. 3-34 Skala Pressure Head in [cmWS] zu Abb. 3-35 bis Abb. 3-38	61
Abb. 3-35 t=0d.....	61
Abb. 3-36 t=10d.....	61
Abb. 3-37 t=20d.....	61
Abb. 3-38 t=30d.....	61
Abb. 3-39 Fließvektoren (Skala Abb. 3-41) und Sättigung (Skala Abb. 3-42), Ruhezustand, Szenario T-N	61
Abb. 3-40 Fließvektoren (Skala Abb. 3-41) und Sättigung (Skala Abb. 3-42), Ruhezustand, Szenario F-H	61
Abb. 3-41 Skala Geschwindigkeit [cm · d – 1]	61
Abb. 3-42 Skala Sättigung [–]	61
Abb. 3-43 Sättigung und Geschwindigkeit über Matrixpotential, Ruhezustand, Szenario T-H	62
Abb. 3-44 Höhe des zylindrischen Einzugsgebiets hZ mit zunehmendem Radius rZ	63
Abb. 3-45 Skala Sättigung [–]	65
Abb. 3-46 Skala Matrixpotential [cmWS]	65
Abb. 3-47 Skala Geschwindigkeit [cm · d – 1]	65
Abb. 3-48 Geschwindigkeit vs. Abstand zur Saugkerze, simulierte und berechnete Werte; oberer, ungesättigter Bereich, Szenario T-N.....	65
Abb. 3-49 Geschwindigkeit vs. Abstand zur Saugkerze, simulierte und berechnete Werte; unterer, ungesättigter Bereich, Szenario T-N.....	65

Abb. 3-50 Einzugsgebiet SK1, SK2; Fließvektoren (Skala Abb. 3-47), Matrixpotential (Skala Abb. 3-46); Szenario T-N	66
Abb. 3-51 Einzugsgebiet SK4, SK5; Fließvektoren (Skala Abb. 3-47), Matrixpotential (Skala Abb. 3-46); Szenario T-N	66
Abb. 3-52 Einzugsgebiet SK7, SK8; Fließvektoren (Skala Abb. 3-47), Matrixpotential (Skala Abb. 3-46); Szenario T-N	66
Abb. 3-53 Einzugsgebiet SK1, SK2; Fließvektoren (Skala Abb. 3-47), Matrixpotential (Skala Abb. 3-46); Szenario F-N	66
Abb. 3-54 Einzugsgebiet SK4, SK5; Fließvektoren (Skala Abb. 3-47), Matrixpotential (Skala Abb. 3-46); Szenario F-N	66
Abb. 3-55 Einzugsgebiet SK7, SK8; Fließvektoren (Skala Abb. 3-47), Matrixpotential (Skala Abb. 3-46); Szenario F-N	66
Abb. 3-56 Vertikalschnitt, Sättigung (Skala Abb. 3-45) als Füllung, Matrixpotential (Skala Abb. 3-46) als Zellbegrenzung	67
Abb. 3-57 Skala Geschwindigkeit [$cm \cdot d - 1$]	67
Abb. 3-58 Fließfeld im Bereich Kapillarsaum (SK2 bis SK8); Fließvektoren (Skala Abb. 3-57), Sättigung (Skala Abb. 3-45) als Füllung, Matrixpotential als Zellbegrenzung (Skala Abb. 3-46); Szenario T-H.....	68
Abb. 3-59 Fließfeld im Bereich Grundwasser (SK8 bis SK12); Fließvektoren (Skala Abb. 3-57), Sättigung (Skala Abb. 3-45) als Füllung, Matrixpotential als Zellbegrenzung (Skala Abb. 3-46); Szenario T-H.....	68
Abb. 3-60 Fließfeld im Bereich Kapillarsaum (SK3 bis SK7); 3D-Ansicht in Fließrichtung; Fließvektoren (Skala Abb. 3-57), Sättigung als Zellbegrenzung (Skala Abb. 3-45); Szenario T-H	68
Abb. 3-61 Fließfeld im Bereich Grundwasser (SK9 bis SK12); 3D-Ansicht in Fließrichtung; Fließvektoren (Skala Abb. 3-57), Sättigung als Zellbegrenzung (Skala Abb. 3-45); Szenario T-H	68
Abb. 3-62 Vergleich Entnahmemengen (Probenvolumen PV) pro Saugkerze und Tag, Szenario T-H; SK1 bis SK4 auf linker Ordinate, SK8 und SK12 auf rechter Ordinate aufgetragen	69
Abb. 3-63 Tiefenspezifisches Probenvolumen PV, Vergleich Simulationswerte und Feldmessungen.....	70
Abb. 3-64 Fließfeld im Bereich Kapillarsaum (SK8 bis SK12); Fließvektoren (Skala Abb. 3-57), Sättigung (Skala Abb. 3-45) als Füllung, Matrixpotential als Zellbegrenzung (Skala Abb. 3-46); Szenario F-N ohne Filterkies	71
Abb. 3-65 Fließfeld im Bereich Kapillarsaum (SK2 bis SK6); Fließvektoren (Skala Abb. 3-57), Sättigung (Skala Abb. 3-45) als Füllung, Matrixpotential als Zellbegrenzung (Skala Abb. 3-46); Szenario T-H ohne Filterkies	71
Abb. 4-1 Querschnitt Modellkonzept verschalte, tiefendiff. Probeanlage	75
Abb. 4-2 Modellkonzept tiefendiff. Probeanlage mit Saugplatten	75
Abb. 4-3 Skala Konzentration [$mmol \cdot cm^3$]	77
Abb. 4-4 Durchbruchkurven Stofftransportsimulation	77
Abb. 4-5 Konzentrationsverlauf (Skala Abb. 4-3) als Zellfüllung, Geschwindigkeitsvektoren (Skala Abb. 3-9) und Sättigung (Skala Abb. 3-8) als Zellbegrenzung für Experiment 1 ohne Glasperlenfilter; rechter Gerinnerand, zwei Stunden nach Tracerinjektion; gepunktete Linie entspricht Kapillarsaum, gestrichene Linie entspricht Grundwasserspiegel.....	78
Abb. 4-6 Konzentrationsverlauf (Skala Abb. 4-3) als Zellfüllung, Geschwindigkeitsvektoren (Skala Abb. 3-9) und Sättigung (Skala Abb. 3-8) als Zellbegrenzung für Experiment 2A mit Glasperlenfilter; rechter Gerinnerand, zwei Stunden nach Tracerinjektion; gepunktete Linie entspricht Kapillarsaum, gestrichene Linie entspricht Grundwasserspiegel.....	78

Tabellen

Tab. 2-1 Mualem-van-Genuchten-Parameter Modellsand	14
Tab. 2-2 Hydraulische Parameter Modellsand	14
Tab. 2-3 Hydraulische Parameter Glasperlen	14
Tab. 2-4 Hydraulische Leitfähigkeit der Saugkerzen (in $m \cdot s^{-1}$)	17
Tab. 2-5 Analyseergebnis Wechselwirkung Kaliumbromid und Brilliant Blue	19
Tab. 2-6 Übersicht Parameter Modellsand, Vorversuch	21
Tab. 2-7 Übersicht Parameter Modellsand, Experiment 1	25
Tab. 2-8 Übersicht Parameter Modellsand und Glasperlen, Experiment 2A und 2B.....	29
Tab. 3-1 Übersicht Ermittlung Mualem-van-Genuchten-Parameter, Laborsimulation	38
Tab. 3-2 Vertikale Unterteilung numerisches Modell, Labor.....	39
Tab. 3-3 Übersicht Mualem-van-Genuchten-Parameter, Laborsimulation	40
Tab. 3-4 Übersicht Mualem-van-Genuchten-Parameter, Feld	49
Tab. 3-5 Unterteilung Layer, numerisches Modell, Feld.....	52
Tab. 3-6 Mesh-Eigenschaften, Feld	56
Tab. 5-1 Struktur digitaler Anhang	E

Abkürzungsverzeichnis

A	Durchflossener Querschnitt
A_{Kuppe}	Oberfläche Kuppe der Saugkerze
A_{Mantel}	Mantelfläche der Saugkerze
$A_{SK,M}$	Aktive Oberfläche der Saugkerze bei Pumpvorgang im Modell
A_Z	Oberfläche des zylindrischen Einzugsgebiets
$A_{Z,Kuppe}$	Oberfläche der Kuppe des zylindrischen Einzugsgebiets
$A_{Z,Mantel}$	Oberfläche des Mantels des zylindrischen Einzugsgebiets
Anschl	Anschlüsse, Verbindungen und Schläuche
b	Freier Formparameter der Höhe des Einzugsgebiets
b_G	Gerinnebreite (0.1m)
BB	Brilliant Blue
c	Maximale Höhe des Ausbreitungszyinders
c_{BB}	Konzentration Brilliant Blue
d	Durchmesser
d_{10}	Korngröße nach 10% Siebdurchgang
d_{60}	Korngröße nach 60% Siebdurchgang
$d_{i,n}$	Durchmesser der Komponente i , mit n für außen bzw. innen
d_{Glas}	Mittlerer Durchmesser der Glasperlen
$d_{Wand,SK}$	Wandstärke der Saugkerze
dh	Druckverlusthöhe
dx	Fließstrecke
E	Extinktion, Ausgabewert Photometer
Exp0	Vorversuch
Exp1	Experiment/Versuch 1

Exp2	Experiment/Versuch 2 (2A und 2B)
GOK	Geländeoberkante
GW	Grundwasser
GWS	Grundwasserspiegel
GWSB	Grundwasserschwankungsbereich
$h_{c,vis}$	Höhe Kapillarsaum, visuelle Abschätzung
$h_{c,Bear}$	Höhe Kapillarsaum nach [Bear, 1988]
$h_{c,Glas}$	Höhe Kapillarsaum Glasperlen, visuelle Abschätzung
$h_{c,Sand}$	Höhe Kapillarsaum Sand, visuelle Abschätzung
h_{diff}	Höhendifferenz
h_z	Höhe des zylindrischen Einzugsgebiets
$h_{Einstau}$	Einstauhöhe im Gerinne
h_{SK}	Höhe der Saugkerze
$h_{SK,M}$	Höhe der Saugkerze im numerischen Modell
i	Gefälle
i	„Pore-connectivity“ der Mualem-van-Genuchten-Funktion
i_0, i_n	Photometerinterne Extinktionsvariable, Blindprobe bzw. Probe n
IGW	Institut für Grundwasserwirtschaft, Technische Universität Dresden
k_f	Hydraulische Leitfähigkeit
$k_{f,SK20}$	Hydraulische Leitfähigkeit der Saugkerzen SK20
k_{Hazen}	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit nach [Hazen, 1893]
k_s	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit
$k_{s,h}$	Gesättigte horizontale hydraulische Leitfähigkeit
$k_{s,v}$	Gesättigte vertikale hydraulische Leitfähigkeit
k_u	Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit

$k(\psi)$	Hydraulische Leitfähigkeit bei Matrixpotential ψ
KS	Kapillarsaum
l_i	Länge der Komponente i
l_G	Gerinnelänge (0.5m)
m_{MvG}	Beiwert der Mualem-van-Genuchten-Funktion
$m_{Sand, Einbau}$	Bei Einbau verwendete Masse Sand
n	Porosität
n_{eff}	Effektive Porosität
n_{Glas}	Porosität Glasperlen
n_{MvG}	Beiwert der Mualem-van-Genuchten-Funktion
n_{Sand}	Porosität Sand
p	Druck
pF	Negativer dekadischer Logarithmus des Matrixpotentials
PV	Probevolumen
Q	Durchfluss
q_s	Spezifischer Durchfluss
r_{SK}	Radius der Saugkerze
$r_{SK,M}$	Radius für $A_{SK,M}$
r_Z	Radius des zylindrischen Einzugsgebiets
SK	Saugkerze (tlw. als SK1 für Saugkerze 1 usw.)
SKB	Saugkerzenbaum
SUIR	Saturated-unsaturated-interface-region
TDR	time domain reflectometry
UMS München	UMS GmbH, Umweltanalytische Mess-Systeme, München
v	Geschwindigkeit

v_f	Filtergeschwindigkeit
v_D	Darcy-(Filter)-Geschwindigkeit
v_{SK}	Geschwindigkeit an $A_{SK,M}$
v_Z	Geschwindigkeit an A_Z
$V_{Auslauf}$	Auslaufvolumen nach Versuchsende
$V_{Sand, Einbau}$	Bei Einbau verfülltes Volumen Sand
$V_{tot,i}$	Totvolumen der Komponente i ($i = SK, Anschl, gesamt$)
VS	Vadose Zone
α	Beiwert der Mualem-van-Genuchten-Funktion
ρ_F	Feststoffdichte
ρ_{H_2O}	Dichte Wasser
ρ_L	Lagerungsdichte
θ	Sättigung / Wassergehalt
θ_r	Residualer Wassergehalt
θ_s	Sättigungswassergehalt mit $\theta_s = n$
$\theta_{(\psi)}$	Wassergehalt bei Matrixpotential ψ
ψ	Matrixpotential

Vorbemerkung

Alle Saugkerzen (SK) wurden jeweils von oben nach unten nummeriert; SK1 steht somit immer für die oberste Saugkerze, SK2 für die zweitoberste usw.

Der Begriff „hydraulische Leitfähigkeit“ bezieht sich immer auf das Medium Wasser.

*Die Fragen sind es,
aus denen das, was bleibt,
entsteht.*

Erich Kästner

1 PROBENAHE IM ÜBERGANGSBEREICH UNGESÄTTIGTE-GESÄTTIGTE ZONE

1.1 Der Übergangsbereich gesättigte-ungesättigte Zone – SUIR

Der Übergangsbereich von der vollständig gesättigten zur ungesättigten Zone wird als „saturated-unsaturated-interface-region“ (SUIR) bezeichnet (vgl. auch Abb. 1-1). Die untere Begrenzung der SUIR ist jenes Niveau, bei dem der gesamte Porenraum mit Wasser gefüllt ist; der Fluiddruck des Wassers entspricht dem Atmosphärendruck ($p = 0$) und der Wassergehalt θ dem Sättigungswassergehalt θ_s beziehungsweise der Porosität n ($\theta = \theta_s = n$). Dieser Punkt liegt meist unterhalb des Grundwasserspiegels, da im Gebiet des Grundwasserschwankungsbereiches (GWSB), z.B. bei einem Anstieg des Grundwasserspiegels, aufgrund der Hysterese der Sättigungs-Saugspannungs-Beziehung bei der Wiederauffeuchtung nicht der gesamte Porenraum unterhalb der Grundwasseroberfläche vollständig aufgesättigt wird und auch teilgesättigte Poren zu finden sind. Diese Lufteinschlüsse stellen zudem einen Widerstand bei der Wasserbewegung dar (die hydraulische Leitfähigkeit k_f des Wassers ist kleiner als die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit k_s) und vermindern die Fließgeschwindigkeit v im oberen Bereich des Grundwassers (GW).

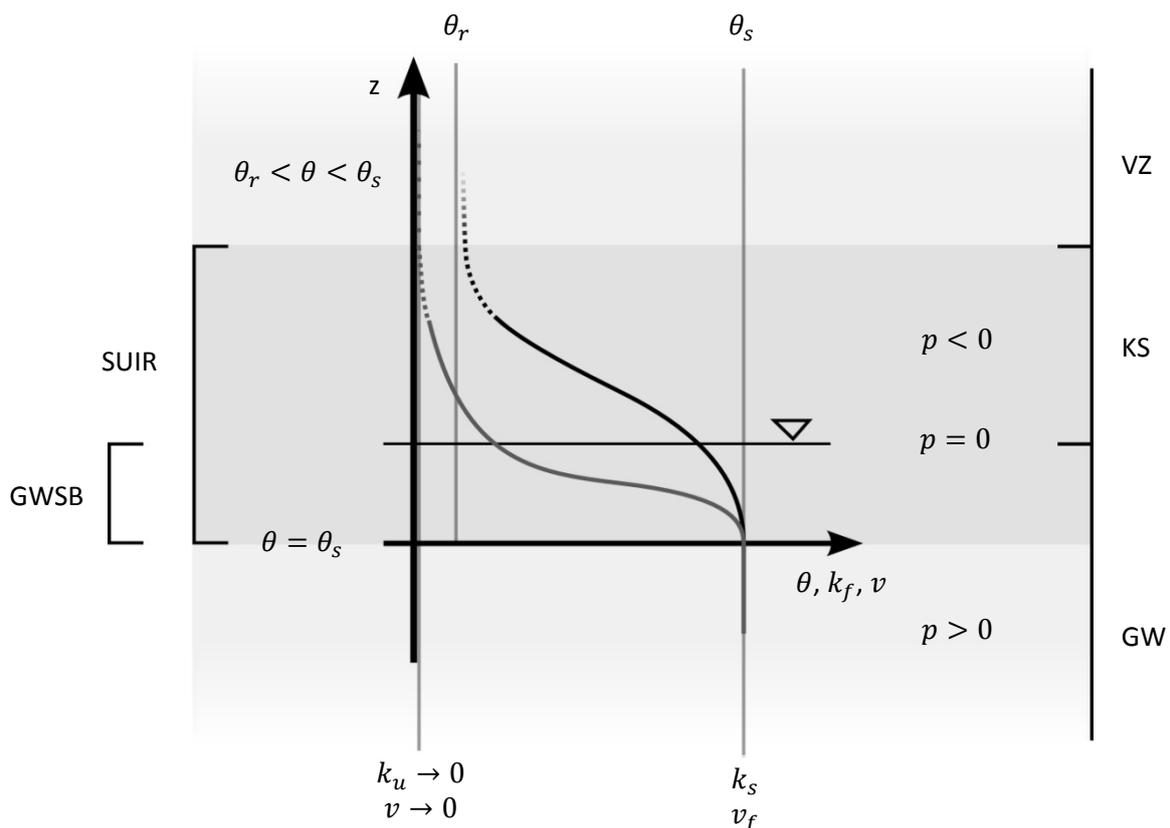


Abb. 1-1 Übergangsbereich gesättigte – ungesättigte Zone

Oberhalb des Grundwasserspiegels erstreckt sich die SUIR über den gesamten Bereich des Kapillarsaums (KS) bis in den Bereich der vadosen Zone (VZ) hinein, während sich die hydraulische Leitfähigkeit sowie die Fließgeschwindigkeit, einhergehend mit abnehmender Sättigung, weiter reduziert. Der Wasserdruck ist im KS geringer als der Atmosphärendruck ($p < 0$). Dabei wird die Obergrenze des KS (engl. „capillary fringe“) in der Literatur weit gefasst. Folglich kann die

Interpretation der Höhe des kapillaren Aufstiegs bei einem spezifischen Material je nach Auslegung des Begriffs variieren. Es sind präzise, physikalisch hinterlegte und mit entsprechenden Einrichtungen und Geräten messbare Parameterwerte, aber auch weniger explizite, teilweise stark subjektive Beschreibungen zur Abgrenzung des Kapillarsaums dokumentiert. Auszugsweise sollen an dieser Stelle einige Formulierungen angeführt werden; so wird der Kapillarsaum beschrieben als *“the interface between ground water and the unsaturated zone above it”* [Ronen, et al., 1997] oder als *“the zone of variable moisture above the water table”* [Nielsen, et al., 2000]. Weniger subjektive Formulierungen bestimmen den Bereich des Kapillarsaums als *“unsaturated zone above the water table characterized by the height at which water flow changed from a transient to a steady state”* [Hinz, 1998] oder *“as the region between the water table and the surface where the water content is nearly irreducible”* [Jellali, et al., 2003]. Außerdem existieren klar definierte Beschreibungen des Kapillarsaums als *„zone of tension saturation till the height of the air entry pressure”* [Gillham, 1984] oder als *“the zone of a vertical profile, with the water phase under negative pressure ($p < 0$), bounded, from below, by the water table, where $p = 0$, with a water content $\theta = \theta_s$ and bounded from above by the minimum height above the water table at which is $\theta = \theta_r$ ”* [Ronen, et al., 1997].

Oberhalb der Grenze des Kapillarsaums schließt die ungesättigte Zone (auch: vadose Zone, VZ) an. In diesem Bereich können, je nach Sickerwassermenge oder Evapotranspiration, unterschiedliche Sättigungswerte gemessen werden. Meist ist die Sättigung allerdings kleiner der Feldkapazität θ_{FC} , welche dem Wassergehalt entspricht, bei dem das vorhandene Porenwasser gegen die Schwerkraft gehalten werden kann. Bei hoher Pflanzenaktivität (Transpiration) oder starker Evaporation besteht die Möglichkeit, dass sich die Sättigung bis auf den permanenten Welkepunkt beziehungsweise den Residualwassergehalt θ_r verringert. Ist $\theta < \theta_s$, so ergibt sich aus den Gleichungen (1-1) und (1-2) nach [Mualem, 1976] und [Genuchten, 1980], welche sowohl die Saugspannungs-Sättigungs-Beziehung (pF -Kurve) als auch die ψ - k -Beziehung (Beziehung zwischen Matrixpotential ψ und hydraulischer Leitfähigkeit) beschreiben, eine ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit $k_u < k_s$. Dabei zeigen Messdaten, dass schon geringe Unterschiede des Matrixpotentials bzw. der Sättigung in großen Differenzen der hydraulischen Leitfähigkeit resultieren können (vgl. z.B. Abb. 3-19, S. 48).

$$\theta_{(\psi)} = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot \psi)^{n_{MvG}}]^m} & \psi < 0 \\ \theta_s & \psi \geq 0 \end{cases} \quad (1-1)$$

$$k_{(\psi)} = \frac{k_s \cdot [1 - (\alpha \cdot \psi)^{m_{MvG} \cdot n_{MvG}} \cdot (1 + (\alpha \cdot \psi)^{n_{MvG}})^{-m_{MvG}}]^2}{[1 + (\alpha \cdot \psi)^{n_{MvG}}]^{m_{MvG} \cdot i}} \quad (1-2)$$

mit α , n_{MvG} und $m_{MvG} = 1 - 1/n_{MvG}$ als empirische Parameter.

Die Vielzahl der Definitionen der Obergrenze des Kapillarsaums zeigt zum einen, dass das Gebiet der SUIR an sich schwer abzugrenzen und hoch variabel, und zum andern die Erforschung dieses stark fluktuierenden Bereiches kompliziert und noch nicht weit fortgeschritten ist. Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Definition der SUIR orientiert sich an der Beschreibung von [Hinz, 1998] als *„die Zone zwischen dem Bereich der vollständigen Sättigung der Poren ($\theta = \theta_s$) und dem Punkt, an welchem die hydraulische Leitfähigkeit (und damit die Fließgeschwindigkeit) in der ungesättigten Zone vernachlässigbar gering ist“* und trägt damit insbesondere der Relevanz des Stofftransports im Bereich der SUIR Rechnung.

1.2 Monitoring und Beprobung eines Systems

Um systeminterne Prozesse identifizieren und studieren oder systemspezifische (Stoff-)Parameter überwachen und bestimmen zu können, stellt die Beprobung des untersuchten Systems in ausreichendem Maß und Umfang eine grundlegende Aufgabe dar. Dabei steht die Maxime, das jeweilige System durch die Eingriffe bei der Beprobung möglichst geringen Störungen zu unterwerfen sowie die Messung repräsentativ für das gesamte System zu gestalten. Direkte Messmethoden, wie Brunnen, Aufschlüsse oder Bodenproben, sind grundsätzlich mit einer Störung des Systems verbunden, stellen allerdings für das regelmäßige Monitoring von Wasserinhaltsstoffen in Boden- und Grundwasser, zum Beispiel zur Sicherung von Trinkwasserressourcen oder bei der Überwachung von Schadensfällen, das Mittel der Wahl dar. Weiterhin gilt es, eine möglichst hohe Auflösung der Messungen zu erreichen – sowohl temporal, als auch spatial. Die zeitlich kontinuierliche Aufzeichnung von Messwerten in hoher Auflösung stellt dabei heutzutage kein Hindernis dar, jedoch ist die räumliche Auflösung, unabhängig von personellem, finanziellem und materiellem Aufwand, allein schon aufgrund der einhergehenden Störung des Systems im Detailgrad begrenzt.

1.2.1 Behördliche Vorschriften zur Probenahme im Aquifer

Die Probenahme zur Überwachung und Kontrolle des Grundwasserleiters im Bereich von Industriegebieten und Deponien, im Zuge von Schadensfällen oder bei anderen Gefährdungen des Grundwasserleiters ist in der Bundesrepublik Deutschland durch entsprechende gesetzliche Vorschriften geregelt, welche von den Ländern in sogenannten „Handbüchern“ oder „Materialien“ publiziert und interpretiert werden. So wird der durch die Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung (§ 4 Abs. 3 BBodSchV) festgelegte „Übergangsbereich von der

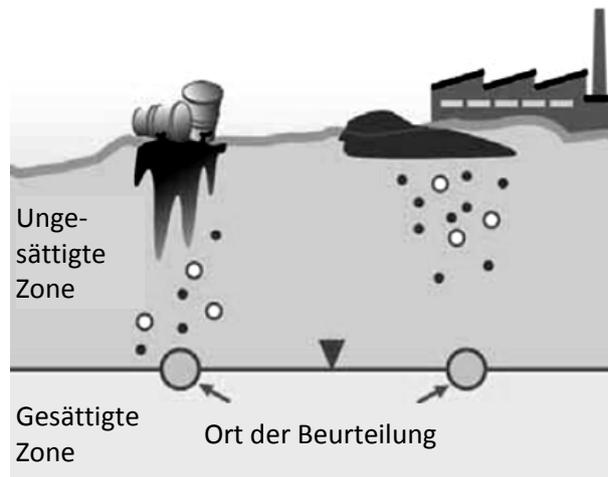


Abb. 1-2 „Ort der Beurteilung“, „Handbuch Altlasten“, Hessen [2002]

wasserungesättigten zur wassergesättigten Zone als Ort der Beurteilung“ im „Handbuch Altlasten“, Hessen [2002 S. 9 ff.] „[...] mit dem mittleren Grundwasserhöchststand gleichgesetzt“. Dabei werden „[...] Grundwasseruntersuchungen (als) eine bewährte Methode zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden–Grundwasser“ angesehen. Weiterhin kann „[...] bei ausreichender Erkundung des Grundwasseranstroms und -abstroms [...] die von der schädlichen Bodenveränderung insgesamt freigesetzte Schadstofffracht sowie die Konzentration des Sickerwassers am Ort der Beurteilung abgeschätzt werden“ (vgl. Abb. 1-2). Außerdem gelten „[...] Grundwasseruntersuchungen unter Berücksichtigung der Schadstoffkonzentrationen im Anstrom bzw. der Hintergrundwerte“ als Basis für eine Sickerwasserprognose und zur „Beurteilung, ob eine schädliche Bodenveränderung eine erhöhte Schadstoffkonzentration am Ort der Beurteilung bewirkt hat“. Ferner wird im „Handbuch Altlasten“, Hessen [2002], auf Seite 42 vermerkt, dass „das Wasser innerhalb des Kapillarraums [...] nicht der Grundwasserbewegung (folgt)“.

Laut dem „Material zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz“, Nordrhein-Westfalen [2003] „[...] kann der gegenwärtige Schadstoffeintrag in das Grundwasser auch durch Rückschlüsse oder Rückrechnungen aus Untersuchungen im Grundwasser abgeschätzt werden“ (vgl. dazu auch Abb. 1-3).

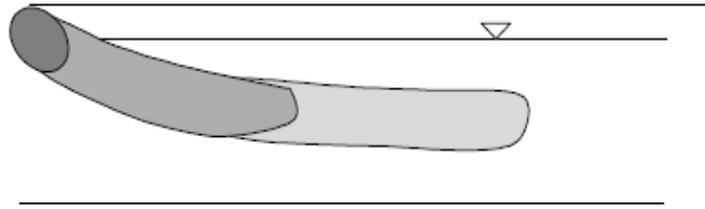


Abb. 1-3 „Abstrombereich mit Verschmutzungsfahne bei idealisierten Verhältnissen“ aus: „Material zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz“, NRW [2003], S.61

Vergleichbare Ausführungen und Anweisungen bezüglich des Ortes der Beurteilung und der Probenahme finden sich auch z.B. im „Material zur Altlastenbehandlung“, Sachsen [1998].

In der „Arbeitshilfe zur Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen des Landes Niedersachsen“ [2003] wird die Beprobung „der ungesättigten Zone im Bereich unterhalb der Schadstoffbelastung“ mit Hilfe von Saugkerzen, Drucksonden oder Feldlysimetern vorgeschlagen. Für eine „Abschätzung (der Schadstoffbelastung) am Ort der Beurteilung“, dem mittleren Grundwasserhöchststand, sei jedoch die „Schutzfunktion der ungesättigten Zone“ abzuschätzen.

Bei der Interpretation der Richtlinien zur Probenahme im Aquifer bietet sich großes Potential zur Diskussion und es ergeben sich folgende Fragen:

Der mittlere Grundwasserhöchststand ist ein statistischer Wert und ändert sich nach langjähriger Beobachtung (solange kein Regimewechsel erfolgt) nur noch geringfügig.

- Ist der „Ort der Probenahme“ (der mittlere Grundwasserhöchststand) von der Höhe des Grundwasserstandes abhängig?
- Wird die (Schad-)Stoffausbreitung als vom Grundwasserstand abhängig gesehen?
- Wie werden Dichteunterschiede zwischen Grundwasser und einem Stoff bei der Probenahme beachtet?

Die Probenahme am Ort der Beurteilung wird mit Hilfe von (teilweise) vollständig verteuften Filterbrunnen durchgeführt.

- Wie wird sichergestellt, dass ein innerhalb der SUIR transportierter Stoff mit einem Brunnen in voller Bandbreite erfasst wird?
- Wie kann die Schutzfunktion der ungesättigten Zone ohne Kenntnis des vorherrschenden Regimes oder einer nicht be-/erkannten Beeinflussung dieser Zone durch den (Schad-)Stoff abgeschätzt werden?
- Wie zuverlässig sind in diesem Zusammenhang die Schlussfolgerungen zur Ausgangskonzentration eines Stoffes basierend auf Untersuchungen im Grundwasser und einer Abschätzung jener Schutzfunktion?
- Wenn das Wasser innerhalb des Kapillarsaums nicht der Grundwasserbewegung folgt, mit welcher Wasserbewegung ist dann in diesem Bereich zu rechnen? Wie kann ein Stoff durch einen stillstehenden Wasserkörper transportiert werden (außer durch die langsame Stoffbewegung aufgrund von Diffusionsvorgängen)?

1.2.2 Stofftransport im Kapillarsaum und der SUIR – Die Relevanz einer tiefenspezifischen Probenahme in der SUIR

Im Gegensatz zu den Leitfäden der Landesämter bezüglich der Erfassung und Bewertung und den damit verbundenen Vorstellungen der Migration und Ausbreitung eines Schadstoffes zeigen verschiedene Untersuchungen konträre Ergebnisse und Schlussfolgerungen. Frühzeitig beschrieb [Lippok, 1966] in Modellversuchen mit Heizöl den Transport desselben oberhalb des Kapillarsaums. Neuere Erkenntnisse aus Experimenten mit Laborgerinnen von [Silliman, et al., 2002], [Dunn, et al., 2003], [Berkowitz, et al., 2004] oder [Dunn, et al., 2005], aus Felddaten von [Ronen, et al., 2005] oder [Abit, et al., 2008] sowie theoretische Ausführungen von z.B. [Ronen, et al., 1997] oder [Hinz, 1998] unterstreichen die Bedeutung der SUIR für den Stofftransport. Darüberhinaus ist zu vermuten, dass dieser teilgesättigte beziehungsweise durch Grundwasserschwankungen temporär unterschiedlich gesättigte Bereich oberhalb des Grundwasserspiegels eine entscheidende Rolle bei (bio)-chemischen Prozessen, zum Beispiel im Bezug auf den Nitratkreislauf, und biologischen Vorgängen – Stichwort „Biodegradation“, [Lahvis, et al., 1999] – spielt, allerdings einen in den meisten Modellen und Betrachtungen bisher vernachlässigten Bereich der Bodenzone darstellt. Überdies wird in bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht publizierten Ausführungen von [Stejskal, et al., 2003] bzw. [Stejskal, et al., k. A.] auf die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen der Probenahme durch Brunnen aus der gesättigten Zone gegenüber der Probenahme mit Hilfe von Saugkerzen in der ungesättigten Zone beziehungsweise dem Kapillarsaum hingewiesen. Ferner deutet die überschaubare Anzahl an verfügbaren Publikationen (siehe auch „Literatur“, Anhang, S. A) zum Thema auf den noch geringen Wissensstand und den Forschungsbedarf hin. Die Definition des „Ortes der Probenahme“ ist folglich dringend zu überdenken und auf Basis detaillierter, tiefenspezifischer Messungen neu zu definieren.

1.3 Anlagen zur tiefengestaffelten Probenahme

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick zu verschiedenen Lösungsansätzen für eine detaillierte, vertikale Beprobung des Boden- und/oder Grundwasserkörpers bzw. der Bereiche ungesättigte Zone, gesättigte Zone inklusive der SUIR und des Kapillarsaums. Dabei werden zwischen großräumigen Untersuchungen auf Feldskala und kleinräumigen Experimenten mit einer Ausdehnung über nur wenige Quadratmeter unterschieden.

1.3.1 Großräumige Untersuchungen auf Feldskala

Das Ziel dieser sich meist über ein Gebiet einiger hundert Quadratmeter bis Quadratkilometer erstreckenden Untersuchungen ist überwiegend die Beobachtung horizontaler Fließ- und Transportprozesse. Mit Hilfe künstlicher, in das Grundwasser über Schluckbrunnen eingebrachter oder direkt auf die Erdoberfläche applizierter Markierungsstoffe (Anionen, Farb- oder Fluoreszenzstoffe, dotierte oder radioaktive Substanzen usw.) stehen Dispersionsvorgänge, das Reinigungs-/Filtervermögen des Grundwasserkörpers zum Beispiel für Uferfiltrat (Ad-/Resorptionsvorgänge), Salz-Süßwasserinteraktion im Küstenbereich, Schadstofftransport von Industriegebieten und Deponiekörpern bei Gefährdung von Grundwassergewinnungsanlagen oder auch das Fließverhalten bei vorhandenen Störungszonen im Aquifer im Mittelpunkt der Untersuchungen. Bei diesen Arbeiten sind mehrere Brunnensysteme mit zumeist tiefendifferenzierter Auflösung im Grundwasserbereich realisiert. Messsysteme in der ungesättigten

Zone sind, wenn überhaupt, nur an einigen wenigen Punkten situiert und damit nur selten für Profilauswertungen oder das Studium der SUIR geeignet im Allgemeinen nicht dafür vorgesehen.

„Nested Wells“

Eine oftmals angewandte Methodik zur profilspezifischen Messung innerhalb der gesättigten Zone des Grundwasserleiters ist das Prinzip der „Nested Wells“ oder, in der Ausführung und Wirkungsweise diesen sehr ähnlich, engausgebauter Mehrbrunnensysteme (Abb. 1-4 und Abb. 1-5) bzw. Brunnengalerien ([Cherry, et al., 1983], [Brouyère, et al., 2004], [Griggs, et al., 2003], [Legout, et al., 2007], [Martin, et al., 2004]). Die verschiedenen Brunnenbohrungen werden gezielt in der gewünschten Tiefe verfiltert und über die restliche Brunnenwand als Vollrohr ausgeführt. Aufgrund der einzelnen Bohrlochabteufung sind diese Anlagen mit einem etwas höheren Installationsaufwand als einige der nachfolgenden Methoden verbundenen, besitzen dafür aber den Vorteil, in unterschiedlichster Ausbautiefe und -form angelegt werden zu können, wobei lang etablierte und ausgereifte Filterbrunnensysteme zum Einsatz kommen. Das Probenahmenvolumen richtet sich nach dem Ausbau des Filterbrunnens und ist prinzipiell nicht begrenzt. Wiederum nachteilig kann sich allerdings die horizontal-räumliche Segregation der unterschiedlichen Probenahmepunkte auswirken. Auch muss die gegenseitige Beeinflussung der verschiedenen Brunnen im speziellen Fall geprüft werden.

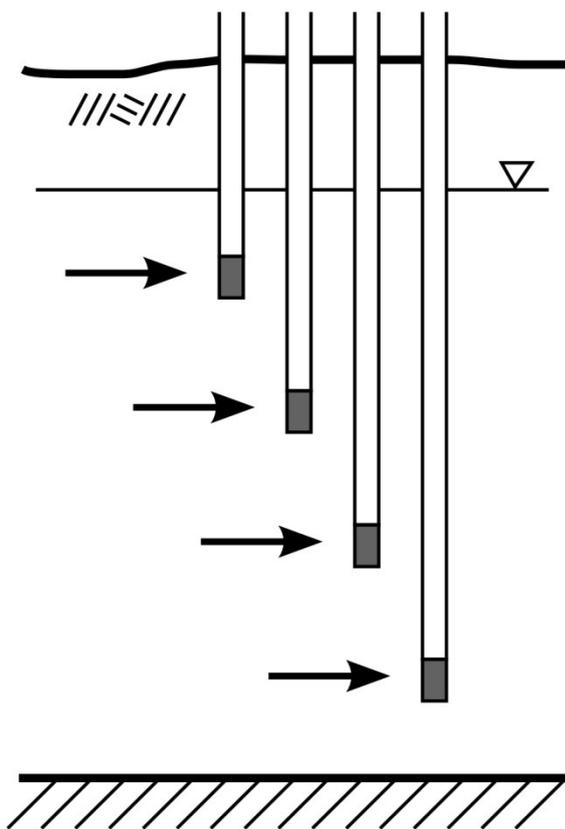


Abb. 1-4 Mehrbrunnensystem verteuft in verschiedenen Niveaus, verändert nach [Graham, 2006]

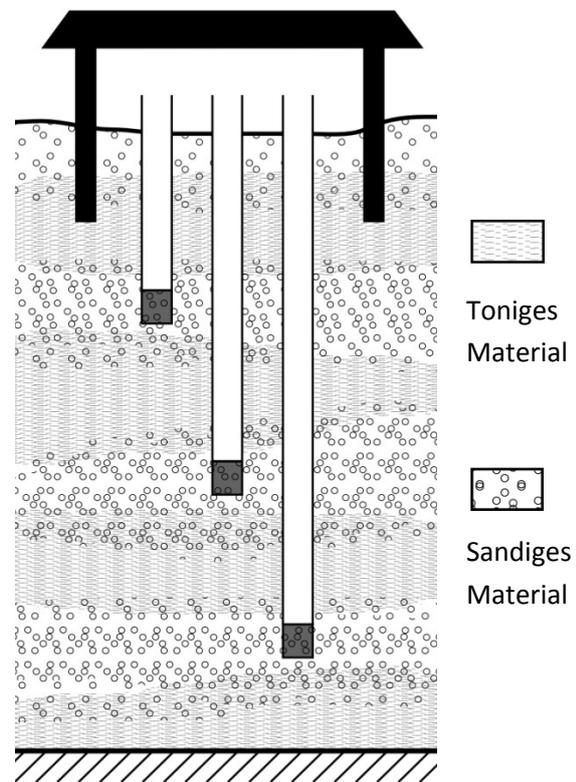


Abb. 1-5 Mehrbrunnensystem verteuft in verschiedenen Grundwasserleitern, verändert nach [Griggs, et al., 2003]

„Multilevel Sampler“

Ein weiteres System wird, im Gegensatz zu den o.g. „Nested Wells“, innerhalb einer einzigen Bohrung ausgebaut. Die „Multilevel Sampler“ haben somit den Vorteil, nach der Probeanalyse das jeweilige „tatsächliche“ Profil am Ort der Anlage zu liefern. Dabei gleicht sich der Mehraufwand zur Konstruktion der vertikal hochauflösenden Anlage wohl mit jenem zum Verteufen mehrerer Brunnen der „Nested Wells“.

Es existieren viele verschiedene Variationen in Größe, Form, Verfilterung, vertikaler Auflösung oder Probenahmeverrichtung; allein [Cherry, et al., 1983] listet drei verschiedene Typen und benennt sie mit „Bundle Piezometer“ (mehrere, in unterschiedlicher Tiefe verfilterter Piezometerrohre sind in einer Messstelle zusammengefasst), „Suction-type Multilevel Point-sampler“ (auf 8-9m limitierte, tiefenspezifische Punktmessungen durch angelegten Unterdruck am Filterbereich, Abb. 1-6) oder „Positive-displacement Multilevel Point-sampler“ (Lösung zur Messung in größeren Tiefen als bis zur Luftdruck limitierten Saughöhe). Eine Weiterentwicklung des „Bundle Piezometers“ wird in [Einarson, et al., 2002] dokumentiert, welche neben verbesserten Materialien und innovativen Filtern auch aus vor Ort an die jeweilige Situation individuell anpassbaren Elementen besteht. Andere „Multilevel Sampler“-Systeme wurden u.a. von [Krajenbrink, et al., 1988], [Grossman, et al., 2002] oder [Mao, et al., 2006] publiziert. Überdies besteht eine weitere Möglichkeit zur tiefenspezifischen Messung innerhalb einer vorhandenen Brunnenanlage darin, „Packer“ zu verwenden (Abb. 1-7). Dabei wird durch aufblasbare Zellen ein Bereich innerhalb des verfilterten Rohres so abgegrenzt, dass von ober- oder unterhalb der Messtiefe keine Beeinflussung erfolgen kann. Rein theoretisch besteht so die Möglichkeit, gleichzeitig mehrere, tiefenspezifische Messungen innerhalb der gesättigten Zone vorzunehmen.

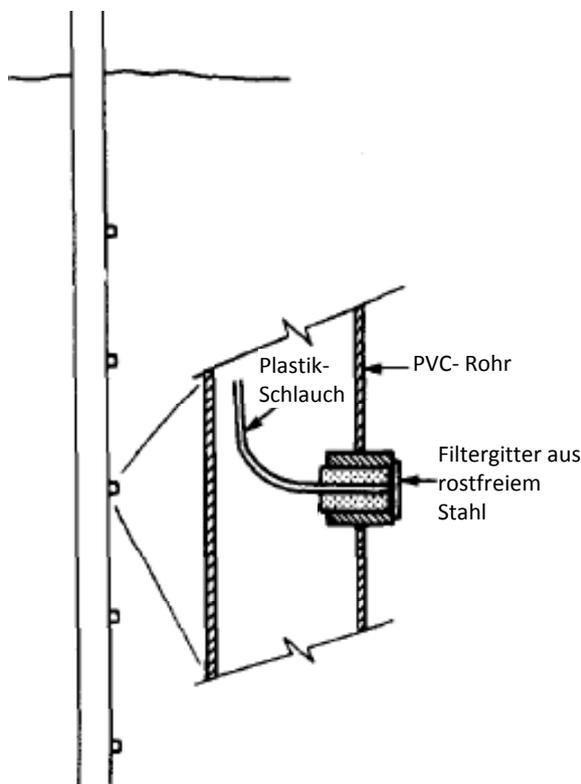


Abb. 1-6 „Suction-type Multilevel Point-sampler“, verändert nach [Cherry, et al., 1983]

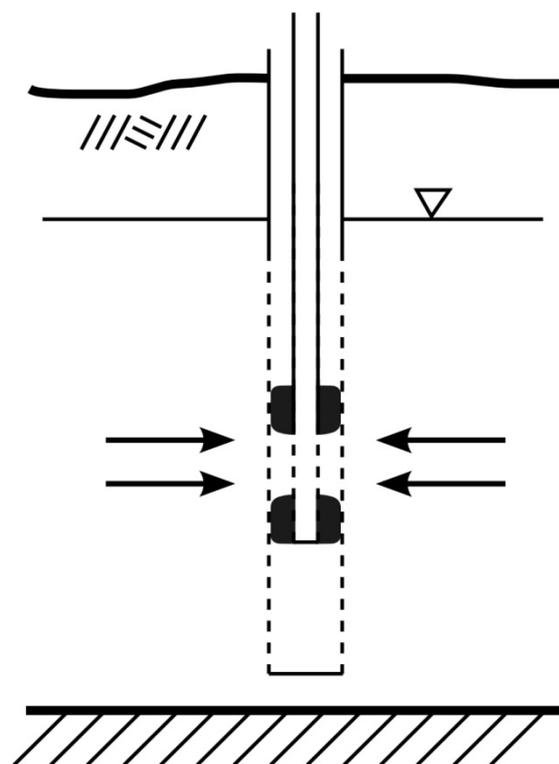


Abb. 1-7 „Packersystem“, verändert nach [Graham, 2006]

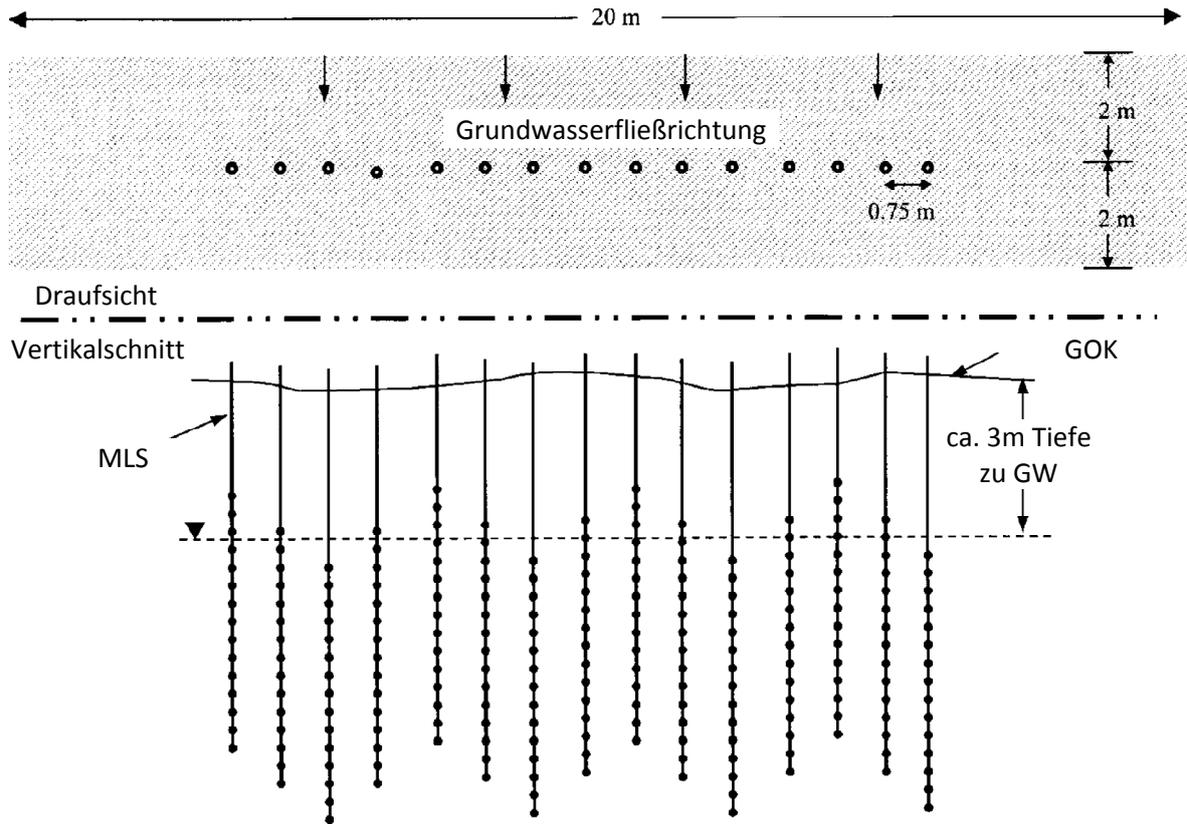


Abb. 1-8 „Multilevel-Sampler-fenceline“ nach [Ryan, et al., 2000]

In [Ryan, et al., 2000] werden ferner mehrere „Multilevel Sampler“ zu einer „MLS-fenceline“ kombiniert, sodass eine sehr hohe, horizontale Auflösung von Tiefenprofilen entsteht (Abb. 1-8). Allerdings ist auch bei dieser Probenahmeanlage lediglich die Messung in der gesättigten Zone möglich.

Bei [Ronen, et al., 1986], und später auch [Laor, et al., 2003], wird ein tiefenspezifisches Probenahmesystem mit untereinander angeordneten Dialysezellen vorgestellt (Abb. 1-9). Das System wird in das Filterrohr des Beobachtungspunktes eingebracht und nach einer bestimmten Zeit, wenn sich das Equilibrium zwischen Dialysezelle und Umgebung eingestellt hat, wieder entfernt. Dabei eignet sich die Anlage zur Beprobung von Wasser in der gesättigten Zone und von Bodenluft in der ungesättigten Zone. Nachteilig bei dieser Anlage ist, dass wiederum keine Probenahme in der ungesättigten Zone möglich ist und dass die Zeit bis zum Einstellen des Gleichgewichts innerhalb der Dialysezelle u.U. mehrere Wochen betragen kann.

1.3.2 Kleinräumige Experimente

Im Gegensatz zu den oben aufgeführten, großräumigen Versuchen finden sich in der Literatur weiterhin Experimente, die sich auf nur kleinräumige Bereiche über wenige Quadratmeter beschränken. Diese werden nach Verbau (Eingraben, Bohren etc.) der Sensoren im Bodenkörper ([Behera, et al., 2003], [Garg, et al., 2005], [Kengni, et al., 1994], [Khanzada, et al., 1998], [Zhao, et al., 2007], [Abit, et al., 2008]), an Aufschlüssen (z.B. das Urban-Lysimeter der Ljubljana Union Brewery [Lanthaler, 2005-2008] oder [Søvik, et al., 2002]) oder in künstlich angelegten, abgeschlossenen Gerinnen [Jellali, et al., 2003] durchgeführt. Diese Anlagen liefern aufgrund der oftmals

hochaufgelösten Messnetze eine hohe Datendichte innerhalb der untersuchten Bereiche. Dabei kommen in unterschiedlichen Kombinationen und Anordnungen verschiedene Ausführungen von Saugkerzen, Tensiomern, Piezometern (innerhalb des Grundwasserschwankungsbereiches), TDR-Sonden, Gipsblöcken oder andere, auf einen konkreten Untersuchungsgegenstand angepasste Spezialgeräte zur Probenahme zum Einsatz. Die Experimente sind dadurch charakterisiert, dass vorrangig vertikale Fließ- oder Transportvorgänge, wie die Sickerwasserbewegung von der Bodenoberkante in das Grundwasser oder der Stofftransport innerhalb der ungesättigten Zone, oder auch Untersuchungen des Bodenluftkörpers im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen. Ebenso werden, wie bei den großräumig angelegten Versuchen, verschiedene, auf das Experiment abgestimmte Tracer verwendet.

Ein großer Nachteil bei diesen Experimenten ist die mit dem Einbau der Geräte verbundene Störung des gesamten Aquifers im untersuchten Bereich. Bei Aufschlüssen, um die Geräte seitlich in den Bodenkörper einzuführen, unterliegt dieser durch die Aushubtätigkeit nur noch zu geringen Teilen den natürlichen Grundwasserverhältnissen; in künstlichen Gerinnen ist es nicht möglich, vollkommen ungestörte Bodenabschnitte einzubauen oder ein annähernd natürliches Bodengefüge zu erhalten; vertikale Versorgungsschächte stören aufgrund ihrer Dimension, die zur Begehbarkeit nötig ist, den Boden- und Grundwasserkörper. Zudem sind die meisten Anlagen mit einem hohen Einbau- und Wartungsaufwand verbunden. Ferner ist die Repräsentativität eines Versuchsstandorts für andere Bodenbereiche in Frage zu stellen. Zudem können diese kleinräumigen, aufwendigen Experimente nur in Ausnahmefällen an anderen Versuchsstandorten in gleicher Form und Aufbauweise wiederholt werden.

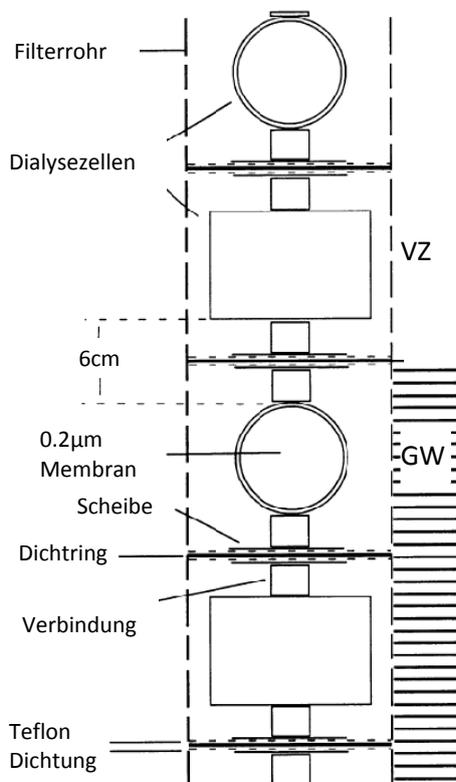


Abb. 1-9 „Passive Multilayer-Sampler“ nach [Laor, et al., 2003]

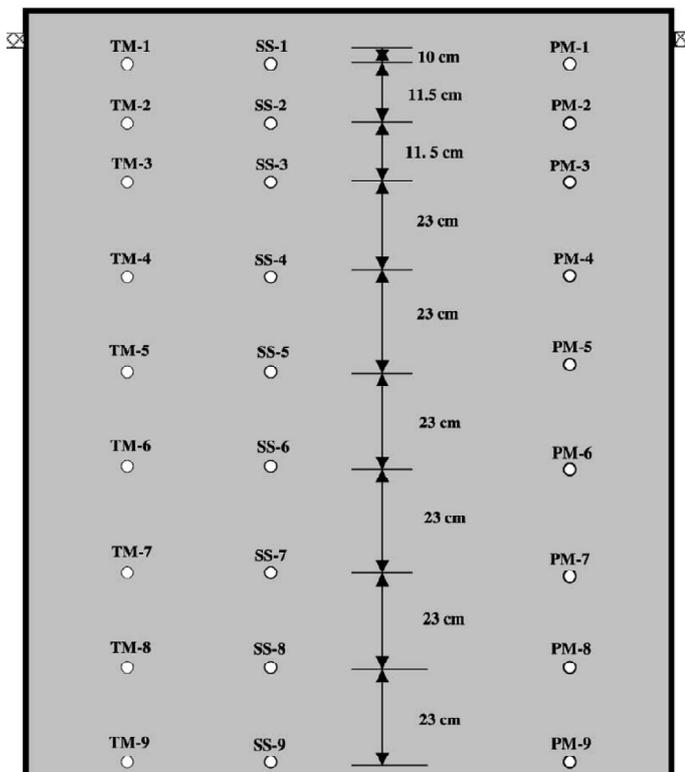


Abb. 1-10 Kleinräumiges Probenahmeprofil mit hoher Sensorbestückung nach [Behera, et al., 2003]; Breite ca. 5m, TM – Tensiometer, SS – Saugkerze, PM – Piezometer

1.3.3 Andere Probenahmemethoden

Neben den aufgeführten Probenahmesystemen existieren auch weitere Möglichkeiten für das Monitoring des Boden- und Grundwasserkörpers.

Eine nicht repetitive Variante zur Beprobung ist die Entnahme von Bohrkernen oder Bodenproben, welche anschließend im Labor der Analyse unterzogen werden; diese Methode ist aber zur kontinuierlichen Beobachtung/Probenahme nicht geeignet.

In einer Publikation von [Cherry, et al., 1983] wird ein Probenahmegerät vorgestellt, welches, ähnlich dem „Direct-push“-Verfahren, ein sehr mobiles System darstellt (Abb. 1-11). Mit dem sogenannten „Auger-head suction sampler“ wird bis in eine bestimmte Tiefe gebohrt, über ein angelegtes Vakuum eine Probe an der Spitze des Systems entnommen und anschließend bis in die nächste zu beprobende Schichttiefe weitergebohrt oder das Gerät entfernt und an einem anderen Standort eine weitere Beprobung durchgeführt. Die Probenahme mit diesem Gerät kann am gleichen Ort jedoch nicht wiederholt werden und eine gleichzeitige Beprobung in unterschiedlichen Tiefen ist ebenfalls nicht möglich.

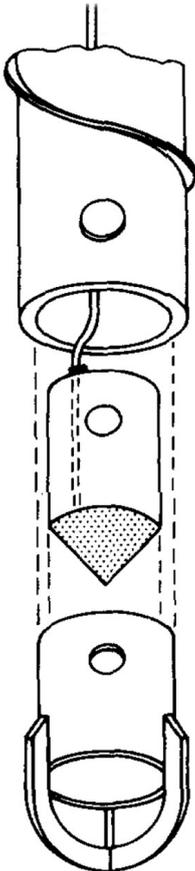


Abb. 1-11 „Auger-head suction sampler“ nach [Cherry, et al., 1983]; Maße unbekannt, Schätzung wenige Dezimeter

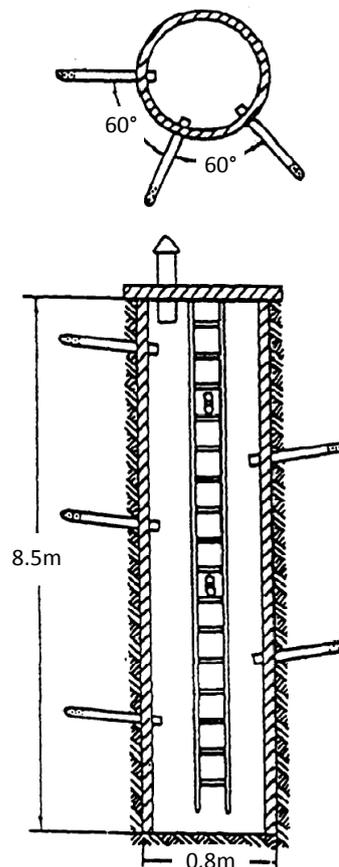


Abb. 1-12 „Vadose zone monitoring shaft“ nach [Twardowska, 1995]



Abb. 1-13 Ausschnitt Spitze Saugkerzenbaum, Länge ca. 0.5m

1.3.4 Instrumente zur Beprobung des gesamten Bereiches der ungesättigten und gesättigten Zone, inklusive der SUIR

Die einzige Anlage, welche die Möglichkeit bietet, den gesamten ungesättigten Bereich, den Kapillarsaum und die gesättigte Grundwasserzone zu beproben, wird von [Twardowska, 1995] mit dem „Vadose zone monitoring shaft“ vorgestellt (Abb. 1-12). Es wurde ein begehbare Schacht ausgehoben, wasserdicht versiegelt und von innen Saugkerzen horizontal durch Öffnungen in der Schachtwand in den Bodenkörper eingebracht. Somit besteht die Möglichkeit, in der ungesättigten und gesättigten Zone gleichzeitig an einem Standort zu messen. Der „Vadose zone monitoring shaft“ kommt damit der in Wagna installierten Anlage in Konzept und Aufbau nahe, ist aber aufgrund der relativ groben vertikalen Auflösung nicht in der Lage, die SUIR so detailliert zu beproben, wie es mit dem Saugkerzenbaum möglich ist. Auch kommt es wahrscheinlich durch die Dimension des Zugangsschachtes zu starken Beeinflussungen des Aquifers und der umgebenden Grundwasserströmung.

Andere, vergleichbare Anlagen zur kontinuierlichen, detaillierten, tiefendifferenzierten Beprobung des Boden- und Grundwasserkörpers, wie es mit den beiden Saugkerzenbäumen (siehe Abschnitt 1.4, S. 11 ff.) in Wagna möglich ist, welche ebenso einen nur geringen Aufwand beim Einbau erfordern, sind bis dato nicht bekannt.

1.4 Das Testfeld Wagna in der Südsteiermark, Österreich, und die tiefengestaffelte Probenahme mit dem Saugkerzenbaum

Die Forschungsstation Wagna befindet sich im Murtal, etwa 50km südlich von Graz auf 266m über Adria und wird im Zuge diverser Forschungsbelange seit der Errichtung im Jahr 1991 vom Institut für WasserressourcenManagement, Hydrogeologie und Geothermie des JOANNEUM RESEARCH Graz in Kooperation mit der Firma UMS GmbH München betreut. Im Zuge des Rückgangs der eiszeitlichen Vergletscherung kam es im gesamten Murtal zur Ablagerung verschiedener, glazialer Sedimente mit hoher räumlicher Variabilität in ihrer Ausprägung. Der seichtliegende, mehrere Meter mächtige Aquifer, besteht hauptsächlich aus grobsandigem bis kiesigem Material mit geringen Feinsandanteilen (siehe auch Abb. 3-17, S. 46), wird im Untergrund durch Tertiärsedimente begrenzt und eignet sich aufgrund seiner Beschaffenheit hervorragend für die wasserwirtschaftliche Nutzung, v.a. zur Trinkwassergewinnung [Fank, 1999]. Zur Ausstattung der Station gehören, neben einer Wetterstation, welche die meteorologischen Standards erfasst, mehrere, unterschiedlich ausgebaute Lysimeter, sowie zwei, im Herbst 2007 installierte, neuartige Instrumente zur tiefendifferenzierten Beprobung der ungesättigten Zone, des Kapillarsaums sowie des grundwassergesättigten Bereiches. Das gesamte Testgelände wird fortlaufend agrartechnisch genutzt und seit 2004 in spezifischen Kultivierungszyklen bewirtschaftet, um die Unterschiede einer organisch-biologischen und einer konventionellen Düngung zu untersuchen und u.a. die dabei in den Aquifer imitierte Stickstofffracht zu vergleichen [Böttcher, 2007].

Die zwei sogenannten „Saugkerzenbäume“ (SKB) sind jeweils unterhalb einer organisch-biologischen und einer konventionell bewirtschafteten Parzelle eingebracht. Im Folgenden wird lediglich der im organisch-biologischen Feld eingebrachte Saugkerzenbaum untersucht. In einem Abstand von 11cm sind an einem Gestänge 24 Saugkerzen positioniert (Typ SK20, Material 70% Al_2O_3 , 30% SiO_2 , UMS GmbH München, vgl. auch Abb. 1-13) und in einer Tiefe von 2.5m bis 5.1m unter der

Geländeoberkante in den Boden eingebracht. Der Durchmesser der Bohrung beträgt 30cm ; im inneren Bereich ($d = 20\text{cm}$) der Bohrung wurde das gesiebte, ausgehobene Material wiederverfüllt; der Zwischenbereich ($20\text{cm} < d < 30\text{cm}$) wurde mit einem Filterkies eines mittleren Korndurchmessers $d_k = 2\text{mm}$ verfüllt. Die untersten Saugkerzen liegen noch unterhalb des über 16 Jahre (seit 01.01.1992) beobachteten, tiefsten Grundwasserstandes und sind in der Lage, Grundwasserproben zu nehmen sowie den Grundwasserspiegel kontinuierlich aufzuzeichnen. Darüber liegende Kerzen nehmen Proben des Kapillar- und Bodenwassers über den gesamten Bereich des Kapillarsaums und der ungesättigten Zone bis in eine Tiefe von 2.5m unter GOK und befinden sich oberhalb des in o.g. Zeitraum höchsten beobachteten Grundwasserspiegels. Mit Hilfe dieser Anlage soll eine tiefenspezifische Probenahme über den gesamten Bereich, von der ungesättigten bis zur gesättigten Zone, inklusive des Kapillarsaums, ermöglicht werden.

Anhand der beispielhaft angeführten, mit dem Saugkerzenbaum der Station Wagna gemessenen Profildaten (Abb. 1-14 und Abb. 1-15) sind deutlich tiefendifferenzierte Variationen der untersuchten Parameter zu erkennen. Um eine korrekte Auswertung und Interpretation der Profile zu ermöglichen, gilt es, das Anstromverhalten an den Saugkerzenbaum nachvollziehen zu können und festzustellen, ob die aufgezeichneten Profildaten repräsentativ für die entsprechenden Tiefen sind oder ob möglicherweise Wasser aus anderen Höhenlagen zu den jeweiligen Kerzen strömt. Dazu werden in der vorliegenden Arbeit sowohl Laboruntersuchungen zur Adaption des Saugkerzenbaums in die Laborumgebung als auch numerische Simulationen der Experimente sowie der Feldsituation vorgestellt.

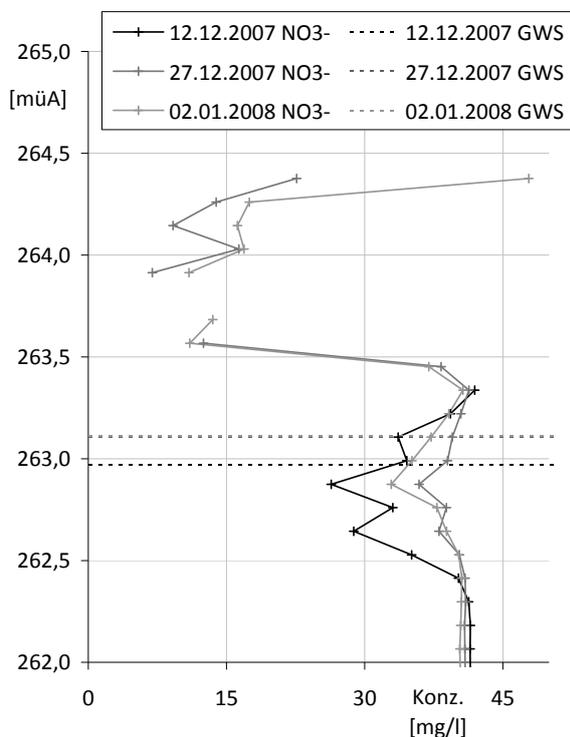


Abb. 1-14 Grundwasserstand GWS und Nitratkonzentrationen NO_3^- in unterschiedlicher Beprobungstiefe

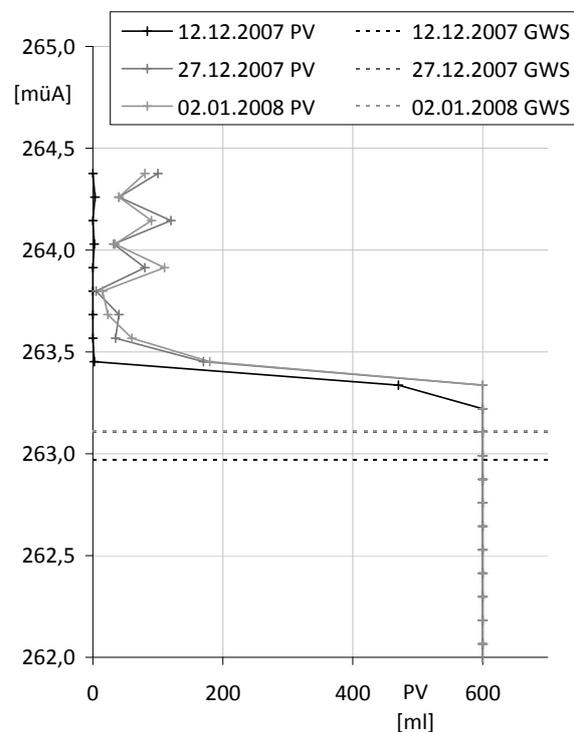


Abb. 1-15 Grundwasserstand GWS und Probevolumina PV in unterschiedlicher Beprobungstiefe

2 LABOREXPERIMENTE ZUR NACHBILDUNG DES SAUGKERZENBAUMS

Motivation

Die mit Hilfe eines künstlichen Gerinnes durchgeführten Laborexperimente dienen dazu, das Anstromverhalten an den in Wagna installierten Saugkerzenbaum zu untersuchen und die Feldsituation in vereinfachter Form abzubilden. Ergänzend zur durchgeführten numerischen Modellierung mit dem Programm HYDRUS (siehe Abschnitt 3.1, S. 36 ff.) sollte ebenso das Konzept der tiefendifferenzierten Probeanlage überprüft werden.

2.1 Verwendete Materialien

2.1.1 Laborsand

Für den bei den Experimenten verwendeten Sand lagen bereits Daten aus hydraulischen Versuchen vor [Helm, 2007]. Im Folgenden sind einige Parameter in Tabellenform (Tab. 2-1 und Tab. 2-2), die pF -Kurve nach Mualem-van-Genuchten (Abb. 2-1) sowie die Kornsummenlinie der Siebanalyse (Abb. 2-2) angeführt. Aus den beiden durchgeführten Experimenten zur Bestimmung der Mualem-van-Genuchten-Parameter ergibt sich ein Variationsbereich dieser für die numerische Modellierung. Während der Laborversuche konnten dabei die Porosität ermittelt und der Parameter α aus der Höhe des Kapillarsaums geschätzt werden; beide Parameter lagen innerhalb der Wertebereiche der vorangegangenen Experimenten von [Helm, 2007]. Weiterhin ergaben mehrere Experimente ([Helm, 2007]) zur Bestimmung der gesättigten, hydraulischen Leitfähigkeit den in Tab. 2-2 gelisteten Bereich sowie weitere Materialparameter (ρ_F Feststoffdichte, d_{10} Korngröße bei Siebdurchgang von 10%, d_{60} Korngröße bei Siebdurchgang von 60%, k_{Hazen} hydraulische Leitfähigkeit nach [Hazen, 1893]).

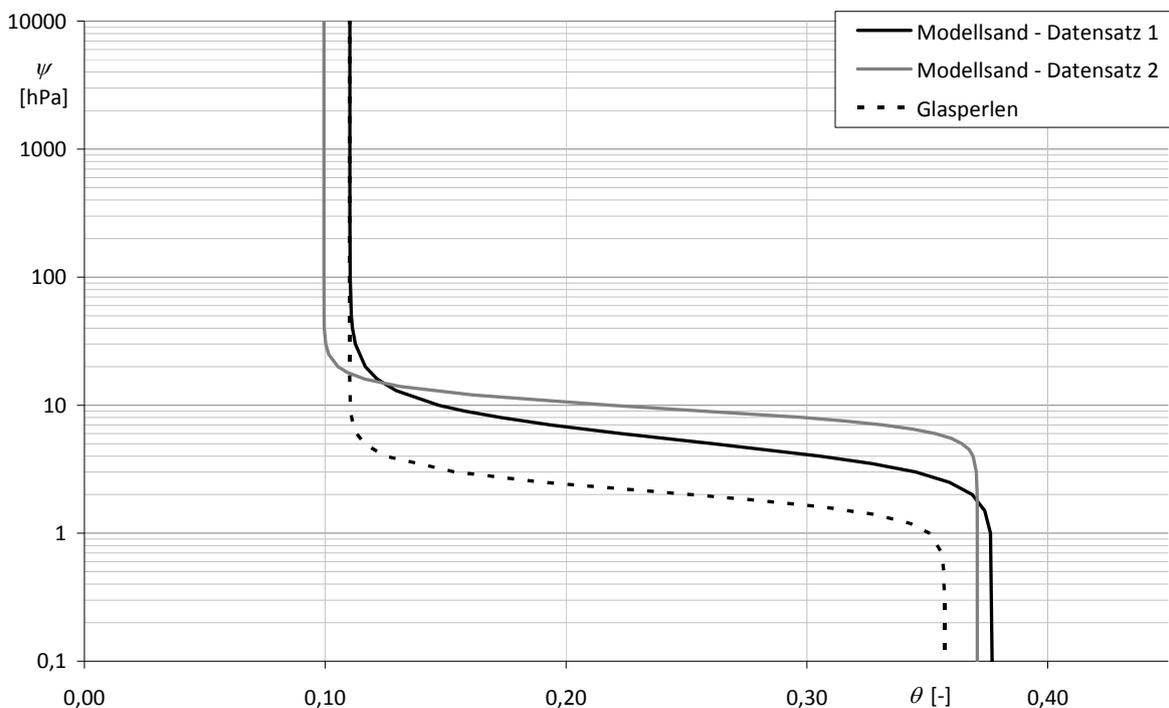


Abb. 2-1 Saugspannungs-Sättigungs-Kurve Modellsand und Glasperlen

Tab. 2-1 Mualem-van-Genuchten-Parameter Modellsand

Datensatz	θ_r [-]	θ_s [-]	α [cm^{-1}]	n_{MVG} [-]
1	0.099	0.371	0.109	5.89
2	0.110	0.377	0.210	3.59
Exp1	—	0.375	≈ 0.200	—
Exp2	—	0.342	≈ 0.167	—

Tab. 2-2 Hydraulische Parameter Modellsand

k_s [$m \cdot s^{-1}$]	ρ_F [$g \cdot cm^3$]	d_{10} [mm]	d_{60} [mm]	k_{Hazen} [$m \cdot s^{-1}$]
$2 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-3}$	2.616	0.8	1.42	$7.42 \cdot 10^{-3}$

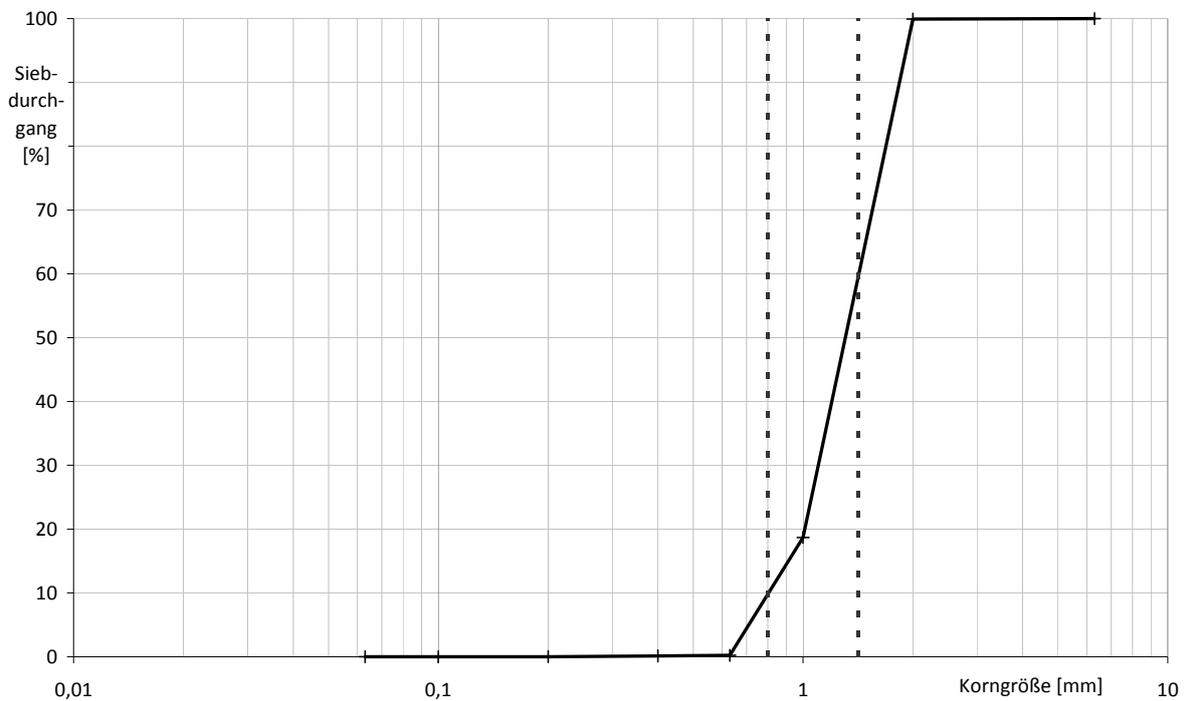


Abb. 2-2 Kornsummenlinie Modellsand

2.1.2 Glasperlen

Weiterhin kam bei einigen Experimenten ein künstliches Bodenmaterial (Glasperlen mit Korndurchmesser $d \approx 2mm$) zum Einsatz. Die in Tab. 2-3 angeführten, bodenhydraulisch relevanten Kennwerte wurden näherungsweise durch Laborversuche abgeschätzt (k_f -Wert mit Darcy-Versuchsanlage, ρ_F mit Pyknometer, ρ_L und n nach dem Einbau berechnet, α visuell aus Reziproke der kapillaren Steighöhe im Gerinne). Siehe dazu auch die aus Parameterschätzungen in Abb. 2-1 aufgetragene pF -Kurve.

Tab. 2-3 Hydraulische Parameter Glasperlen

k_s [$m \cdot s^{-1}$]	ρ_F [$g \cdot cm^{-3}$]	ρ_L [$g \cdot cm^{-3}$]	n [-]	α [cm^{-1}]
$4 \cdot 10^{-3}$	2.49	1.52	0.39	≈ 0.4

2.1.3 Geräte und Software

Das aus rostfreiem Stahl bestehende Laborgerinne besitzt ein Fassungsvermögen von $V = 50 \cdot 30 \cdot 10 \text{cm}^3$ (Länge x Höhe x Tiefe). Die Daten zweier Waagen (Kern ITB 35K1IB bis max. 35kg, Sartorius MC1 bis 4kg), der Leitfähigkeitssonde (WTW-LF 96) und des Tensiometers (Einstichtensiometer der Fa. UIT GmbH Dresden angeschlossen an Drucksensor Typ PR-41X) wurden mit Hilfe des Programms DASYLAB (Fa. measX GmbH & Co. KG) mit einer Auflösung von 10Hz über einen Analog-Digital-Wandler erfasst und als Mittelwert über 5s kontinuierlich aufgezeichnet. Die Versuchsprotokolle sowie die aufgezeichneten Daten sind im digitalen Anhang angefügt (vgl. dazu auch Abschnitt 5, S. E).

Desweiteren kamen drei Saugkerzen des Typs SMS1 der Fa. UMS München zur Probenahme zum Einsatz (Außendurchmesser $d_{\text{außen}} \approx 2.3 \text{mm}$, Innendurchmesser $d_{\text{innen}} \approx 1.4 \text{mm}$, Länge $L \approx 50 \text{mm}$, poröses Material hydrophiler Kunststoff). Die Probenahme erfolgt durch Aufziehen einer zugehörigen Spritze (Volumen $V \approx 14 \text{ml}$), wodurch innerhalb des porösen Materials ein Unterdruck nahe Vakuum entsteht und die Probenahme durchgeführt wird.

Die Abb. 2-3 zeigt den Versuchsaufbau im Laborkeller des Instituts für Grundwasserwirtschaft (IGW).



Abb. 2-3 Experimentaufbau im Laborkeller des IGW

2.1.4 Ermittlung des k_f -Wertes der Saugkerzen SMS1

Zur Parametrisierung der Saugkerzen im numerischen Modell wurde die hydraulische Leitfähigkeit abgeschätzt. Unter der Annahme, dass Luft kompressibel und Wasser inkompressibel ist, kann folgender Versuch unternommen werden: Eine Saugkerze wurde so auf einer Waage (Genauigkeit $\pm 0.1 \text{g}$) positioniert, dass sich das poröse Material frei hängend in einem mit destilliertem, entgastem Wasser gefüllten Gefäß befand. Die Spritze wurde von 5ml auf 11ml Volumen aufgezogen. Das Druckgefälle „durch“ die Kerze – Innendruck der Saugkerze ($\frac{5}{11}$ des Luftdrucks) vs. Luftdruck (zzgl. vernachlässigbar geringer Wasserdruck p bei gefülltem

Verbindungsschlauch: $p = h_{diff} \cdot \rho_{H_2O} \cdot g = 0.05m \cdot 1000kg \cdot m^{-3} \cdot 9.81m \cdot s^{-2} = 491Pa$
entspricht ca. 0.5% des Luftdrucks, mit Höhendifferenz h_{diff} , Dichte des Wassers ρ_{H_2O} , Erdschwerebeschleunigung g – ist somit bekannt. Das gesamte Totvolumen ($V_{tot;ges}$) der Saugkerze (SK) inklusive Schlauch und Anschlüsse (Anschl) bis zur Spritze wird folgendermaßen abgeschätzt (Gleichungen (2-1), (2-2)).

$$V_{tot;i} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{i,au\beta en} - d_{i,innen})^2 \cdot l_i \quad (2-1)$$

$$V_{tot;ges} = V_{tot;SK} + V_{tot;Anschl} = 0.025cm^3 + 0.167cm^3 = 0.192cm^3 \quad (2-2)$$

mit l_i als Länge der Komponente i .

Das Totvolumen entspricht 3.8% von 5ml; der Einfluss auf die Druckbestimmung wird als vernachlässigbar gering angesehen. Der Durchfluss ergibt sich aus der mit einer Auflösung von 1s aufgezeichneten Änderung des Gewichtes der Saugkerze inklusive Spritze und Verbindungen. Die zurückgelegte Fließstrecke dx entspricht der Wandstärke der Saugkerze ($dx = 2.3 - 1.5 = 0.8mm$), der durchflossene Querschnitt A wird aus (2-3) abgeschätzt.

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 2-4 skizziert. Die aufgezeichnete Volumen-Zeit-Ganglinie zeigt sich beispielhaft für eine der Saugkerzen (SK1) wie in Abb. 2-5 dargestellt.

$$A = \overline{d_{wand,SK}} \cdot h_{SK} \quad (2-3)$$

mit $\overline{d_{wand,SK}}$ als mittlerer Wanddurchmesser der Saugkerze.

Da das Druckgefälle, und damit der Durchfluss, nicht konstant bleibt (aus dem Behälter gezogenes Wasser reduziert den Innendruck der Spritze), wird die hydraulische Leitfähigkeit über bestimmte Abschnitte, in denen stationäre Verhältnisse angenommen werden, bestimmt. Es ergeben sich für selbige Saugkerze folgende k_f -Werte (Tab. 2-4).

Die hydraulische Leitfähigkeit zeigte sich über die Zeit relativ konstant; die geringen Schwankungen sind auf Messfehler der Waage zurückzuführen. Vergleichbare Werte ergaben sich für die anderen, teilweise wiederholt durchgeführten Versuche und Saugkerzen. Eine Übersicht der geometrischen Mittel der durch die verschiedenen Versuche gewonnen k_f -Werte gibt Tabelle Tab. 2-4.

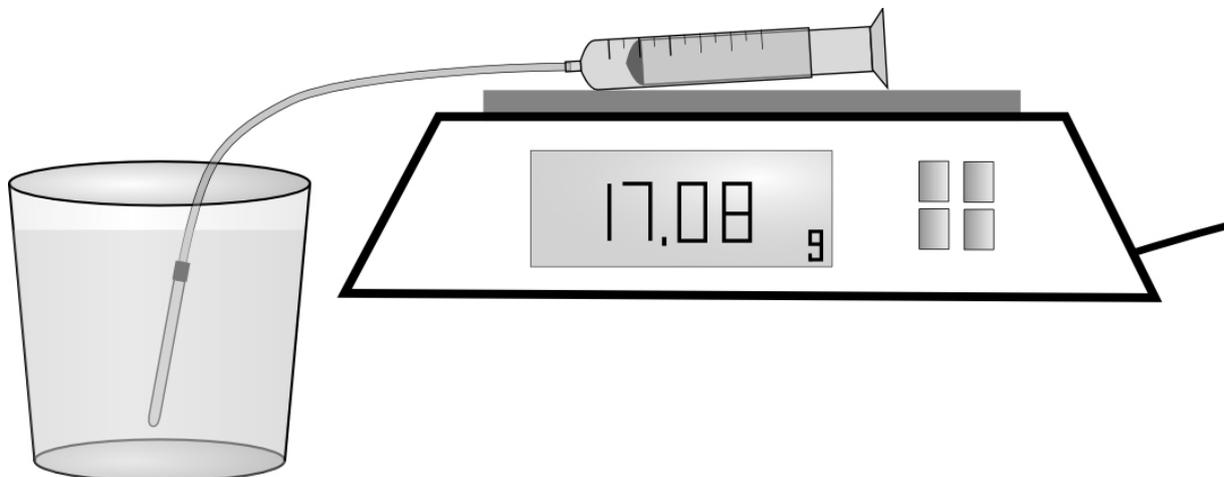


Abb. 2-4 Skizze Versuchsaufbau Bestimmung k_f -Werte Saugkerzen

Tab. 2-4 Hydraulische Leitfähigkeit der Saugkerzen (in $m \cdot s^{-1}$)

Versuchsnummer	SK1	SK2	SK3
1	$8.49 \cdot 10^{-10}$	$8.62 \cdot 10^{-10}$	$1.38 \cdot 10^{-10}$
2	$8.39 \cdot 10^{-10}$		$8.17 \cdot 10^{-10}$
3	$1.41 \cdot 10^{-9}$		

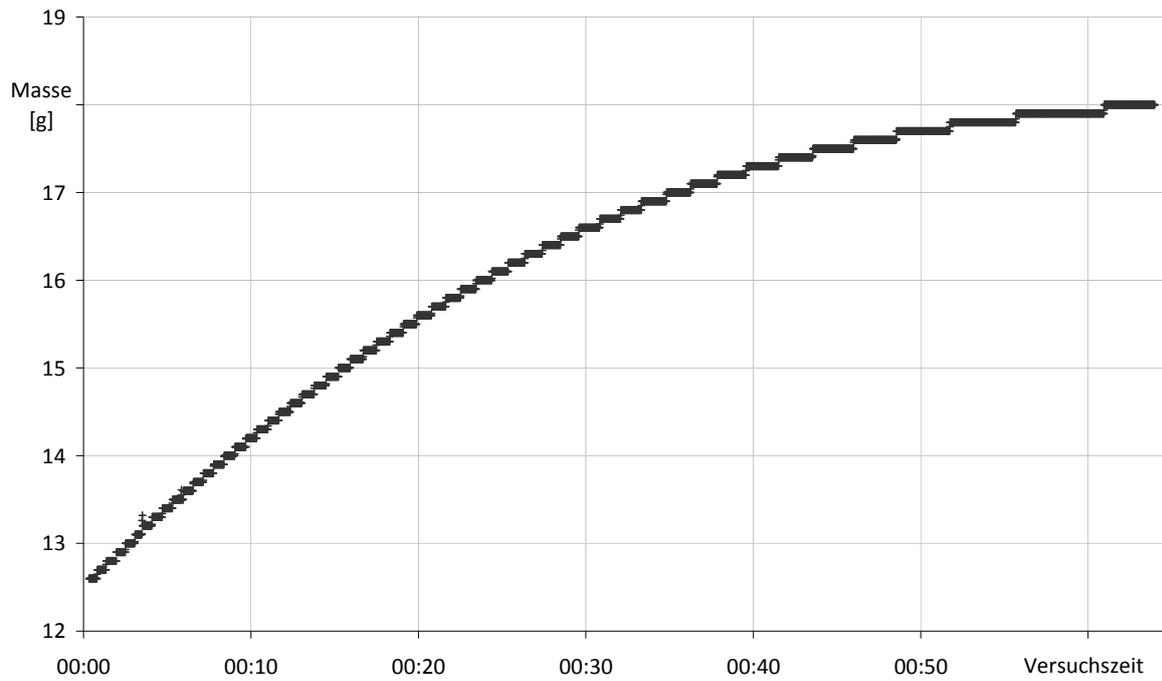


Abb. 2-5 Volumen-Zeit-Ganglinie für Saugkerze 1, Versuchsnummer 1

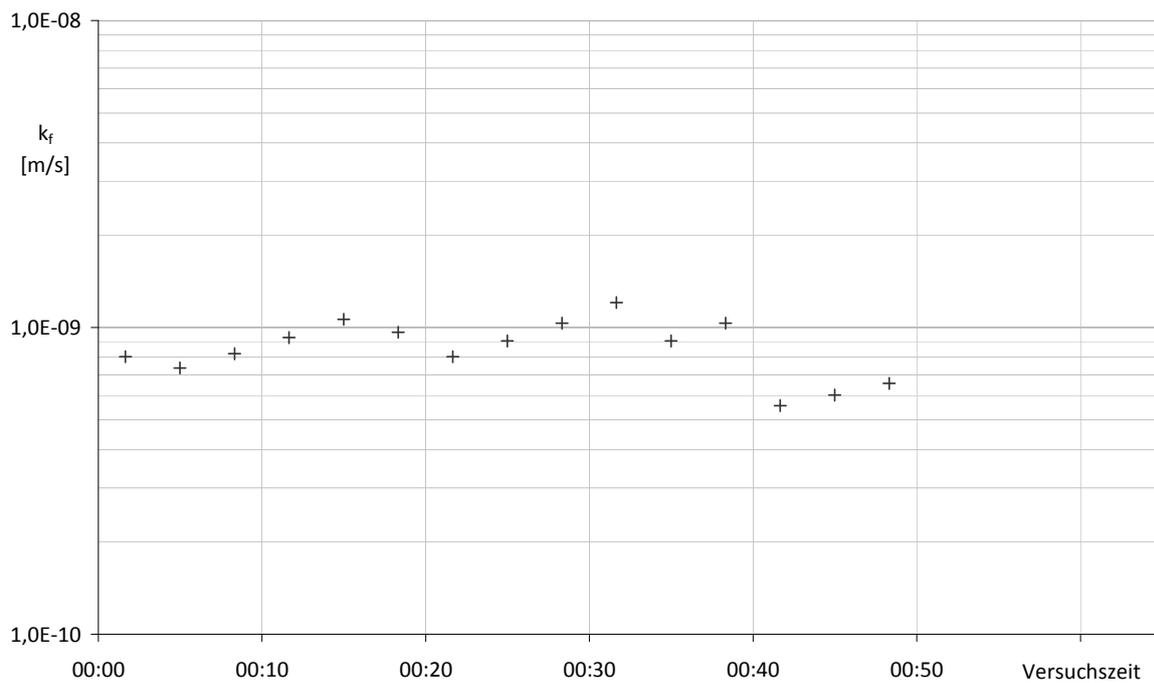


Abb. 2-6 Zeitlicher Verlauf hydraulische Leitfähigkeit Saugkerze 1, Versuchsnummer 1

Die Saugkerze 3 zeigte zunächst um etwa eine Zehnerpotenz geringere Werte der hydraulischen Leitfähigkeit als die beiden anderen Saugkerzen (Versuchsnummer 1). Es wird vermutet, dass es zu einer Adsorption von dem im Vorversuch verwendeten Rhodamin B und einer Reduktion der hydraulischen Leitfähigkeit kam (vgl. Ausführungen in Abschnitt 2.2, S. 20 ff.). Die Kerze wurde zur Regeneration über zehn Minuten in ein Ultraschallbad gelegt und der Versuch wiederholt (Versuchsnummer 2). Die Regeneration des porösen Materials war offenbar erfolgreich; das ermittelte Ergebnis der hydraulischen Leitfähigkeit liegt in vergleichbarer Größenordnung mit den vorhergehenden Versuchen der anderen beiden Saugkerzen.

Die so erhaltenen Werte der Saugkerze sind als Näherung zur Implementierung in das numerische Modell ausreichend genau bestimmt (für detaillierte Ausführungen zur Erstellung des numerischen Modells und der Parametrisierung desselben siehe entsprechende Abschnitte ab Kapitell 1, S. 36 ff.).

2.1.5 Photometrische Analyse des Tracers Brilliant Blue

Die während der Experimente gewonnenen Proben wurden mit Hilfe eines Photometers (Cadas 30, Fa. Dr. Lange) auf die Konzentration von Brilliant Blue (BB) analysiert. Dazu wurde bei der Wellenlänge $\lambda = 408\text{nm}$ der Extinktionswert E nach der Formel (2-4) geräteintern bestimmt.

$$E = \log\left(\frac{i_0}{i_n}\right) \quad (2-4)$$

mit i_0 und i_n als photometerinterne Extinktionsvariable der Blindprobe beziehungsweise der Probe n

Auf der Basis bekannter Konzentrationen wurde eine Eichbeziehung (Abb. 2-7) aufgestellt, anhand derer durch lineare Regression die Konzentration der Proben bestimmt werden konnte. Die Eichbeziehung wurde zu drei Zeitpunkten (Werte „Exp0“, „Exp1“ und „Exp2“) mit unabhängigen Eichlösungen aufgestellt und lieferte jeweils nahezu idente Ergebnisse.

Die Eichfunktion kann durch Formel (2-5) abgebildet und die Konzentration von Brilliant Blue c_{BB} über die gemessene Extinktion bestimmt werden.

$$c_{BB} [g \cdot l^{-1}] = 0.1061 \cdot E - 1.83 \cdot 10^{-4} \quad (2-5)$$

Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression liegt nahe 1, die Eichgerade eignet sich im gewählten Bereich ($0.001g \cdot l^{-1} < c_{BB} < 0.230g \cdot l^{-1}$) zur linearen Interpolation. Bei Konzentrationen unterhalb $0.001g \cdot l^{-1}$ (entspricht $E < 0.011$) oder oberhalb $0.23g \cdot l^{-1}$ (entspricht $E > 2.2$) weicht die Eichgerade von der Linearität ab („Obere Grenze“ bzw. „Untere Grenze“ in Abb. 2-7); die Extinktion ist zu gering beziehungsweise zu hoch, um vom Gerät exakt bestimmt zu werden. Extinktionswerte $E > 2.2$ wurden nicht erfasst, $E < 0.011$ wird als $c_{BB} = 0g \cdot l^{-1}$ interpretiert.

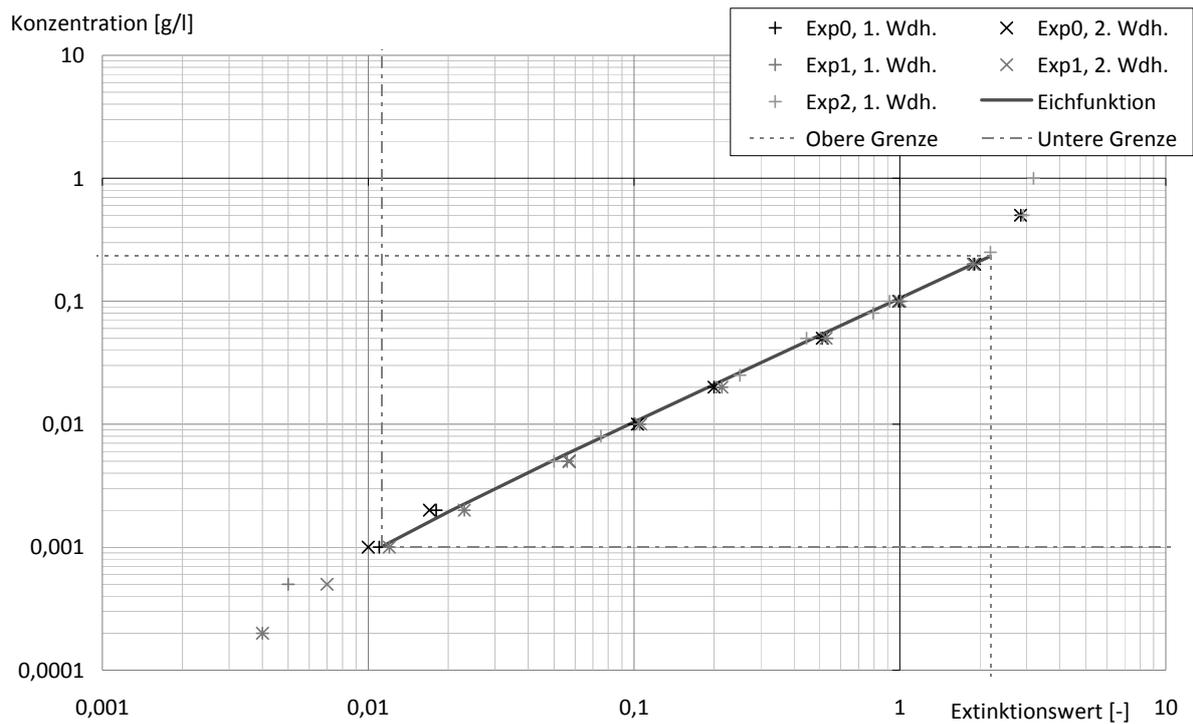


Abb. 2-7 Messpunkte und Eichbeziehung für Brilliant Blue für die drei Experimentaufbauten

2.1.6 Kurzversuch Wechselwirkung Kaliumbromid KBr und Brilliant Blue BB

In zwei der Laborexperimente kam ein Tracergemisch von Kaliumbromid und Brilliant Blue zum Einsatz. Vor Versuchsbeginn sind zur Überprüfung eventueller Wechselwirkungen zwischen KBr und BB Mischungslösungen beider Stoffe angesetzt und nach einigen Tagen Standzeit auf den Gehalt von Bromid untersucht worden. Es wurden die beiden Stoffe in Reinform mit Konzentrationen von $c_{KBr} = 10\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ und $c_{BB} = 1\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ separat als Stammlösungen hergestellt. Anschließend wurden je 20ml Lösung dieser angesetzten Stammlösungen in Probegefäße nach Tab. 2-5 verteilt.

Die Konzentration an Bromid entsprach bei den Proben Nr. 5 und Nr. 6 der Hälfte der Stammlösung (Nr. 1). Dies bedeutet, dass es keine Wechselwirkung zwischen den gelösten Kalium- und Bromidionen und dem Brilliant Blue gab. In den Proben, welche ausschließlich Brilliant Blue enthielten, konnte keine Konzentration von Bromid nachgewiesen werden.

Ferner konnte keine Wechselwirkung anhand des zusätzlich in die Probebehälter eingebrachten Modellsandes ebenfalls mit Kaliumbromid oder Brilliant Blue verzeichnet werden, da sich die Werte der Konzentrationen zwischen den Proben ohne und mit Sand nicht signifikant unterscheiden.

Tab. 2-5 Analyseergebnis Wechselwirkung Kaliumbromid und Brilliant Blue

Probennummer	1	2	3	4	5	6
Probeninhalt	20ml KBr rein	20ml KBr + Sand	20ml BB rein	20ml BB + Sand	20ml KBr + 20ml BB	20ml KBr + 20ml BB + Sand
$c_{Br^-} [g \cdot l^{-1}]$	6.44	6.50	n. v.	n. v.	3.25	3.21

2.2 Vorversuch

2.2.1 Ziel, Aufbau und Vorgehen

Um das Laborgerinne und die angeschlossenen Geräte in ihrer Funktionsweise zu testen, die konzeptionellen Überlegungen des Versuchsaufbaus zu überprüfen und gegebenenfalls Änderungen vorzunehmen, wurde ein Vorversuch (Exp0) durchgeführt. Dabei sind alle Geräte, welche auch in weiteren Experimenten zum Einsatz kommen sollten, in das Laborgerinne integriert worden. Ein weiteres Ziel war, die durch das IGW bereitgestellten Daten der Modellsande zu überprüfen sowie Werte für Initialbedingungen für die Modellierung mit HYDRUS zu gewinnen. Auch sollte die Eignung des Tracers Rhodamin B, im speziellen das Adsorptionsverhalten an Modellsand und Saugkerzen, die Sichtbarkeit im Modell sowie die Verwendbarkeit zur quantitativen Analyse nach der Probenahme untersucht werden. Der Aufbau ist in Abb. 2-8 skizziert.

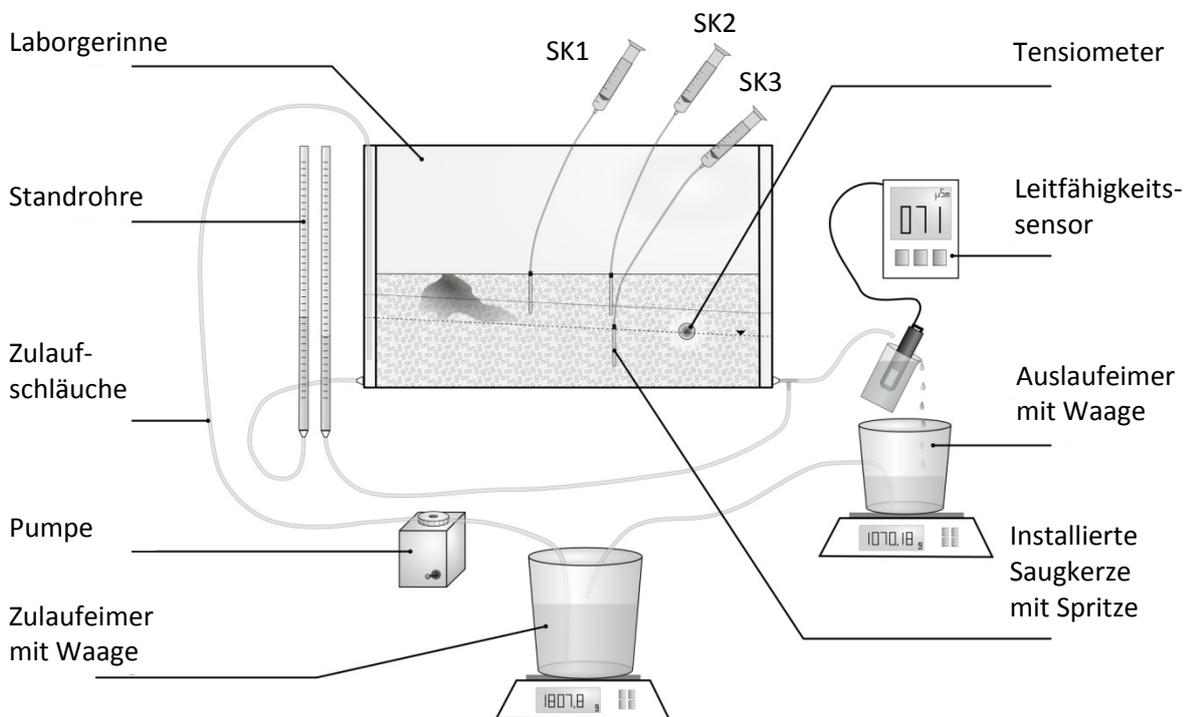


Abb. 2-8 Skizze Aufbau Vorversuch

Für den Versuch wurde destilliertes Wasser verwendet, das aus einem Reservoir über eine Schlauchpumpe dem Gerinne mit konstanter Rate zugeführt wurde. Die Auslaufhöhe regelte die Höhe des Einstaus im Gerinne, wobei das vom Tracer unbelastete Wasser bei einem bestimmten Füllstand des Auslaufbehälters über einen Heber in das Zulaufreservoir strömte und damit im Kreis geführt wurde.

Der Modellsand (Parameter siehe Abschnitt 2.1.1, Seite 13, sowie Tab. 2-6, Seite 21) wurde vor dem Einbau mit destilliertem Wasser gespült und über 48h bei 110°C getrocknet. Der Sand wurde trocken eingebaut und nur leicht per Hand verdichtet. Anschließend wurde das Tensiometer über eine Öffnung in der Rückwand des Gerinnes in das Modell eingebracht.

Der Versuch wurde in mehrere Abschnitte unterteilt. Zu Beginn wurde der trockene Sand vollständig aufgesättigt und anschließend, ohne Pumpbetrieb, bis zu einer definierten Höhe unter freiem Ausfluss entleert. Danach wurde die Pumpe wieder eingeschaltet und nach Einstellung stationärer Verhältnisse, die anhand der Ausgabewerte der beiden Waagen sowie der Leitfähigkeitssonde

definiert wurden, zwei Tracer injiziert (Rhodamin B und Brilliant Blue) und an definierter Stelle mit den Saugkerzen mehrere Probenahmen durchgeführt.

2.2.2 Ergebnisse des Vorversuchs

Während des Vorversuches konnten einige Parameter des Modellsandes näherungsweise bestimmt werden (siehe Tab. 2-6).

Tab. 2-6 Übersicht Parameter Modellsand, Vorversuch

Versuchsnummer	$n [-]$	$n_{eff} [-]$	$k_{f,Sand} [m \cdot s^{-1}]$	$Q [l \cdot h^{-1}]$	$h_{c,vis} [cm]$	$h_{c,Bear} [cm]$
0	0.437	0.248	$5.5 \cdot 10^{-3}$	1.65	4 – 5	7.24

Die Porosität n wurde nach Gleichung (2-6) bestimmt zu

$$n = 1 - \frac{\rho_L}{\rho_F} = 1 - \frac{1472.2kg \cdot m^3}{2615.6kg \cdot m^3} = 0.437 \quad (2-6)$$

mit ρ_L als Lagerungsdichte

und

$$\rho_L = \frac{m_{Sand, Einbau}}{V_{Sand, Einbau}} \quad (2-7)$$

Zum Ende des Versuchs wurde das Volumen, welches unter freiem Auslauf gewonnen wurde, aufgezeichnet; mit der bekannten Einstauhöhe $h_{Einstau}$, den Maßen des Gerinnes und der Porosität n konnte die effektive Porosität n_{eff} nach Gleichung (2-8) abgeschätzt werden.

$$n_{eff} = 1 - \frac{V_{Austauf}}{h_{Einstau} \cdot t_G \cdot l_G \cdot n} = 1 - \frac{0.00153m^3}{0.07m \cdot 0.1m \cdot 0.5m \cdot 0.437} = 0.248 \quad (2-8)$$

mit t_G der Gerinnetiefe und l_G der Gerinnelänge

Der Kapillarsaum des Sandes konnte visuell auf ca. 5cm geschätzt werden. Aus bereitgestellten Daten vorangegangener Laborexperimente ([Helm, 2007]) ergab sich mit einer Porosität von $n = 0.437$ und der Gleichung (2-9) nach [Bear, 1988] ein mit der visuellen Abschätzung ($h_{c,vis}$) in etwa übereinstimmender Wert für die Höhe des Kapillarsaums $h_{c,Bear}$ von

$$h_{c,Bear} = \frac{0.45}{d_{10}} \cdot \frac{1-n}{n} = \frac{0.45}{0.08cm} \cdot \frac{1-0.437}{0.437} = 7.24cm \quad (2-9)$$

Die mittlere Pump- bzw. Durchflussrate \bar{Q} konnte mit Hilfe der Waagen der Zulauf- und Ablaufbehälter bestimmt werden und ergab $\bar{Q} = 1.65l \cdot h^{-1}$.

Aus dem Unterschied der Steighöhen der Standrohre ergibt sich der Druckverlust $dh = 6mm$ und mit der Fließstrecke $dx = 0.5m$ folgt das hydraulische Gefälle $i = dx/dh = 0.012$; aus der bekannten Gerinnebreite $b = 0.1m$ und der Einstauhöhe $h_{Einstau} = 0.07m$ kann der Fließquerschnitt A ermittelt werden. Somit ergibt sich mit dem aus den Daten der Waagen

ermittelten Durchfluss Q die hydraulische Leitfähigkeit k_f aus dem Kontinuitätsgrundsatz (2-11) und der Darcy-Gleichung (2-12) zu

$$k_f = \frac{Q \cdot dx}{A \cdot dh} = \frac{4.6 \cdot 10^{-7} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0.5 \text{m}}{0.1 \cdot 0.07 \text{m}^2 \cdot 0.006 \text{m}} = 5.5 \cdot 10^{-3} \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2-10)$$

$$Q = A \cdot v \quad (2-11)$$

$$v = k_f \cdot \frac{dh}{dx} \quad (2-12)$$

Eine weitere Ermittlung des k_f -Wertes erfolgte im Vorfeld durch einen anderen Bearbeiter ([Helm, 2007]) und ergab als Mittelwert $k_f \approx 2.8 \cdot 10^{-3} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Die unabhängig voneinander bestimmten Werte liegen innerhalb des typischen Wertebereichs der hydraulischen Leitfähigkeit von Grobsand [Bear, 1988].

Die Probenahme mit Hilfe der Saugkerzen ergab die in Abb. 2-9 aufgetragene Durchbruchkurven für den Tracer Brilliant Blue. Die Datenwerte 1 entsprechen der vorgelagerten Saugkerze (SK1) oberhalb des Grundwasserspiegels, Werte 2 jener Kerze im hinteren Bereich oberhalb des GWS (SK2), Werte 3 jener im hinteren Bereich unterhalb des GWS (SK3). Die mit SK3 gewonnenen Proben wiesen weder optisch noch photometrisch Anteile von Brilliant Blue auf. SK1 und SK2 zeigen typische Durchbruchverläufe mit einem frühen Maximum und sich anschließend reduzierenden Werten; der Unterschied der beiden Konzentrationsverläufe der SK1 und SK2 (geringeres Maximum, späterer Durchbruch und längerer Auslauf) ergibt sich aufgrund des Abstands der Saugkerzen und der auf dem Fließweg auftretenden Dispersion.

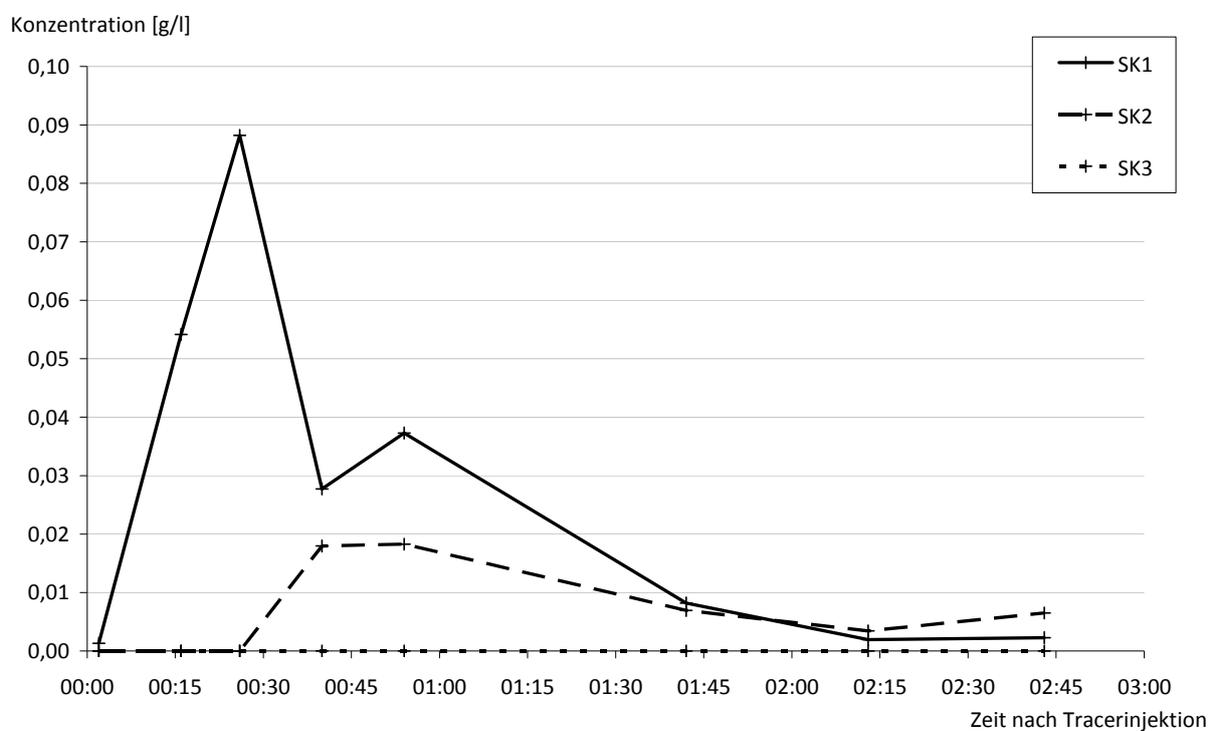


Abb. 2-9 Durchbruchkurve Brilliant Blue, Vorversuch

2.2.3 Erkenntnisse aus dem Vorversuch

Aus dem Vorversuch gehen weiterhin folgende Erkenntnisse hervor: Der Versuchsaufbau wird grundsätzlich für die Durchführung weiterer Experimente und für die Aufgabestellung als geeignet betrachtet.

Optimiert und überarbeitet werden sollten:

- Befestigungen der Zu- und Auslaufschläuche; Aufhängen selbiger, um Beeinflussung der Waagen zu minimieren
- Verdichtung des Bodenmaterials bei Einbau nötig, da Porosität zu hoch
- Einbau unter Überstau zur Minimierung von Luftblasen innerhalb der gesättigten Zone
- Ausleuchtung für Kameraaufnahmen

Problematisch gestaltete sich die Probenahme mit den SMS1 Saugkerzen während des Vorversuchs. Die Kerzen wiesen eine nur sehr geringe Haftung im Boden auf und wurden beim etwas kraftaufwendigen Aufziehen der Spritzen leicht in ihrer Position verändert oder gar herausgezogen. Im Vorversuch mussten die Saugkerzen deshalb vor jeder Probenahme neu im Boden positioniert werden. Für Experiment 1 sind die Saugkerzen, ähnlich dem Aufbau des Saugkerzenbaums in Wagna, in unterschiedlicher Tiefe um eine Metallstange befestigt, welche mit dem Gerinne fest verbunden ist. So wurde gewährleistet, dass die Position der Kerzen während des Versuchs und der Probenahme konstant blieb (siehe dazu Abb. 2-10).

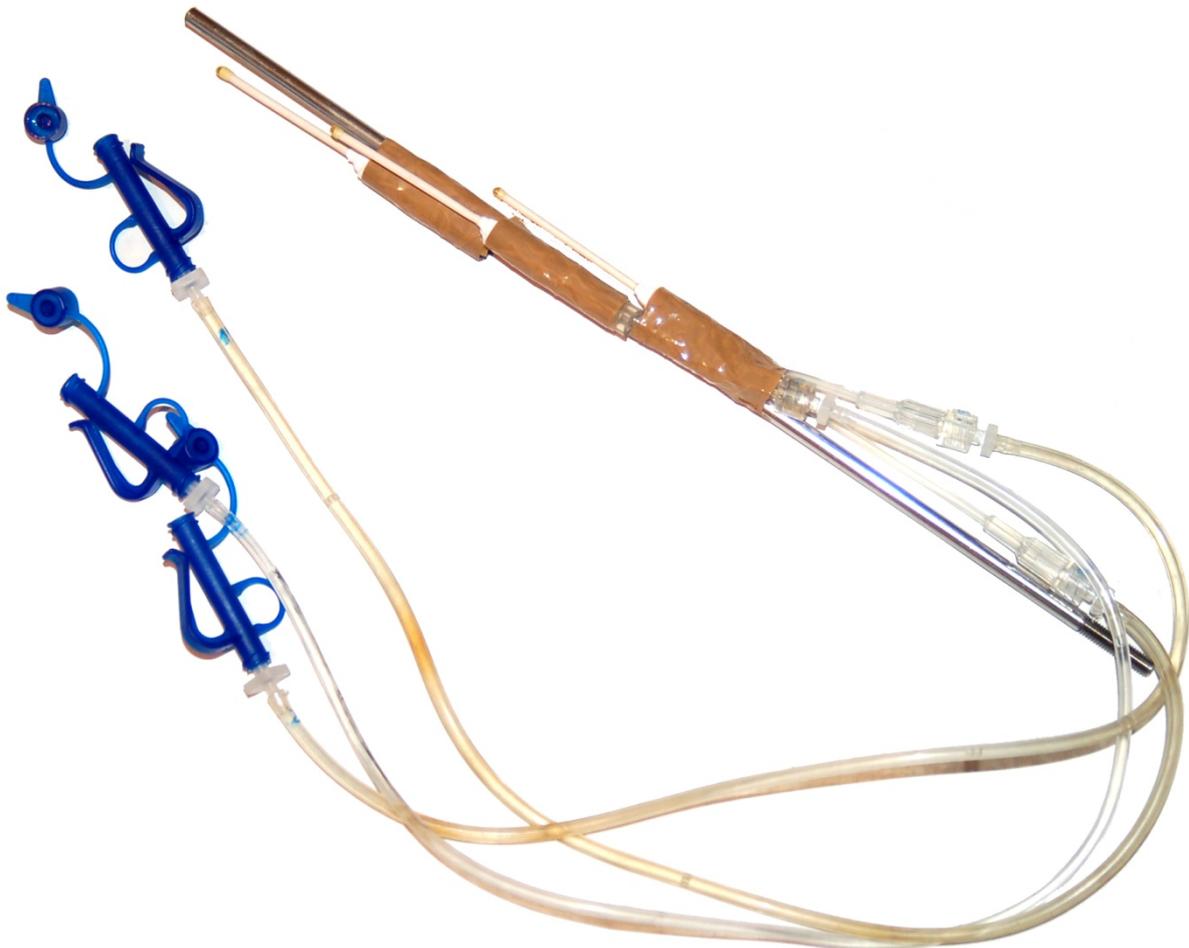


Abb. 2-10 Konstruktion „Saugkerzenbaum“ für Laborversuche

Rhodamin B ist für den Einsatz als Tracer in Verbindung mit dem verwendeten Sand nicht geeignet, da es stark am Boden sorbierte und eine nur sehr geringe Ausbreitungsgeschwindigkeit zeigte. Mit der vorgelagerten Saugkerze (SK1 in Abb. 2-8, Seite 20) konnte es erstmals ca. 10 Stunden nach der Injektion erfasst werden. Nach Versuchsende wies diese Saugkerze eine deutliche Rotverfärbung auf, welche sich nach mehreren Spülvorgängen verringerte, jedoch nicht vollständig zu entfernen war. Auch die hydraulische Leitfähigkeit war signifikant geringer als die der beiden anderen Kerzen. Die offenbar durch das Rhodamin zugesetzte Kerze wurde zur Regeneration für zehn Minuten in ein Ultraschallbad gelegt; anschließend ergaben sich mit den anderen beiden Kerzen vergleichbare Werte der hydraulischen Leitfähigkeit (siehe auch Abschnitt 2.1.4, Seite 15). Beim Ausbau konnte der Teil des Bodens, in welchem sich ein Großteil des Rhodamins befand vom restlichen Teil des Sandes separiert werden. Selbst nach wiederholtem, intensivem Spülen konnte die Einfärbung des Bodens nur geringfügig reduziert werden.

Als Alternative zu Rhodamin B kam der zur Beobachtung von Sickerwasservorgängen oft verwendete nichtfluoreszierende Farbtracer „Brilliant Blue“ zum Einsatz. Die Advektion dieses Tracers war weitaus besser wahrzunehmen und bedeutend schneller als jene von Rhodamin. Auch die Sorption am Modellsand war eindeutig geringer; die Wiedergewinnungsrate wurde auf ca. 0.0217g bestimmt, was etwa 109% des zu Beginn eingebrachten Tracers entspräche – der gemessene Extinktionswert lag allerdings im Grenzbereich der Detektionsmöglichkeit des Photometers, in welchem eine höhere Fehlerstreuung zu erwarten ist. Lediglich in den oberen, ungesättigten Bereichen des Gerinnes waren nach Versuchsende Rückstände des Tracers Brilliant Blue zu erkennen; da die Fließgeschwindigkeiten in jenem ungesättigten Bereich sehr gering sind, wurde der Tracer nur geringfügig transportiert. Die Sorption von Brilliant Blue wird als relativ schwach eingeschätzt, da in den gesättigteren Bereichen mit höherer Fließbewegung nur wenig Rückstände nach Versuchsende festgestellt wurden.

Zum letzten Beprobungszeitpunkt lag die gemessene Konzentration noch weit oberhalb der Detektionsgrenze (siehe Abb. 2-9) – es ist anzunehmen, dass es bei Fortführung des Experiments zu einem weiteren, wenn auch nicht vollständigen Austrag aus jenen Bereichen geringer Sättigung, geringer hydraulischer Leitfähigkeit und geringer Fließgeschwindigkeit gekommen wäre.

2.3 Experiment 1

2.3.1 Ziel, Aufbau und Vorgehen

Mit Hilfe der aus dem Vorversuch gewonnenen Erkenntnisse und den für das künstliche Gerinne sowie den Versuch abgeleiteten Optimierungen und Anpassungen wurde das Experiment 1 (Exp1) durchgeführt. Ziel war zum einen, die Feldsituation der tiefendifferenzierten Messanlage in Wagna abzubilden und zum anderen, die Fließvorgänge und den Stofftransport mit dem Kapillarsaum durch eine Stoffapplikation von der Oberfläche zu visualisieren. Das Szenario soll verdeutlichen, wie bei einer Stoffintrusion (z.B. bei Düngung der landwirtschaftlich genutzten Flächen) die Ausbreitung des Stoffes verläuft. Abb. 2-11 zeigt den Versuchsaufbau für Experiment 1.

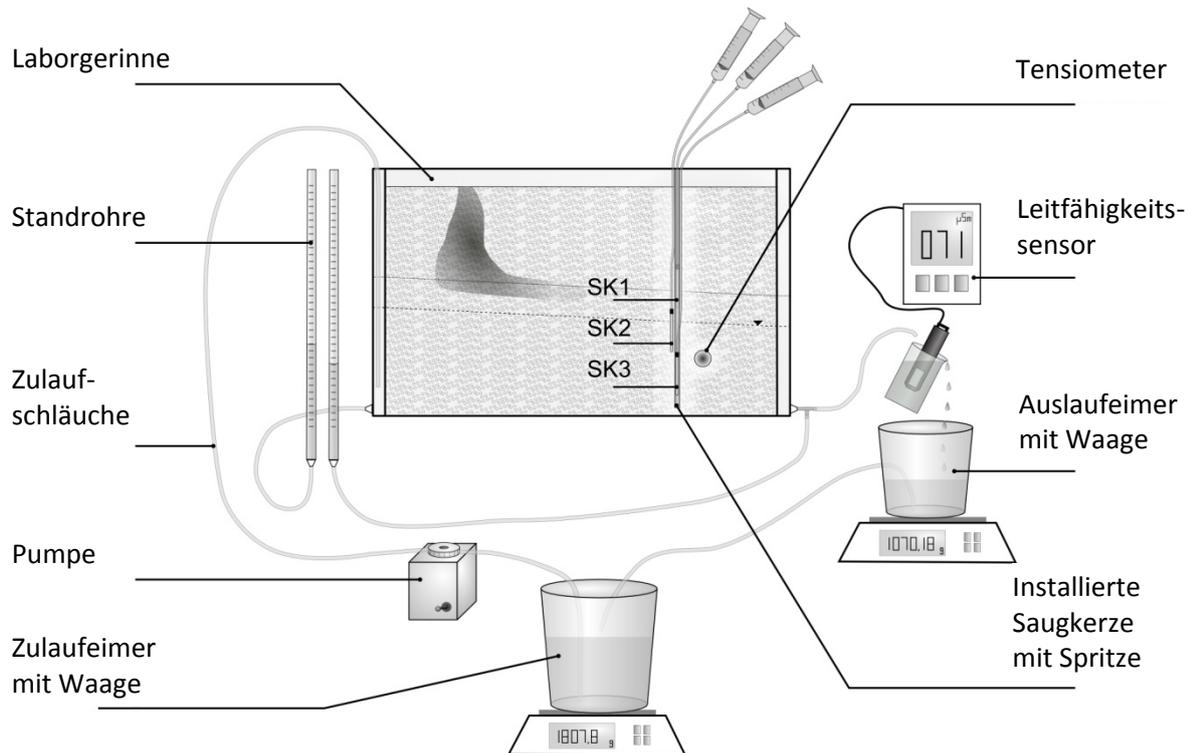


Abb. 2-11 Skizze Versuchsaufbau, Experiment 1

Das Gerinne wurde vollständig mit Grobsand (zuvor mit destilliertem Wasser gewaschen) unter Überstau befüllt; das Material wurde, so gut es von Hand möglich war, mit Hilfe eines metallenen Stößels verdichtet. In Anbetracht der hohen Fragilität der Saugkerzen wurde im Bereich selbiger mit geringerem Kraftaufwand eingebaut und damit weniger stark verdichtet; der sich aufgrund der größeren Porendurchmesser ergebende etwas niedrigere Kapillarsaum ist in Abb. 2-15 beim Durchgang des Tracers als geringe Störung im Strömungsverlauf desselbigen zu erkennen. Nach Fertigstellung des Einbaus wurde der Auslauf geöffnet und der Wasserstand auf ein Niveau 7cm über Gerinneboden abgesenkt. Um sicherzustellen, dass ein stationärer Fließzustand herrscht, wurde das Gerinne vor der Tracerinjektion über mehrere Stunden durchflossen. Die Tracerzugabe erfolgte über die gesamte Gerinnetiefe an der Oberfläche des Sandes ca. 25cm vor dem eingebauten Saugkerzenbaum (Abb. 2-12); zur schnelleren Versickerung des Tracers wurden zusätzlich 20ml Wasser am Injektionspunkt eingebracht. Der Verlauf der Tracerfront wurde beobachtet und die erste Probenahme erfolgte, sobald der Tracer den Saugkerzenbaum erreichte. Im Anschluss wurden in den verschiedenen Tiefen solange Beprobungen durchgeführt, bis visuell nur noch geringe Spuren des Tracers in der jeweiligen Probe festzustellen war.

2.3.2 Ergebnisse des Experiment 1

Infolge der Erfahrungswerte zum Einbau des Modellsandes aus dem Vorversuch konnte bei Experiment 1 ein besserer, realitätsnaher Parameter für die Porosität erlangt werden (Tab. 2-7).

Tab. 2-7 Übersicht Parameter Modellsand, Experiment 1

Versuchsnummer	n [–]	i [%]	$k_{f,Sand}$ [$m \cdot s^{-1}$]	Q [$l \cdot h^{-1}$]	$h_{c,vis}$ [cm]	$h_{c,Bear}$ [cm]
1	0.375	1.0	$4.6 \cdot 10^{-3}$	1.65	5 – 6	9.37



Abb. 2-12 Exp1, Tracerinjektion



Abb. 2-13 Exp1, Tracerverlauf 10min nach Injektion



Abb. 2-14 Exp1, Tracerverlauf 30min nach Injektion



Abb. 2-15 Exp1, Tracerverlauf 40min nach Injektion



Abb. 2-16 Exp1, Tracerverlauf 1h30min nach Injektion



Abb. 2-17 Exp1, Tracerverlauf 7h nach Injektion

Die Abb. 2-12 bis Abb. 2-17 zeigen den Tracerverlauf nach der Tracerinjektion; im Bild wurden zusätzlich die Grenzen des Grundwasserspiegels, des Kapillarsaums sowie die ungefähre Position der eingebauten Saugkerzen eingezeichnet; die gestrichelte Linie zeigt den Grundwasserstand, welcher anhand der beiden Standrohre abgelesen werden kann; die gepunktete Linie symbolisiert die Oberkante des Kapillarsaums, welcher visuell anhand der Porensättigung abgeschätzt wurde. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich der Tracer im oberen Bereich des Kapillarsaums bewegt und über die gesamte Gerinnelänge nicht im Grundwasserstrom ankommt. Die Absenkung des Tracers in der Nähe des Gerinneauslaufs (auf rechter Seite) entsteht durch die Absenkung des Kapillarsaums; an beiden Seiten des Gerinnes befinden sich ca. 2cm lange Abschnitte ohne Sandfüllung mit freier Wasseroberfläche, welche zur beobachteten Störung des Kapillarsaums führen.

Nach der photometrischen Analyse konnten weiterhin die Durchbruchkurven der verschiedenen Probenahmepunkte ermittelt werden (Abb. 2-18). Die obere Saugkerze (SK1 in Abb. 2-18) liegt genau innerhalb der Tracerbahn, SK2 nur zu einem sehr geringen Teil; SK3, welche unterhalb des Grundwasserspiegels Proben nimmt, lieferte keine Tracerspuren. Der Tracer Brilliant Blue wird fast

ausschließlich von der oberen Saugkerze erfasst und nur zu geringen Teilen von SK2. Ferner liegt der Konzentrationspeak der Durchgangskurve bei SK2 vor jenem der SK1, da im stärker gesättigten Bereich auf Höhe der SK2 höhere Fließgeschwindigkeiten als im eher ungesättigten Bereich auf Höhe der SK1 zu vermuten sind.

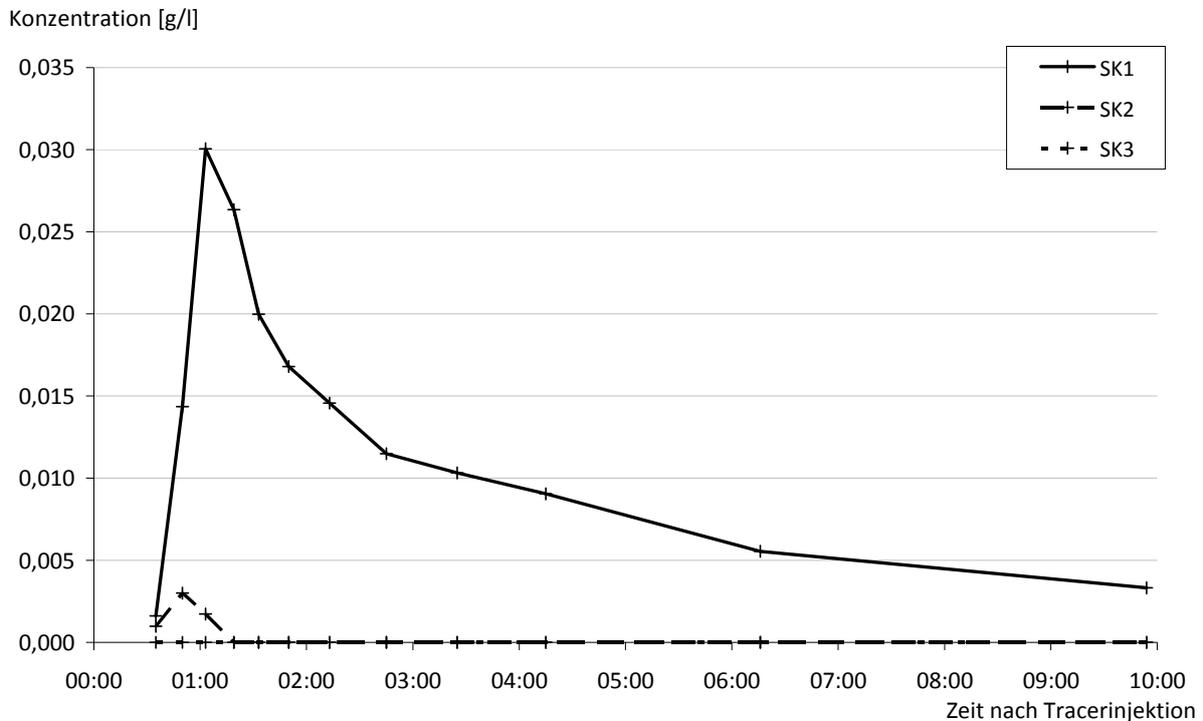


Abb. 2-18 Durchbruchkurve Brilliant Blue in unterschiedlichen Tiefen, Experiment 1

2.3.3 Erkenntnisse aus Experiment 1

Wird ein Stoff in den Untergrund eingebracht (gezielt z.B. durch Düngung oder unabsichtlich bei einem Unfall), so gilt laut den behördlichen Vorschriften als „Ort der Beurteilung“ (vgl. Abschnitt 1.2.1, S. 3 ff.) die Grundwasseroberfläche; die Probenahme erfolgt mit Hilfe von Brunnenbohrungen. Verhält sich ein (Schad-)Stoff so ähnlich wie der Tracer Brilliant Blue, bewegt er sich also schon innerhalb des Kapillarsaums, so ist es fraglich, ob dieser dann über eine Probenahme mit einem Brunnen im Grundwasser nachgewiesen werden kann. Damit sind weiterhin die auf Basis von Grundwasseranalysen durchgeführten Rückschlüsse bezüglich der Konzentration des Stoffes am Ursprungsort äußerst unsicher.

Weiterhin ergeben sich folgende Fragen aus dem Experiment 1:

- Wie lange nach der Applikation bzw. in welcher Entfernung vom Applikationspunkt kommt es stromabwärts zu einer Einmischung des Stoffes/Tracers in das Grundwasser?
- Welchen Einfluss haben Störungszonen oder Inhomogenitäten innerhalb des Aquifers auf die Einmischung des Tracers in das Grundwasser?
- Wie stark wird die Messung im Feld durch den eingebauten Filterkies beeinflusst?

Zur genaueren Untersuchung des Einflusses einer Filterkiesschicht wurde ein zweites Experiment durchgeführt.

2.4 Experiment 2

2.4.1 Ziel, Aufbau und Vorgehen

Das Experiment 2 (Exp2) wurde in zwei Stufen unterteilt. Im ersten Telexperiment A (Exp2A) wurde zum Experiment 1 unter identischen Randbedingungen und nahezu gleicher Position der Tracerinjektion ein Vergleichsversuch durchgeführt. Ziel war es, die im Feld vorhandene Filterkiesschicht mit Hilfe von Glasperlen nachzubilden und den Einfluss dieser auf den Tracerverlauf und die Probenahme zu analysieren.

Im zweiten Teil B (Exp2B) wurde bei erhöhtem Grundwasserstand ein Tracergemisch (Brilliant Blue und Kaliumbromid) im unteren Bereich des Gerinnes eingebracht. Dabei war, unter Annahme horizontaler Fließverhältnisse, die Probenahme innerhalb des gesättigten Grundwasserbereiches von Interesse.

Anmerkung: Die erste Durchführung des Experiments 2A war nicht erfolgreich, die eingebrachte Tracermenge war zu gering und der Tracerverlauf konnte nicht deutlich verfolgt werden. Daher wurde (nach sorgfältigem Spülen der Tracerinjektionsstelle, Erhöhen des Grundwasserspiegels und mehrstündiger Spülphase) zunächst Experiment 2B durchgeführt. Nach Beendigung von Experiment 2B war nach erneutem Spülen keine Verfärbung durch Brilliant Blue im Auslauf erkennbar und im Modellsand kaum noch Rückstände des Tracers zu erkennen. Anschließend wurde das Experiment 2A erfolgreich durchgeführt.

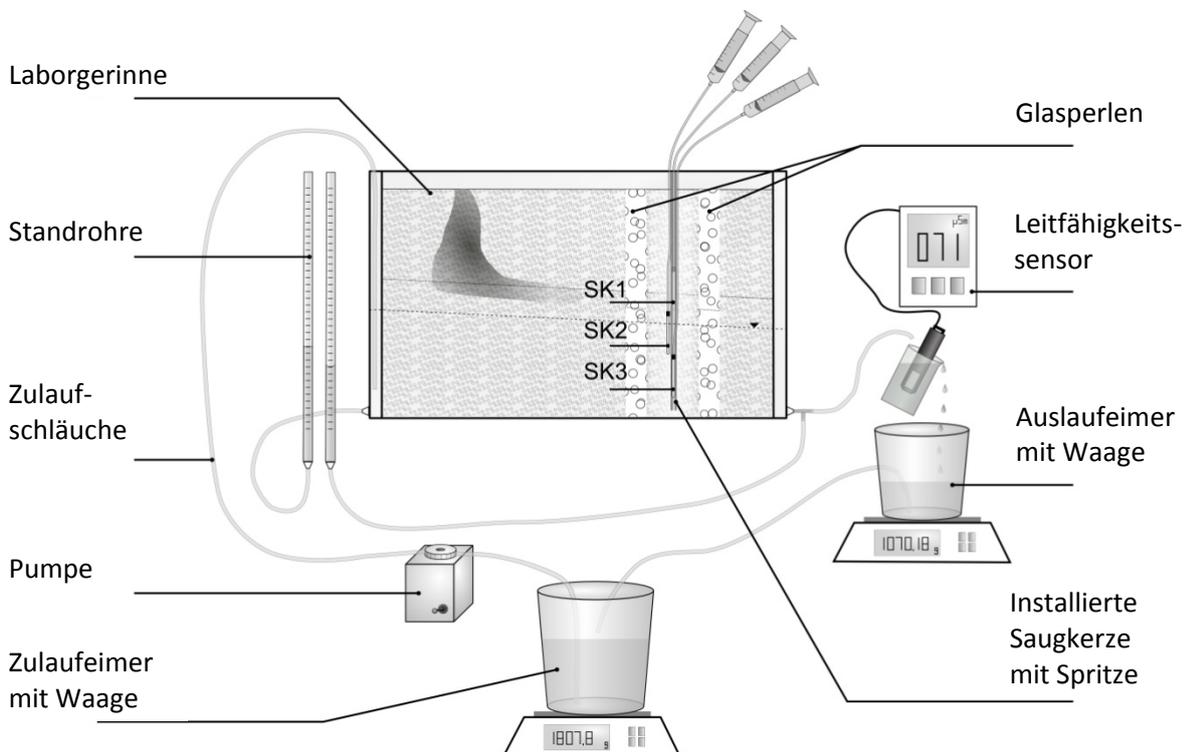


Abb. 2-19 Skizze Aufbau Experiment 2

Der Aufbau der Geräte und der Einbau des Materials erfolgte analog dem bei Experiment 1, allerdings mit dem Unterschied, dass im Umfeld der Saugkerzen zwei vertikale, etwa 3cm breite Bereiche mit Glasperlen (mittlerer Durchmesser Glasperlen $d_{Glas} \approx 2mm$) verbaut wurden (siehe Abb. 2-19 oder dunkelgrüne, vertikale Bereiche in Abb. 2-20 ff.). Diese beiden Schichten, etwa 3cm stromauf- und stromabwärts von der Position des Saugkerzenbaums, wiesen einen deutlich

geringere Kapillarsaumhöhe h_c auf, als die umliegenden Sandbereiche ($h_{c,Sand} \approx 5\text{cm}$, $h_{c,Glas} \approx 2.5\text{cm}$). Das Tensiometer wurde nicht erneut verbaut.

Bei beiden Versuchen der Experimentierphase 2 kam ein Tracergemisch aus Kaliumbromid und Brilliant Blue zum Einsatz ($c_{BB} = 5\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ und $c_{KBr} = 5\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$). Grund dafür war, dass der Experimentaufbau in seiner Form mehrmals Verwendung finden sollte und eine Beeinflussung der Messungen durch möglicherweise resorbierende Tracerstoffe ausgeschlossen werden sollte. Dabei wurde im Experiment 2B Brilliant Blue lediglich zur visuellen Verfolgung genutzt, während die Konzentration von Bromid im Anschluss durch Ionenchromatographie ermittelt wurde (vgl. auch Abschnitt 2.1.6, S. 19).

2.4.2 Ergebnisse des Experiment 2B

Einige versuchsrelevante, hydraulische Parameter sind in Tab. 2-8 gelistet. Der Verlauf des Tracers ist in den Abb. 2-20 bis Abb. 2-25 zusammengefasst dargestellt. Die Tracermischung (Kaliumbromid und Brilliant Blue jeweils mit $c_i = 5\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$) wurde unterhalb des Grundwasserspiegels auf dem Niveau der mittleren Saugkerze ca. 25cm stromaufwärts an mehreren Punkten, möglichst gleichmäßig über die Gerinnebreite verteilt, injiziert; das Injektionsvolumen betrug 20ml.

Der Tracer wird mit der Grundwasserströmung bewegt, sinkt kurz nach der Injektionsstelle jedoch geringfügig ab. Das Absinken kann verschieden interpretiert werden und ist wohl einer Kombination der folgenden, denkbaren Ursachen geschuldet:

- Signifikante Dichteunterschiede zwischen dem verwendeten „Grundwasser“ und der Tracerlösung können ausgeschlossen werden. Die Absinkbewegung erfolgt lediglich auf den ersten Zentimetern, im weiteren Tracerverlauf kann dies nicht mehr festgestellt werden (so kann auch der Tracer weiterhin als solcher zur Beobachtung der Wasserbewegung Verwendung finden).
- Das Einbringen des Tracers im unteren Bereich des Modellbodens musste über mehrere Injektionspunkte erfolgen und war deshalb nicht gleichzeitig und mit exakt denselben Volumina im Gerinne verteilt. Der Einfluss von im Gerinne weiter innerliegender Injektionspunkte könnte die Ursache für die an der Vorderseite beobachtete Bewegung des Tracers sein.
- Die Injektion erfolgte mit Hilfe einer langen Kanüle und einer Spritze. Dabei musste darauf geachtet werden, dass die Injektion nicht zu langsam (möglichst über die gesamte Tiefe des Gerinnes an mehreren Punkten gleichzeitig) und nicht zu schnell (hohe Geschwindigkeiten beim Austritt aus der Kanülenöffnung) erfolgte. Eventuell war die nach unten gerichtete Austrittsgeschwindigkeit die Ursache der Abwärtsbewegung des Tracers.

Tab. 2-8 Übersicht Parameter Modellsand und Glasperlen, Experiment 2A und 2B

Versuchsnummer	$n_{Sand} [-]$	$n_{Glas} [-]$	$i [\%]$	$Q [\text{l} \cdot \text{h}^{-1}]$	$h_{c,vis,Sand} [\text{cm}]$	$h_{c,vis,Glas} [\text{cm}]$
2	0.342	0.389	1.0	1.63	5 – 6	2 – 3

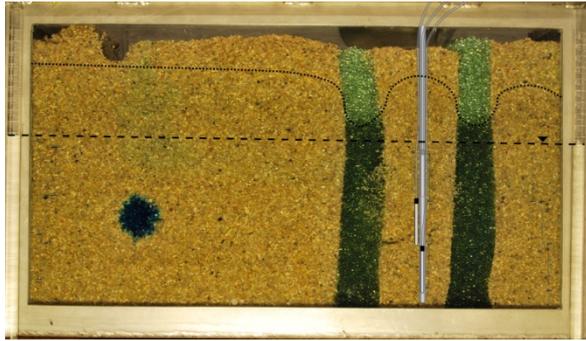


Abb. 2-20 Exp2B, Tracerinjektion

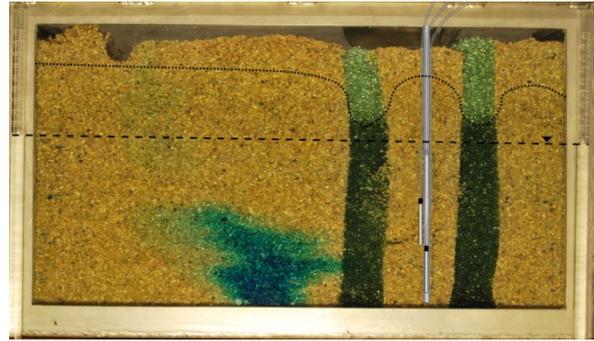


Abb. 2-21 Exp2B, Tracerverlauf 22min nach Injektion

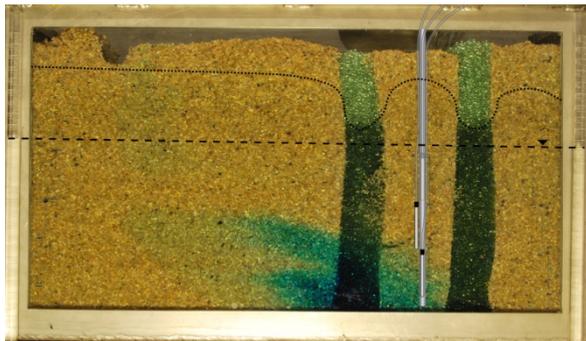


Abb. 2-22 Exp2B, Tracerverlauf 40min nach Injektion

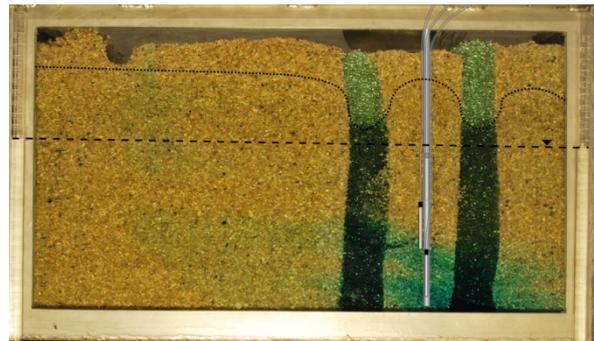


Abb. 2-23 Exp2B, Tracerverlauf 1h nach Injektion

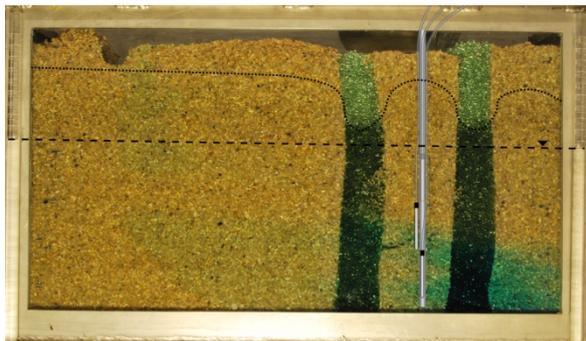


Abb. 2-24 Exp2B, Tracerverlauf 1h15min nach Injektion

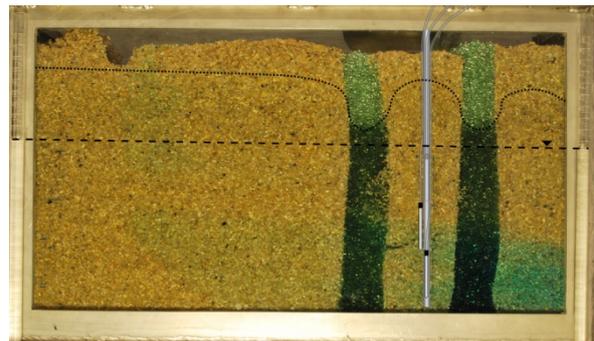


Abb. 2-25 Exp2B, Tracerverlauf 1h30min nach Injektion

Die Störung der Tracerbewegung aufgrund des durch die Glasperlen verwirklichteten Filterbereiches oder des weniger stark verdichteten Gebiets um den Saugkerzenbaum ist nur sehr gering; es kann beim Passieren jener Bereiche keine signifikante Ablenkung der Front beobachtet werden.

Bei der Analyse der Bromidkonzentrationen der unterschiedlichen Probenahmen konnten folgende Durchbruchskurve ermittelt werden (Abb. 2-26). Unter der Annahme, dass sich die beiden gelösten Stoffe Brilliant Blue und Bromid ähnlich verhalten (und als ideale Tracer definiert werden können), gleichen sich die Beobachtungen mit den Auswertungen der Probenahmen. Der Hauptteil des Tracergemisches bewegt sich im unteren Teil des Gerinnes im Bereich der Saugkerze 3 (siehe Abb. 2-23), ein geringerer Anteil im Niveau der Saugkerze 2, während im Abschnitt der obersten Saugkerze 1 kein Tracer erkannt werden kann – so werden die höchsten Bromidkonzentrationen in den Proben von Saugkerze 3 vorgefunden, geringere Werte in jenen von Saugkerze 2 und nur sehr niedrige, vernachlässigbare Bromidanteile in den Probenahmen von Saugkerze 1. Die Hochpunkte der Konzentrationskurven wurden zeitgleich registriert, unterschiedliche Transportgeschwindigkeiten auf unterschiedlichen Höhenniveaus im gesättigten, vom Tracer durchströmten Bereich können nicht

festgestellt werden. Die Wiedergewinnungsrate lag bei ca. 99% der applizierten Tracermenge, was die Eignung von Kaliumbromid als konservativen Tracer unterstreicht. Etwa eine Stunde nach der Tracerapplikation findet sich das Maximum der Kurve, was mit den Beobachtungen der Brilliant-Blue-Migration in etwa übereinstimmt (vgl. Abb. 2-23).

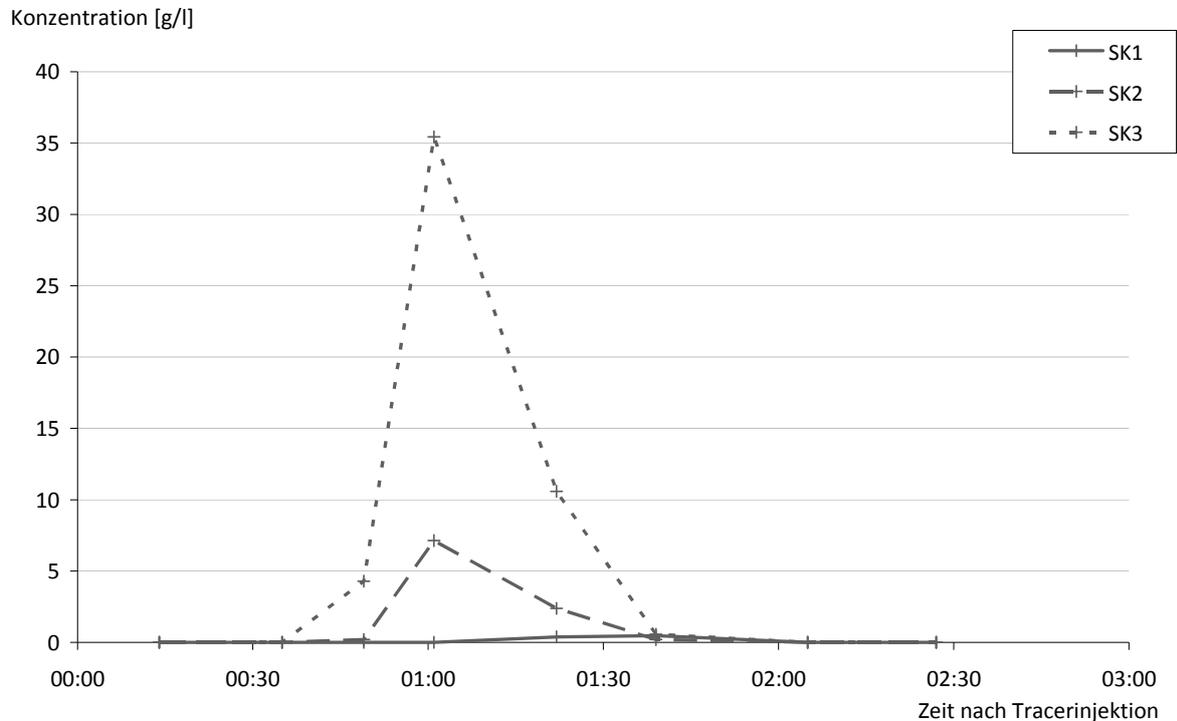


Abb. 2-26 Durchbruchskurve KBr, Experiment 2B

2.4.3 Ergebnisse des Experiment 2A

Wie schon erwähnt, wurde dieses Experiment im Anschluss an Experiment 2B und nach mehrstündiger Spülphase durchgeführt. Die Abb. 2-27 bis Abb. 2-32 verdeutlichen, im Vergleich zu Experiment 1 ohne „Glasperlen-Filterkies“, dass aufgrund des im Vergleich zum umliegenden Material nur etwa halb so hohen Kapillarsaums innerhalb der Glasperlen die Fließbewegung des Tracers stark gestört wird.

Die Tracerapplikation erfolgte in etwa im selben Abstand zum Saugkerzenbaum, wie bei Experiment 1. Zu Beginn verläuft die Tracerbahn wie bei Exp1 – aufgrund der zusätzlichen Injektion von 20ml Wasser ergibt sich eine relativ schnelle Vertikalbewegung durch die ungesättigte Zone bis zur Oberkante des Kapillarsaums und eine horizontale Mitführung innerhalb der oberen Zentimeter selbigen, während ein Teil des Tracers in der ungesättigten Zone verbleibt und sich nur sehr langsam in horizontaler Ebene fortbewegt.

Zwischen beiden Glasperlenschichten und nach Austritt aus der zweiten Schicht bewegt sich der Tracer wieder auf sein vorheriges Höhenniveau innerhalb des Kapillarsaums zurück. Allerdings ist eine starke Aufweitung der Tracerfront in vertikaler Richtung erkennbar – die linksseitig von den Glasperlen zunächst recht geringe vertikale Ausdehnung ist, nach dem Durchfließen der ersten Filterschicht, deutlich größer. Die geringere Höhenlage des Tracers nach der zweiten Filterschicht ist der schon geschilderten Reduktion des Kapillarsaums und dem Einfluss des Auslaufs geschuldet.



Abb. 2-27 Exp2A, Tracerinjektion



Abb. 2-28 Exp2A, Tracerverlauf 12min nach Injektion



Abb. 2-29 Exp2A, Tracerverlauf 20min nach Injektion

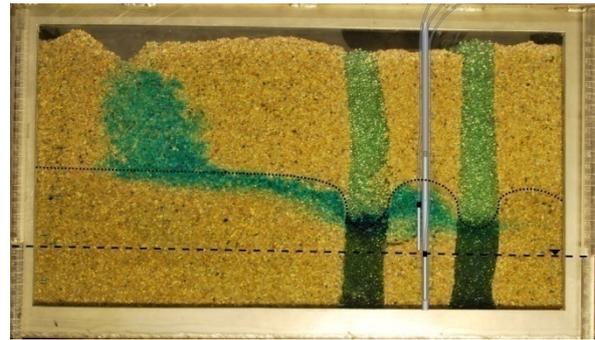


Abb. 2-30 Exp2A, Tracerverlauf 35min nach Injektion

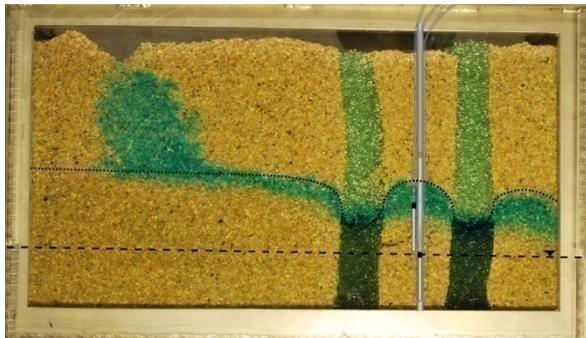


Abb. 2-31 Exp2A, Tracerverlauf 1h nach Injektion



Abb. 2-32 Exp2A, Tracerverlauf 5h nach Injektion

Abb. 2-33 zeigt die ermittelte Durchbruchskurve an den Saugkerzen. Die beschriebene vertikale Aufweitung der Tracerfront spiegelt sich auch in den ermittelten Laborwerten wieder: die höchsten Konzentrationswerte werden an SK1 ermittelt, SK2 liefert geringere Werte, in den Proben von SK3 kann kein Tracer gefunden werden. Dabei wird das Konzentrationsmaximum zuerst bei SK2, anschließend bei SK1 registriert. Die Rückgangskurve zeigt für beide Messpunkte einen typischen Verlauf. Der bei SK2 zeitiger verzeichnete Scheitelpunkt der Durchbruchskurve ist wiederum auf die in jenem Höhenniveau, aufgrund höherer Sättigung zu vermutenden, größeren Fließgeschwindigkeiten zurückzuführen. Die Wiedergewinnung bei Experiment 2A war mit ca. 55% relativ gering; das Experiment wurde fortgeführt, solange im Auslass eine signifikante Färbung des Wassers erkennbar war. Abb. 2-32 lässt erkennen, dass auch nach fünf Stunden Versuchsdauer der in der ungesättigten Zone befindliche Tracer sich kaum verlagert hat und noch relativ große Mengen Brilliant Blue sich im Gerinne befinden. Von der weiteren Fortsetzung des Experiments wurde allerdings abgesehen, da die Verdünnung des wiedergewonnenen Tracers zu hoch geworden und damit der Wert der Nachweisbarkeitsgrenze bei der photometrischen Analyse eventuell unterschritten worden wäre.

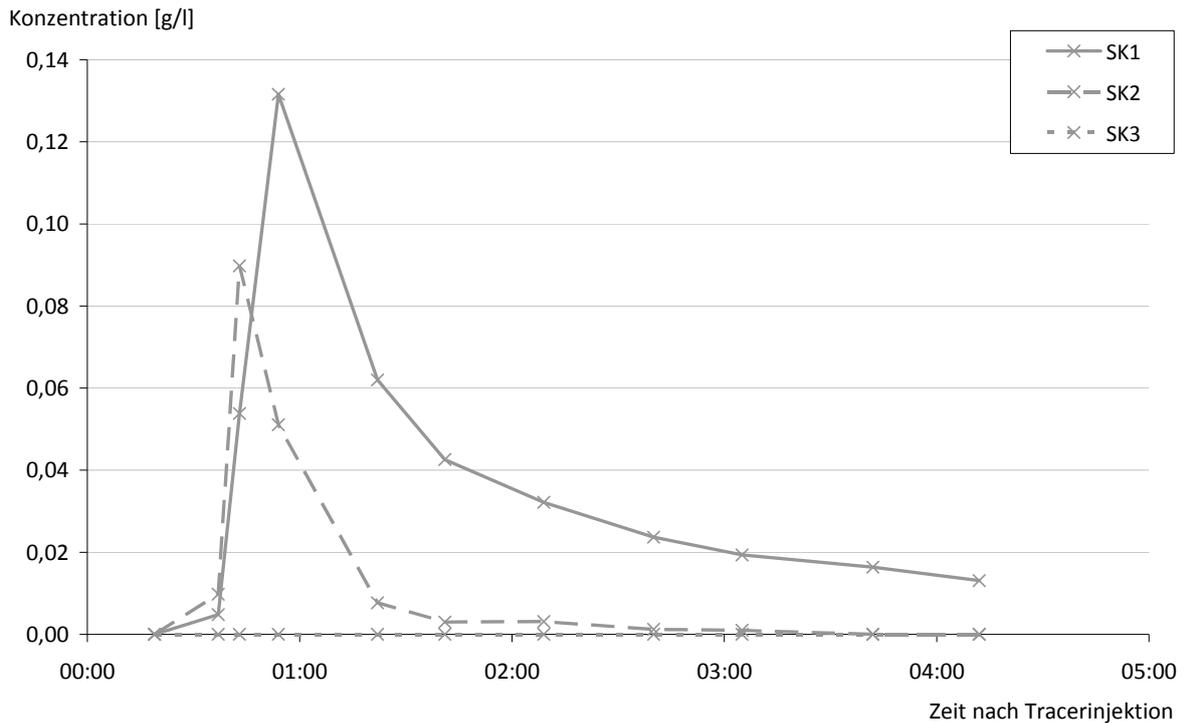


Abb. 2-33 Durchbruchskurve Brilliant Blue, Experiment 2A

2.4.4 Vergleich von Experiment 1 und Experiment 2A

In Abb. 2-34 sind die Tracerbahnen aus Experiment 1 (grün eingefärbt) und Experiment 2A (rot eingefärbt) zum direkten Vergleich übereinandergelegt. Zudem sind die Position des Saugkerzenbaums, der Grundwasserspiegel (gestrichene Linie – obere entspricht jener von Experiment 1; untere Experiment 2A) und die kapillare Steighöhe (gepunktete Linie – gerade Führung, ohne Störung entspricht Experiment 1; geschwungene Führung, mit Störung, Experiment 2) approximiert.

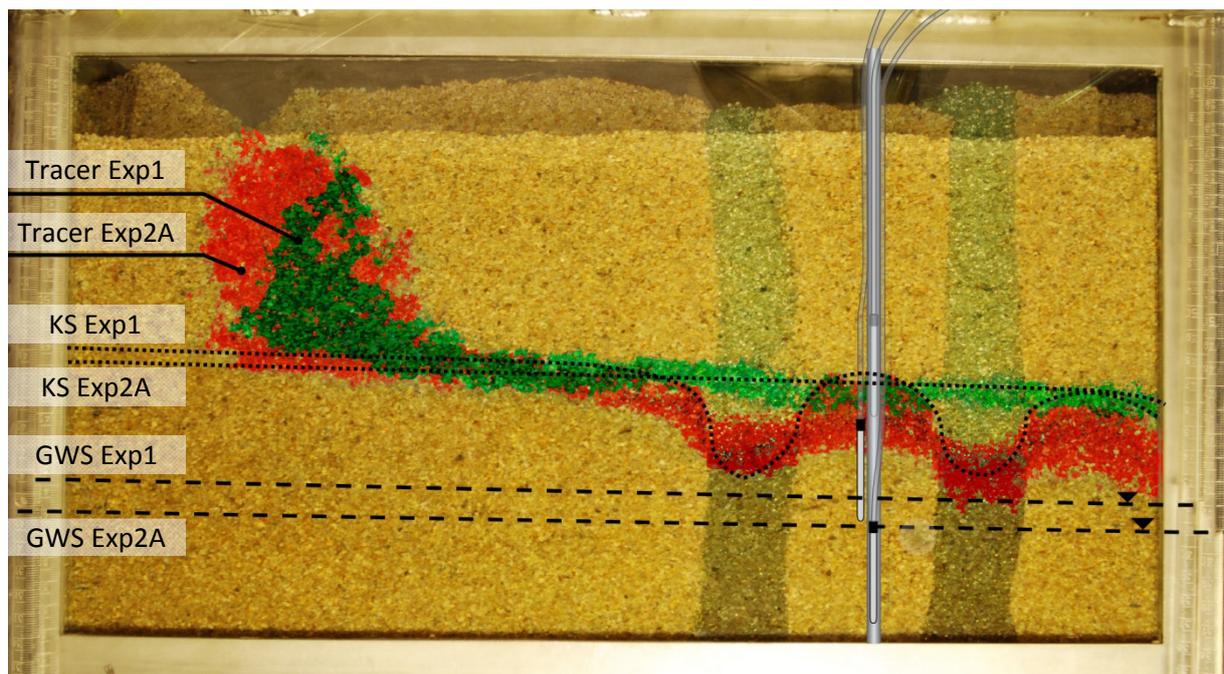


Abb. 2-34 Vergleich Tracerbahnen; grün: Experiment 1 ohne Glasperlenfilter, rot: Experiment 2A mit Glasperlenfilter

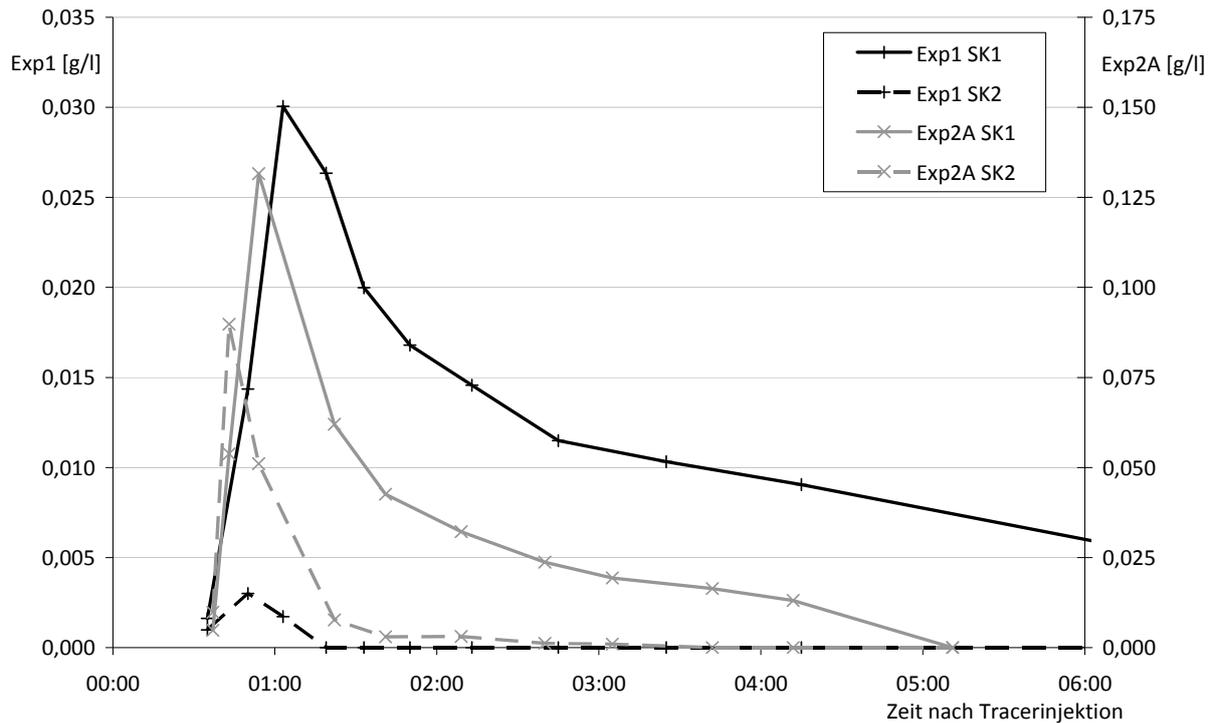


Abb. 2-35 Vergleich Durchbruchkurven Brilliant Blue, Experiment 1 und Experiment 2A

Abb. 2-35 beinhaltet die ermittelten Durchbruchkurven von Brilliant Blue an den Saugkerzen 1 (oberste SK) und 2 (mittlere SK). Die Tracerapplikation von Experiment 2A hatte eine fünfmal höhere Konzentration ($c_{BB} = 5g \cdot l^{-1}$) als jene bei Experiment 1 ($c_{BB} = 1g \cdot l^{-1}$). Daher ist auf der linken Ordinate die Skala für Experiment 1 aufgetragen, auf rechter Seite, in einem Verhältnis 1:5, die Skala für Experiment 2A. Aus Abb. 2-35 geht Folgendes hervor:

- Die Form der den jeweiligen Saugkerzen zugehörigen Konzentrationsverläufe ist prinzipiell identisch – starker, schneller Anstieg bis zu einem Maximalwert, Konzentrationsrückgang über längeren Zeitraum und Annäherung an Grenzwert der Nachweisbarkeit (bzw. Null).
- Die Maxima der Durchbruchkurven ergeben sich für beide Saugkerzen bei den Experimenten zu nahezu identischen Zeitpunkten. Die gemessene Konzentration wurde jeweils zum Zeitpunkt des Beginns der Probenahme aufgetragen – die sich somit ergebenden „Zeitfenster“ überlappen bei beiden Maxima der Saugkerzen 1 und 2.
- Bei Experiment 2A sind die gemessenen Konzentrationswerte von SK2 (relativ gesehen) deutlich höher als bei Experiment 1. Im Gegenzug ergeben sich geringere Konzentrationen für SK1 bei Experiment 2A im Vergleich mit Experiment 1. Dies ist der Störung durch die Filterschicht und der damit verbundenen und oben geschilderten Aufweitung der Tracerfront zuzuweisen – ein Großteil des Tracers bewegt sich nach der Filterschicht in einem niedrigeren Niveau und wird damit eher von Saugkerze 2 erfasst. Inhomogenitäten innerhalb des Laborsandes können aufgrund der gleichförmigen Kornverteilung und gleichen Einbauverfahren bei den Experimenten als Ursache dafür ausgeschlossen werden.
- Ein großer Teil des Tracers verbleibt bei Experiment 2A in der ungesättigten Zone und wird nicht weiter ausgetragen, was sich in geringeren Konzentrationen im Ablauf der Kurve widerspiegelt.

2.4.5 Erkenntnisse aus den Experimenten 2A und 2B

Bei einer Störung des Kapillarsaums kommt es zu einer unmittelbaren Veränderung der Konzentrationsverteilung der auf oder innerhalb des Kapillarsaums transportierten, gelösten Stoffe (siehe dazu Abb. 2-34). Auf Basis des Experimentes 2A ist zu vermuten, dass es beim Anstrom an den Saugkerzenbaum in Wagna zu einer Veränderung der Zusammensetzung des Kapillarsaumwassers durch die verbaute Filterstrecke kommt. Daraus ergibt sich die Frage, nach welcher Fließstrecke oder durch welche Form einer Störung im Kapillarsaum (feinere Ablagerungen, wie z.B. Tonlinsen oder größere Anteile, wie Kies) das Einmischen eines gelösten Stoffes in den Grundwasserleiter stattfindet oder welchen Einfluss der Umfang einer solche Störung auf den Stofftransport im Kapillarsaum hat. Auch ist zu untersuchen, wie weit der Einfluss der Störung des Kapillarsaums durch ein Material in den umgebenden Aquifer hineinreicht und welche Parameter das Ausmaß dieser Störung beschreiben. Diese Fragestellung gilt es durch geeignete Experimente oder mit Hilfe numerischer Modelle zu untersuchen. Der Einfluss der Filterschicht auf die Lösungsverteilung innerhalb der gesättigten Zone wird als vernachlässigbar gering eingeschätzt, da die Tracerfront hauptsächlich von Saugkerze 3 und nur zu geringen Teilen von Saugkerze 2 erfasst wird (Experiment 2B).

Ferner geht aus Experiment 2A anhand der geringen Wiedergewinnungsrate und des im Gerinne verbliebenen Tracers (vgl. Abb. 2-32) hervor, dass die Fließbewegung im ungesättigten Bereich äußerst gering ist.

2.5 Zusammenfassung der Laborexperimente

Zeitrafferanimationen sind im digitalen Anhang hinterlegt (vgl. Abschnitt 5, S. E).

Mit den durchgeführten Experimenten innerhalb des künstlichen Gerinnes war es möglich:

- den Tracerverlauf in der SUIR zu visualisieren,
- mit Hilfe von photometrischen und ionenchromatographischen Analysen die tiefenspezifische Entnahme quantitativ zu beschreiben sowie
- die Feldsituation der Anlage Wagna inklusive Saugkerzenbaum und Filterbereich (Glasperlen) nachzubilden.

Anhand des Experimentaufbaus und den Varianten desselben ließ sich erkennen und ableiten, dass:

- der Tracer, nachdem dieser die ungesättigte Zone passiert hat, im oberen Bereich des Kapillarsaums (bzw. der SUIR), bevor dieser die Grundwasseroberfläche erreicht hat, dem Grundwasserstrom folgend, mitgeführt wird und
- tiefendifferenziert mit Hilfe des adaptierten Saugkerzenbaums erfasst werden kann,
- eine Störung des Kapillarsaums durch eine Veränderung im Kornspektrum den Fließweg und die (vertikale) Verteilung eines innerhalb der SUIR transportierten Stoffes entscheidend beeinflusst und
- die durch den Filterkies verursachte Störung in der Stoffverteilung bei der Probenahme mit dem Saugkerzenbaum nachgewiesen werden kann (Vergleich Experiment ohne bzw. mit Glasperlen).

3 SIMULATIONEN MIT EINEM NUMERISCHEN MODELL

Sowohl die Laborexperimente als auch die Feldsituation wurden mit der Software HYDRUS 2D/3D (Version 1.05, Fa. pc-progress s.r.o.) in einem dreidimensionalen Modell realisiert. Das Programm HYDRUS löst iterativ, unter anderem, die Grundwasserströmungsgleichung im gesättigten und ungesättigten Bereich. Ziel der Simulationen waren in beiden Fällen die Bestimmung des Einzugsgebietes der einzelnen Saugkerzen sowie die Evaluation verschiedener Szenarien bei Variation der bestehenden Anlage im Feld beziehungsweise eine, in der Arbeit lediglich als Ausblick dargestellte, ungefähre Abschätzung des Ablaufs der Laborexperimente. Die jeweiligen HYDRUS-Modelldateien sind dem digitalen Anhang angefügt (vgl. Abschnitt 5, S. E).

Die konzeptionellen Anforderungen zur Ermittlung des Einzugsgebietes der Saugkerzen erforderte die Umsetzung der Situation in einem 3D-Modell: eine zweidimensionale Betrachtung, wie in Abb. 3-1 dargestellt, simulierte die Saugkerzen in unendlicher Ausdehnung in dritter Raumdimension, was eine Umströmung der Kerzen im Ruhezustand lediglich ober- und unterhalb zuließe, die realen Strömungsverhältnisse nicht abbildete und damit die Problemstellung nicht ausreichend befriedigend beantwortete.

Als Bodenwassermodell wurde in HYDRUS für alle Simulationen das Mualem-van-Genuchten-Modell nach [Mualem, 1976] und [Genuchten, 1980] gewählt; zur Parametrisierung siehe entsprechende Absätze im Folgenden.

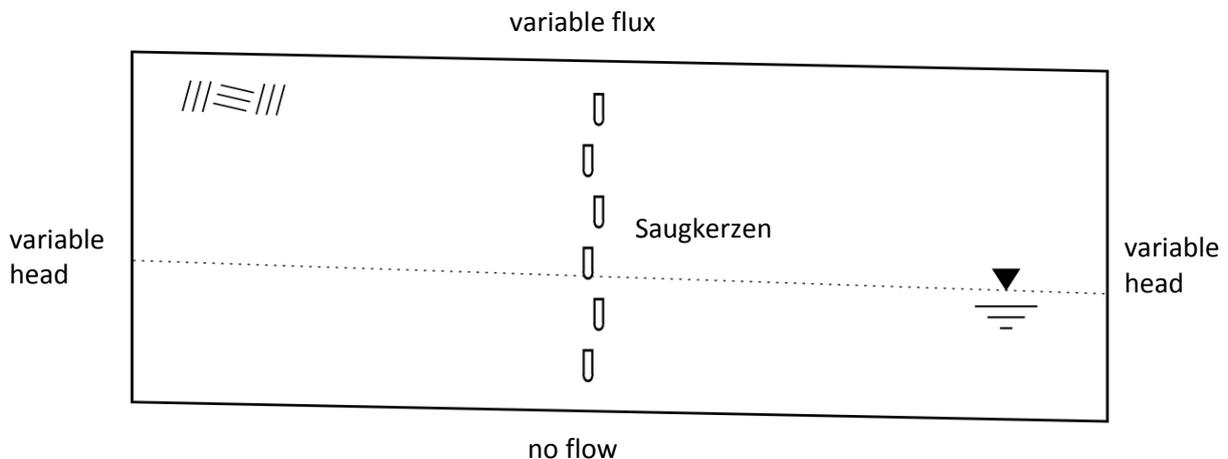


Abb. 3-1 Konzeptionelles Modell, 2D

3.1 Simulation der Gerinneexperimente

3.1.1 Motivation

Die Simulationen der Laborexperimente dienten zur Untersuchung des Einzugsbereichs der Saugkerzen SMS1 in Experiment 1 bzw. 2 und sollten verdeutlichen, dass die Position der Saugkerzen dem Ort der Probenahme entspricht und damit die ermittelten Durchbruchkurven nicht nur zufällig mit den visualisierten Fließwegen des Farbtacers Brilliant Blue übereinstimmen. Auch zeigt dies, dass die konzeptionelle Idee der tiefengestaffelten Messvorrichtung mit Hilfe von Saugkerzen erfolgreich zur profilspezifischen Beprobung verwendet werden kann.

Ferner galt es, für die größer dimensionierte Simulation der Feldsituation, Erfahrung und Kenntnisse bei der Modellanwendung bezüglich numerischer Umsetzung des konzeptionellen Modelles, Initial- und Randbedingungen sowie der Parametrisierung zu erlangen.

Anmerkung: Eine numerische Simulation des Stofftransports wurde nur ansatzweise aus Interesse mit gegebenen Standardparametern von HYDRUS durchgeführt. Die Ermittlung spezifischer Transportparameter (z.B. Dispersionslänge, Diffusionskoeffizient u.a.) hätte den zeitlichen Rahmen der Arbeit überschritten, weshalb auf eine Behandlung dieses komplexen Themengebiets verzichtet wird. Eine Simulation inklusive Stofftransport wird als ausstehende Aufgabe, besonders unter Beachtung der Ausführungen in Abschnitt 2.4.5, S.35 ff., gesehen.

3.1.2 Konzeptionelles und numerisches Modell

Das konzeptionelle Modell ist in **Abb. 3-2** skizziert. Für die Simulation wurde die Länge des Gerinnes auf 60cm erhöht, um den Einfluss der Randbedingungen zu minimieren. Die in Experiment 2 eingesetzten Glasperlen wurden im gekennzeichneten Bereich realisiert, die Höhe des Grundwasserspiegels ist variabel.

Als oberstromige Randbedingung wurde der aus den verfügbaren Daten abgeleitete Zufluss der Pumpe, über die mit Hilfe der Standrohre erfassten Einstauhöhe und der damit bekannten Fließfläche, als Neumann-Randbedingung (Randbedingung 2. Art) angesetzt. Der Ausfluss wurde mit der Randbedingung „seepage face“ bestimmt. Ferner wurde im Bereich des Zu- und Ausflusses die Mualem-van-Genuchten-Parameter des Materials unter Beachtung numerischer Stabilität bei der Iteration variiert, um den Einfluss auf das innere Modellgebiet gering zu halten und gleichzeitig die an beiden Rändern des Laborgerinnes befindlichen Gebiete mit freier Wasseroberfläche nachzubilden (vgl. dazu weiterhin eingehend die Ausführungen zur Simulation der Feldanlage in Abschnitt 3.2.4, „Szenarios, Anfangs- und Randbedingungen“, S.56 ff.).

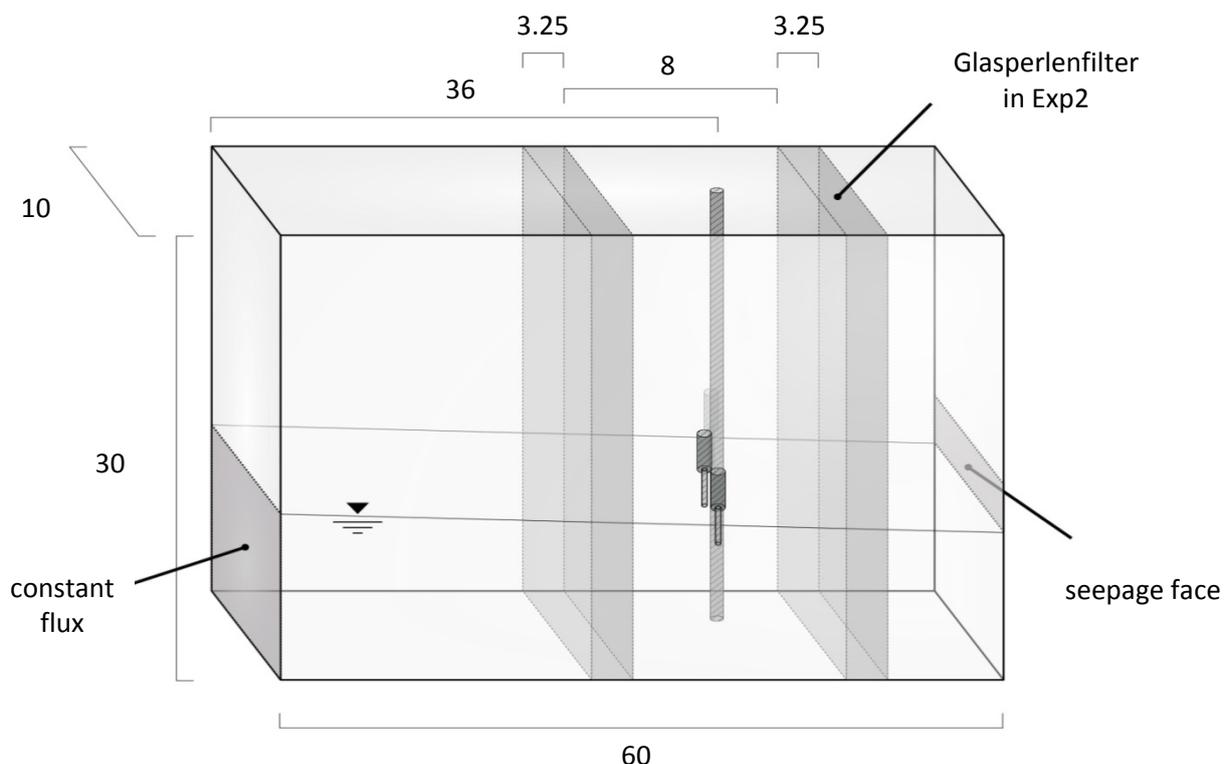


Abb. 3-2 Konzeptionelles Modell, Labor, Maße in [cm], Abbildung nicht maßstabgetreu

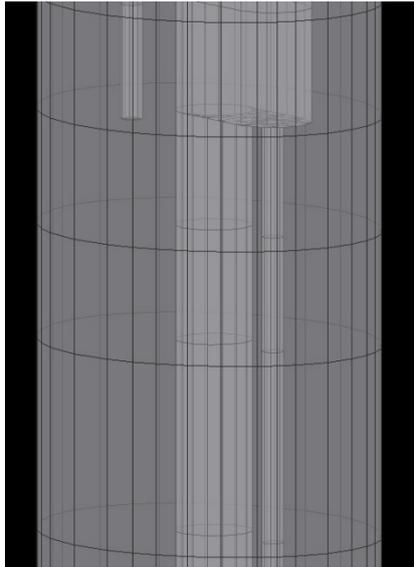


Abb. 3-3 Numerisches Modell, Labor, Ausschnitt Saugkerzenbaum Layer 13-16 (SK2, SK3); Höhe 3.5cm, Breite 2.5cm

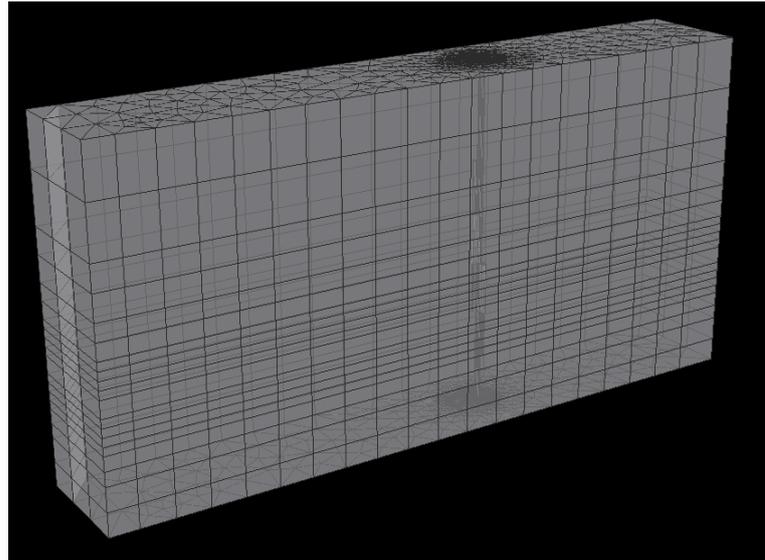


Abb. 3-4 Numerisches Modell, Labor, 3D-Sicht; Länge 60cm, Höhe 30cm, Tiefe 10cm

Das Gestänge zur Befestigung der Saugkerzen sowie der innere Bereich des porösen Materials wurden aus dem numerischen Modell entfernt und dienten somit als Strömungshindernis (Gestänge) bzw. zur Lokalisation der Flussrandbedingung (Saugkerzen), siehe auch Abb. 3-6, S. 41. Für die Parametrisierung der Randbedingung der Saugkerzen wurden wiederum Laborwerte herangezogen: die Probenahme erfolgte nahezu kontinuierlich, das durchschnittliche Probevolumen innerhalb von 10min betrug ca. 3ml; dieser Flusswert wurde in das Modell als „constant flux“-Randbedingung entsprechend integriert. Es erfolgte eine vertikale Unterteilung des Modells in neunzehn Layer; im Bereich der Saugkerzen wurde die Layerhöhe für eine größere Auflösung verringert (siehe Tab. 3-2). Die Abb. 3-3 und Abb. 3-4 zeigen die numerische Umsetzung des konzeptionellen Modells.

Parametrisierung Mualem-van-Genuchten-Modell

Ausgehend von den durch hydraulische Analysen erlangten Mualem-van-Genuchten-Parametern ergab sich ein gewisser Variationsbereich selbiger. Unter Beachtung der Beobachtungen und Auswertungen der Experimente konnten einige der Parameter näherungsweise bestimmt werden; andere Werte mussten geschätzt werden. Tab. 3-1 gibt eine Übersicht, wie die jeweiligen Parameter ermittelt wurden.

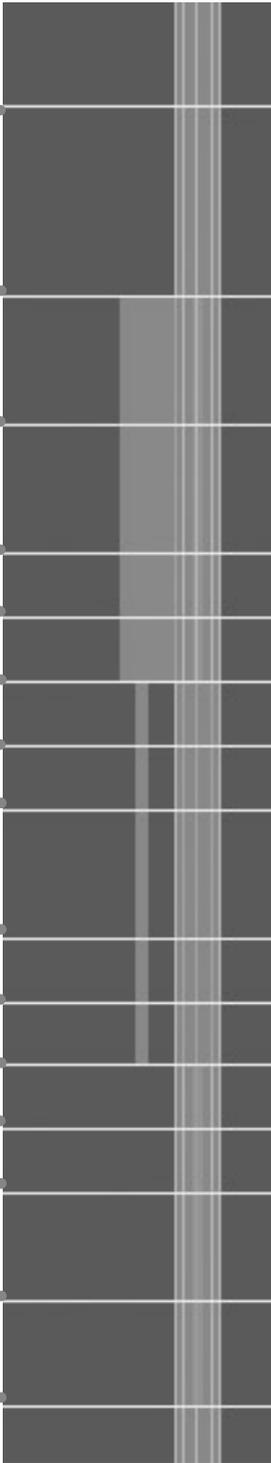
Tab. 3-1 Übersicht Ermittlung Mualem-van-Genuchten-Parameter, Laborsimulation

Nr.		θ_r [-]	θ_s [-]	α [cm^{-1}]	n_{MvG} [-]	$k_{s,h}$ [$cm \cdot d^{-1}$]	i [-]
1	Modellsand	LA	LA, E	LA, E	LA, E	LA, E	S
2	Glasperlen	S	E	E	S	D	S
3	Saugkerzen	S	S	S	S	E	S
4	Randbereich	F	F	F	F	F	F

mit LA – gegebene Werte aus vorangegangener Laboranalyse, D – über Darcyanlage bestimmt, E – abgeleitet aus Gerinneexperiment, S – Schätzung, F – über pF-Kurve angepasste Werte

Tab. 3-2 Vertikale Unterteilung numerisches Modell, Labor

Layer	Mächtigkeit [cm]	Tiefe [cm]	Bemerkung
1	4.50	4.50	
2	4.50	9.00	
3	2.25	11.25	Befestigung SK1
4	2.25	13.50	Bef. SK1
5	1.50	15.00	Bef. SK2 + por. Teil SK1
6	1.50	16.50	Bef. SK2 + por. Teil SK1
7	0.75	17.25	Bef. SK2 + por. Teil SK1
8	0.75	18.00	Bef. SK2 + por. Teil SK1
9	0.75	18.75	Bef. SK3 + por. Teil SK2
10	0.75	19.50	Bef. SK3 + por. Teil SK2
11	1.50	21.00	Bef. SK3 + por. Teil SK2
12	0.75	21.75	Bef. SK3 + por. Teil SK2
13	0.75	22.50	Bef. SK3 + por. Teil SK2
14	0.75	23.25	Por. Teil SK3
15	0.75	24.00	Por. Teil SK3
16	1.25	25.25	Por. Teil SK3
17	1.25	26.50	Por. Teil SK3
18	2.10	28.60	
19	2.10	30.70	



Die Ermittlung der Parameter des Modellsandes ist in Abschnitt 2.1 und den entsprechenden Unterkapiteln, S. 13 ff., angeführt. Die Parametrisierung der Glasperlen erfolgte zum Teil mit Laboranalytik (Darcy-Versuch für hydraulische Leitfähigkeit, Feststoffdichte mit Pyknometer für Porosität), partiell wurden bei der Auswertung der Experimente Parameter ermittelt (Lagerungsdichte für Porosität, kapillare Steighöhe für α). Der Residualwassergehalt θ_r und der Mualem-van-Genuchten-Beiwert n_{MVG} der Glasperlen wurden in Anlehnung an einen Filterkies geschätzt.

Die hydraulische Leitfähigkeit der Saugkerzen wurde in einem Laborversuch näherungsweise bestimmt (Abschnitt 2.1.4, S. 15 ff.). Die restlichen Parameter wurden von einem Schluff der HYDRUS-Datenbank übernommen. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte, dass eine Veränderung der Parameter (außer der hydraulischen Leitfähigkeit) keinen Einfluss auf die Leistung der Saugkerze im Modell hat (vgl. Abschnitt 3.2.3, S. 50 ff.).

Die Mualem-van-Genuchten-Parameter der Randgebiete wurden an die Erfordernisse (schneller Ausgleich des Einflusses der Randbedingungen), ohne physikalischen Bezug angepasst.

Die hydraulischen Materialparameter der Simulation sind in Tab. 3-3 angeführt; Abb. 3-5 zeigt die Parameter in einer Grafik.

Das Laborgerinne wurde mehrere Stunden vor Versuchsbeginn durchflossen, sodass sich ein nahezu stationärer Fließzustand ausbilden konnte. Daher wurde die Simulationszeit des numerischen Modells, mit einer Schätzung der Druckverteilung als Anfangsbedingung, für einen langen Zeitraum angesetzt und ein Zeitpunkt, bei welchem stationäre Verhältnisse existent waren, als neue Anfangsbedingung in das Modell integriert. Anschließend konnte nach kurzer Modellzeit der Zeitpunkt für die Auswertung der Modellergebnisse festgelegt werden.

Tab. 3-3 Übersicht Mualem-van-Genuchten-Parameter, Laborsimulation

Nr.		θ_r [-]	θ_s [-]	α [cm^{-1}]	n_{MvG} [-]	$k_{s,h}$ [$cm \cdot d^{-1}$]	i [-]
1	Modellsand	0.110	0.35	0.150	5	40135	0.5
2	Glasperlen	0.110	0.357	0.50	5	34500	0.5
3	Saugkerzen	0.034	0.46	0.016	1.37	6	0.5
4	Randbereich	0.010	0.80	5	5	10^8	0.5

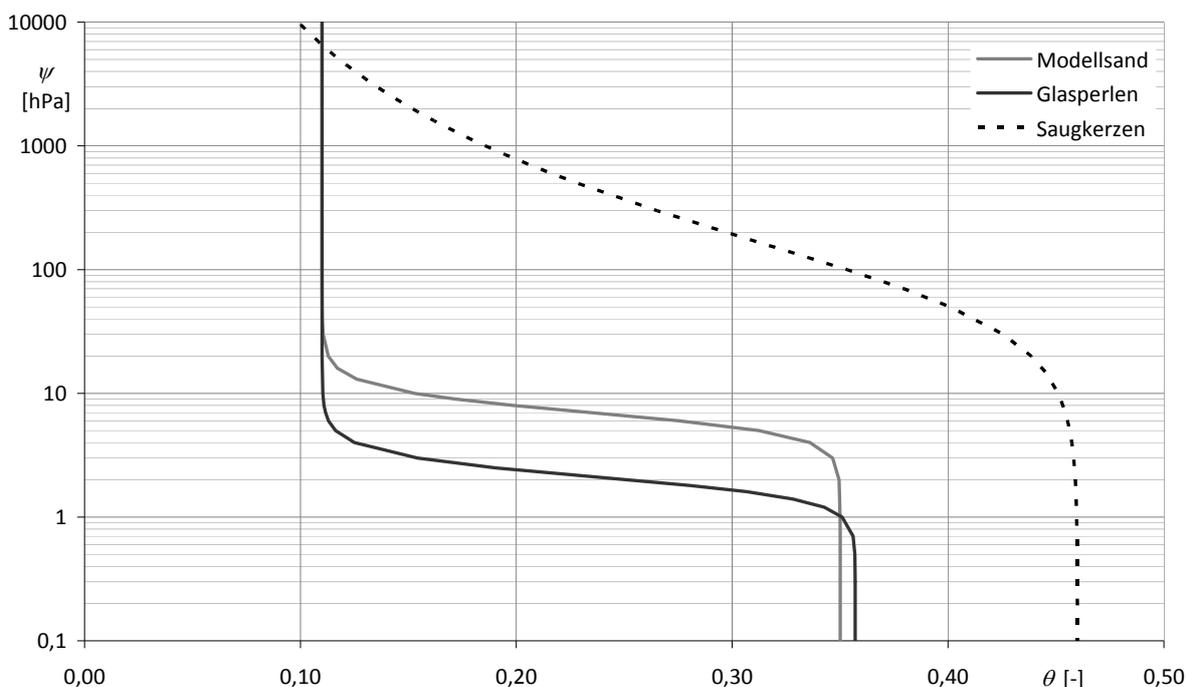


Abb. 3-5 Saugspannungs-Sättigungs-Kurve für gewählte Mualem-van-Genuchten-Parameter, Simulation Labor

Realisierung des Saugkerzenbaums

Die um das Gestänge befestigten Saugkerzen (der Labor-„Saugkerzenbaum“) wurde, wie in Abb. 3-6 dargestellt, konzeptionell realisiert und numerisch in das Modell integriert. Die schraffiert dargestellten Flächen in der konzeptionellen Darstellung wurden aus dem Modell ausgeschnitten, doppelt schraffierte Flächen stellen außerdem den Bereich dar, an dem die Randbedingung der Saugkerzen („constant flux“) angelegt wurde. Die inaktive Spitze des porösen Materials der Saugkerze wurde mit einem solchen Material parametrisiert, dass die Fließgeschwindigkeiten innerhalb desselben nahe Null lagen und somit vernachlässigt werden konnten.

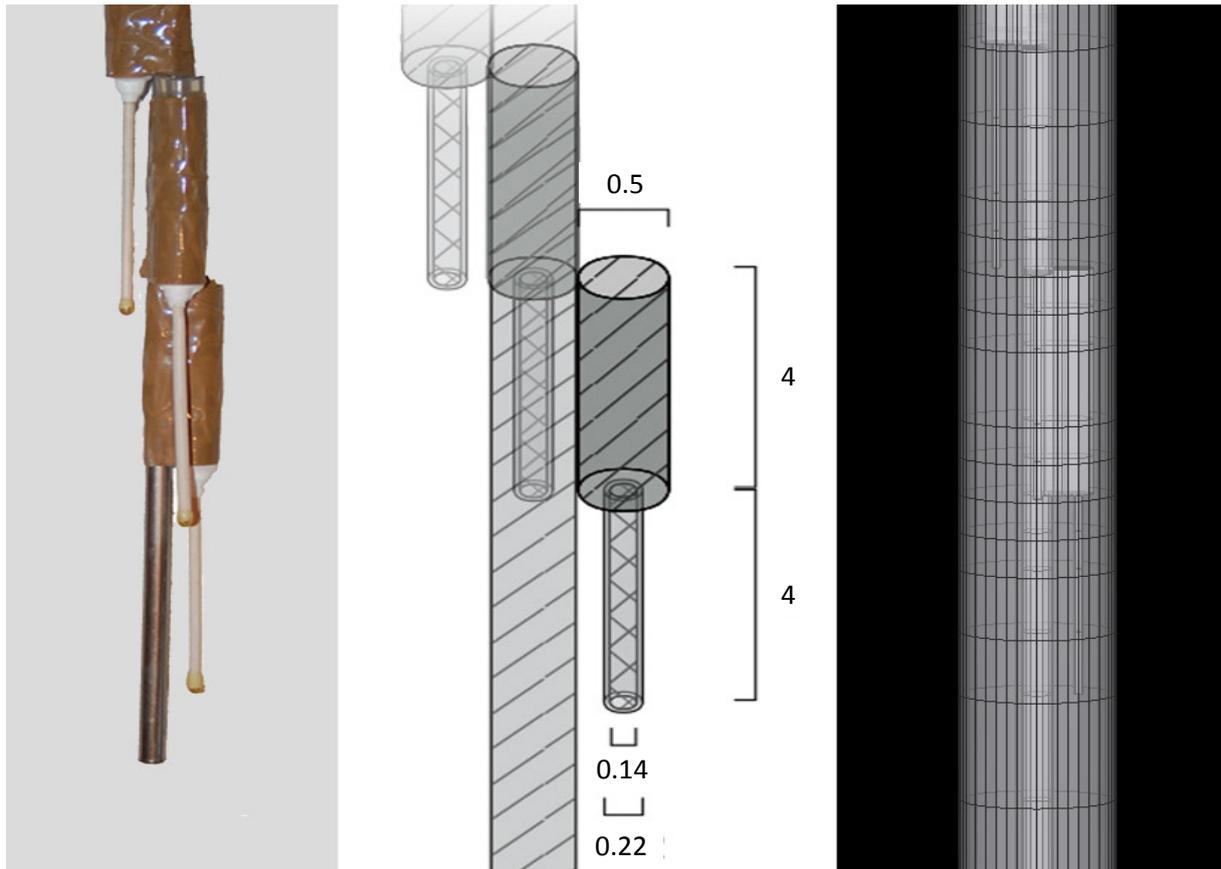


Abb. 3-6 Labor-„Saugkerzenbaum“, Maße in [cm]; v.l.n.r.: Foto, konzeptionelles Modell, numerisches Modell

3.1.3 Ergebnisse der Simulation des Experiment 1

Abb. 3-10 zeigt den rechten Rand des Modells inklusive Fließvektoren und Sättigung. Das Fließfeld im Bereich der Saugkerzen (etwa nach 2/3 der Fließstrecke, rote Markierung) sowie im An- und Abstrom selbiger ist homogen und gleichförmig ausgebildet; die beschriebene „freie“ Parametrisierung im Zu- und Auslaufbereich reduziert somit den Einfluss der Randbedingung.

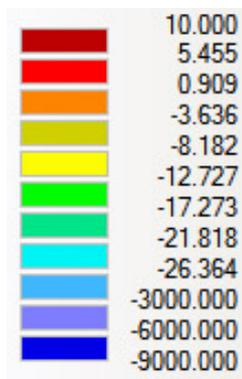


Abb. 3-7 Skala Matrixpotential [cm]

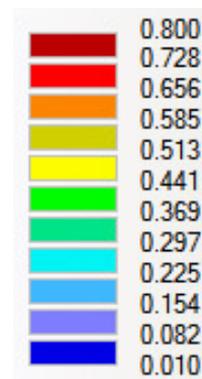


Abb. 3-8 Skala Sättigung [-]

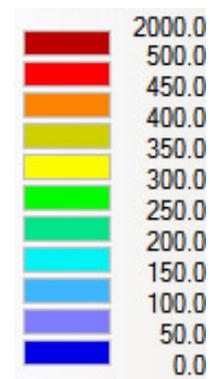


Abb. 3-9 Skala Geschwindigkeit [cm · d⁻¹]

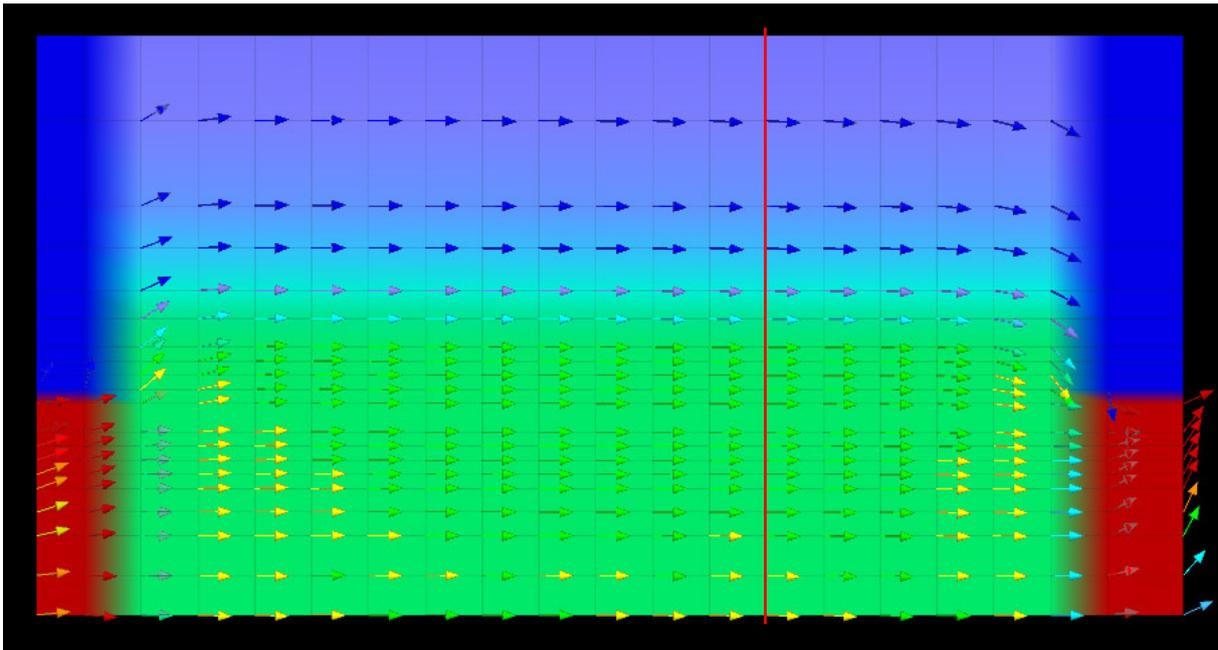


Abb. 3-10 Ruhezustand Simulation für Experiment 1, Rechter Modellrand: Fließvektoren (Skala Abb. 3-9), Sättigung (Skala Abb. 3-8); rote Senkrechte stellt Schnitt für Abb. 3-11 dar

Das Gefälle im numerischen Modell innerhalb des homogenen Fließfeldes beträgt $i = 0.73\%$, weicht damit geringfügig von dem während des Experiments ermittelten Wert ab (vgl. Tab. 2-7). Es ist zu vermuten, dass die beim Gerinneexperiment abgelesene Druckhöhe nicht dem exakten, im Gerinne vorherrschenden Potential entspricht, da die Standrohre über Verbindungsschläuche, welche einen zusätzlichen Druckverlust darstellen, an das Gerinne angeschlossen sind.

Die Höhe des Kapillarsaums kann aus Abb. 3-11 ungefähr ermittelt werden zu $c_f \approx 7\text{cm}$ und stimmt mit den Beobachtungen gut überein.

Anhand der vorgestellten Ergebnisse des numerischen Modells wird die Simulation und die Parametrisierung der verwendeten Materialien des Experiments 1 als erfolgreich angesehen. Im Folgenden sollen für die verschieden situierten Saugkerzen (unterhalb der Grundwasseroberfläche und im Kapillarsaum) der jeweilige Anstrom, die Sättigungsverhältnisse und das Matrixpotential anhand von Ausschnitten der dreidimensionalen Darstellung vorgestellt werden.

Abb. 3-12 zeigt einen Ausschnitt der untersten, unterhalb des Grundwasserspiegels befindlichen Saugkerze (SK3); dargestellt sind die Geschwindigkeitsvektoren (die Färbung selbiger entspricht der Geschwindigkeit) und, als farbige Begrenzungen der Zellen, das Matrixpotential.

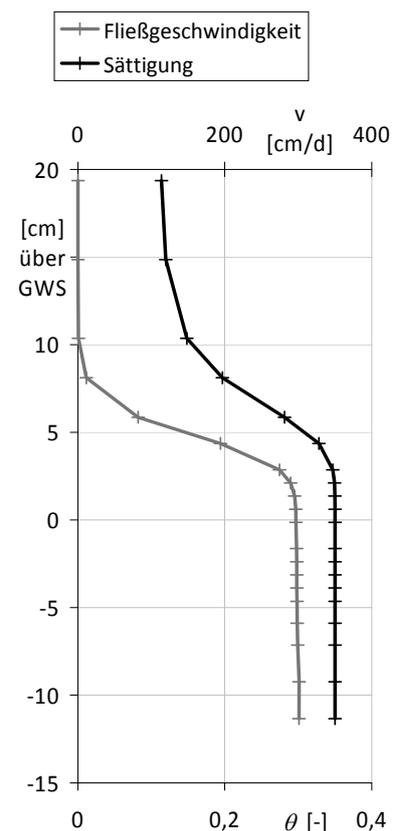


Abb. 3-11 Fließgeschwindigkeit [$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$] und Sättigung [-] aufgetragen über Matrixpotential [cmWS], Experiment 1, Schnitt in Abb. 3-10

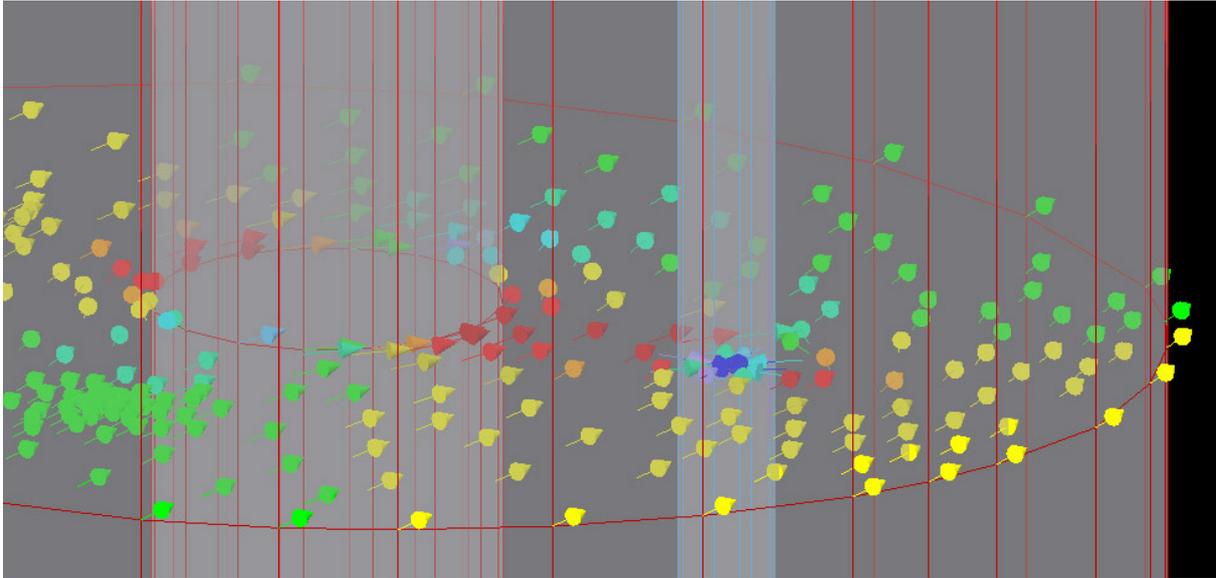


Abb. 3-12 Simulation Experiment 1, Detailausschnitt SK3 (Übergangsbereich Layer 9-10); Geschwindigkeitsvektoren (Skala Abb. 3-9), Matrixpotential (Skala Abb. 3-7)

Das Matrixpotential im dargestellten Bereich beträgt etwa $\psi \approx 5.8 \text{ cmWS}$; es ist erkennbar, dass das Gesteine und teilweise die Saugkerze Strömungshindernisse darstellen und sich die Geschwindigkeit im Bereich der Umströmung aufgrund der geringeren, verfügbaren Fließfläche erhöht (Kontinuitätsgesetz). Die Randbedingung (d.h. die Saugkerze) ist aktiv, was anhand der in die Mitte des kleinen Zylinders (Randbedingung der Saugkerze) gerichteten Vektoren zu erkennen ist – die Störung der umliegenden Strömungsvektoren ist allerdings nur sehr gering ausgeprägt. An der Randbedingung der Saugkerze bildet sich ein stark negatives Potential ($\psi < -2000 \text{ cmWS}$) aus, welches allerdings schon am Außenrand des porösen Materials abgebaut wird. Dies geht auch aus Abb. 3-13 hervor, welche einen mit der Fließrichtung angelegten Schnitt durch das Modell im Bereich der Saugkerze 3 zeigt. Die Probenahme mit den Saugkerzen erfolgt, wie bereits erwähnt, mit Hilfe eines durch Spritzen angelegten Unterdrucks nahe Vakuum; die sehr niedrigen Werte des Matrixpotentials der aktiven Saugkerzen sind demnach durchaus plausibel.

Ein ähnliches Bild, wie bei SK3 im grundwassergesättigten Bereich, ergibt sich für SK1; das Matrixpotential im Umfeld beträgt $\psi \approx -4.5 \text{ cmWS}$, die Saugkerze befindet sich innerhalb des Kapillarsaums (Abb. 3-14). Erneut kann erkannt werden, dass es zu einer deutlichen Ablenkung der Fließvektoren aufgrund des Gesteines und der Saugkerze kommt, die Störung der hydraulischen Verhältnisse aufgrund der aktiven Saugkerze bei der Probenahme ist jedoch selbst in diesem weniger stark gesättigten Bereich oberhalb der Grundwasseroberfläche, im Kapillarsaum, äußerst gering.

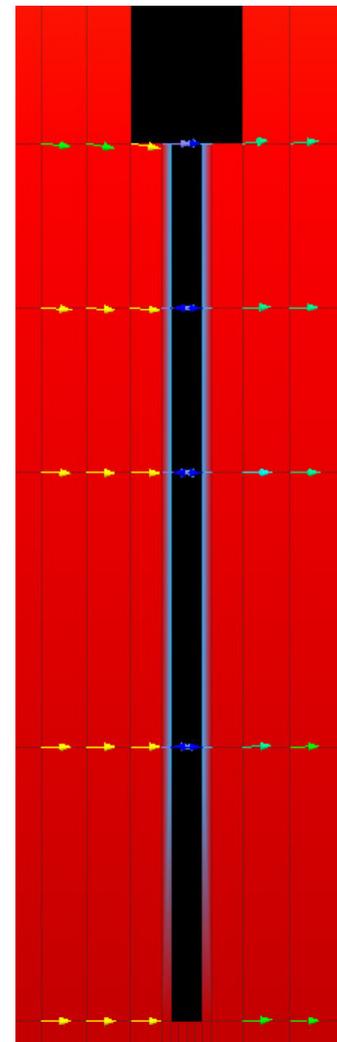


Abb. 3-13 Simulation Exp1, Querschnitt in Fließrichtung durch SK3, Fließvektoren (Skala Abb. 3-9), Matrixpotential (Skala Abb. 3-7)

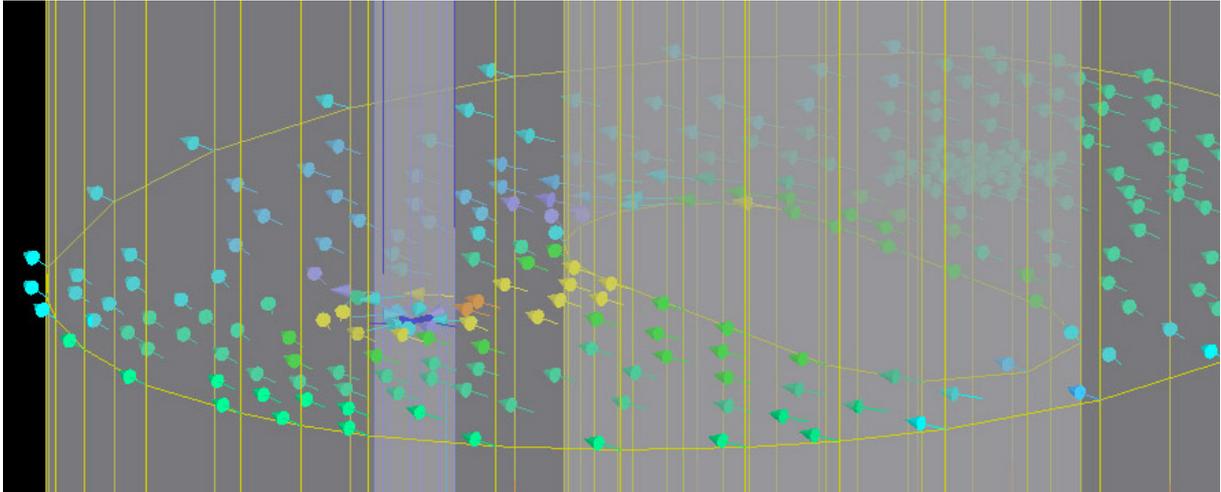


Abb. 3-14 Simulation Experiment 1, Detailausschnitt SK1 (Übergangsbereich Layer 5-6); Geschwindigkeitsvektoren (Skala Abb. 3-9), Matrixpotential (Skala Abb. 3-7)

Das Einzugsgebiet der aktiven Saugkerzen bei der Simulation von Experiment 1 ist auf Basis der Auswertung des Fließfeldes schwierig zu bestimmen, dennoch ist aufgrund der erkennbar geringen Beeinflussung der umliegenden Fließvektoren zu schlussfolgern, dass der beprobte Bereich die direkte Umgebung der Kerzen darstellt und die Probenahme im jeweiligen Niveau dieser erfolgt.

3.1.4 Ergebnisse der Simulation des Experiment 2

Abb. 3-15 zeigt den rechten Modellrand der Simulation des Experimentes 2; dargestellt sind wiederum die Fließvektoren und die Sättigung. Der Bereich der Glasperlen ist, anhand der Störung im Fließverhalten und der Unterschiede der Sättigung, klar erkennbar. So ist die Geschwindigkeit im stark ungesättigten Bereich der Glasperlen $v \ll 0.001 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$; eine Fließbewegung ist praktisch nicht vorhanden, die Filterschicht wirkt in diesem Bereich „isolierend“. Das hydraulische Gefälle innerhalb des Modells beträgt $i \approx 0.8\%$ und kommt den Beobachtungen bei den Gerinneexperimenten sehr nahe.

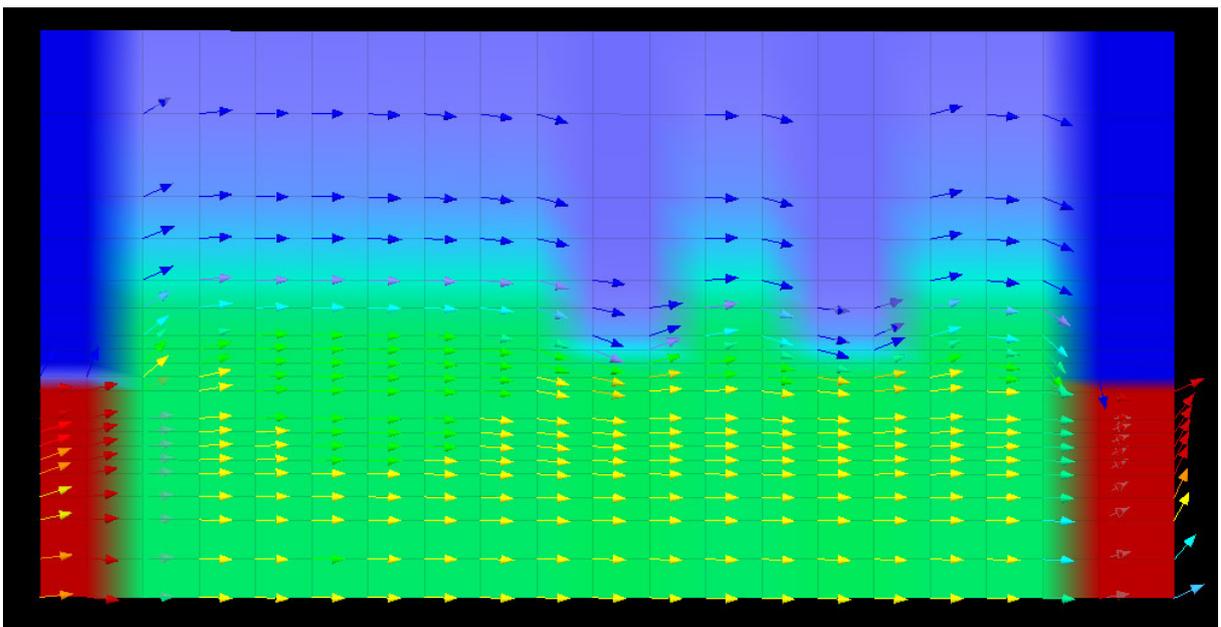


Abb. 3-15 Ruhezustand Simulation für Experiment 2, rechter Modellrand; Fließvektoren (Skala Abb. 3-9), Sättigung (Skala Abb. 3-8)

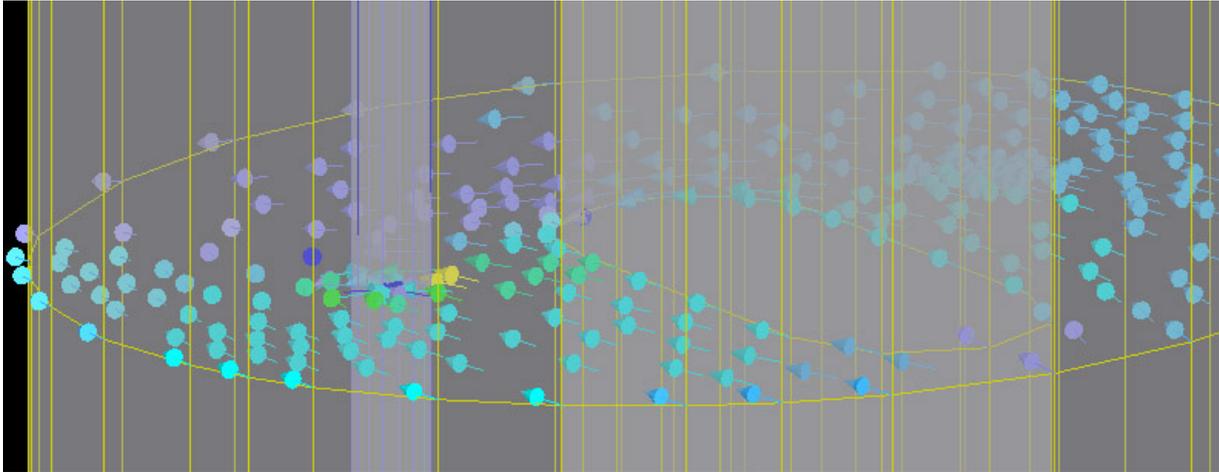


Abb. 3-16 Simulation Experiment 2, Detailausschnitt SK1 (Übergangsbereich Layer 5-6); Geschwindigkeitsvektoren (Skala Abb. 3-9), Matrixpotential (Skala Abb. 3-7)

Im Vergleich zu Abb. 3-14 (Simulation Exp1), zeigt sich im Bereich der Saugkerze 1 bei der Simulation des Experiments 2 ein etwas verändertes Fließfeld; die Vektoren sind im Abstrom stärker nach unten gerichtet und geringere Fließgeschwindigkeiten treten im dargestellten Bereich auf. Aufgrund der Glasperlen-Filterschicht kommt es innerhalb des Bereiches des Saugkerzenbaums zu einer Störung des Fließverhaltens. Eine Veränderung des Einzugsgebiets der Probenahme ist aufgrund der kleinräumigen Beeinflussung jedoch nicht zu erkennen.

3.1.5 Zusammenfassung der Simulationen der Laborexperimente

Die Simulation der Laborexperimente ist mit HYDRUS erfolgreich durchgeführt worden. So bestätigt die Auswertung der Modellergebnisse die gelungene konzeptionelle Umsetzung und numerische Integration des Gerinnetmodells und des Saugkerzenbaums sowie die Parametrisierung der verwendeten Materialien. Das Einzugsgebiet der Saugkerzen, der „Ort der Probenahme“, ist die unmittelbare Umgebung selbiger; das Probenahmenvolumen ist im Vergleich zum im Material befindlichen Wasservolumen sehr gering. Die in Abschnitt 1 ermittelten Durchbruchkurven entsprechen demnach der in diesem Bereich befindlichen Konzentration.

Die Auswertung des Fließfeldes im Bereich der, wie in Experiment 2 durch die Glasperlen realisierten Veränderung der Höhe des Kapillarsaums bestätigt die schon bei der Analyse der Gerinneexperimente gewonnene Erkenntnis: eine Filterschicht bewirkt eine Störung des Fließverhaltens und damit auch der Konzentrationsverteilung eines innerhalb des Kapillarsaums transportierten Stoffes.

Als nächster Schritt, zur genaueren Untersuchung des Umfangs dieser Störung, ist eine Simulation mit Stofftransport oder auch ein „particle tracking“ anzustreben.

3.2 Simulation des Saugkerzenbaums im Versuchsfeld Wagna

3.2.1 Motivation

Die Simulation der in Wagna installierten Anlage mit dem Programm HYDRUS soll zur Evaluation des in naher Umgebung der Anlage befindlichen Strömungsfeldes im Grundwasser beziehungsweise der ungesättigten Zone und der SUIR sowie zur Abgrenzung des Einzugsbereichs der Kerzen dienen.

3.2.2 Parametrisierung des Mualem-van-Genuchten-Modells

Im Zuge der Errichtung der tiefengestaffelten Anlage in Wagna wurden zahlreiche Bodenproben entnommen (gestört sowie ungestört) und vom Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt in Petzenkirchen [2005] auf verschiedene Parameter analysiert. Ebenso sind langjährige Feldmessungen für vorläufige Parameterschätzungen verfügbar.

Pumpversuche im Testfeld Wagna ergaben eine gesättigte horizontale hydraulische Leitfähigkeit von $k_{s,h} = 2.1 \cdot 10^{-3} m \cdot s^{-1} = 18134 cm \cdot d^{-1}$. Aus Lysimetermessungen geht hervor, daß die gesättigte vertikale hydraulische Leitfähigkeit etwa $k_{s,v} = 5 \cdot 10^{-4} m \cdot s^{-1} \approx 4300 cm \cdot d^{-1}$ beträgt; der Anisotropiefaktor (horizontal-vertikal) kann demnach mit einem Wert von rund 0.2 quantifiziert werden.

Abb. 3-17 zeigt Sieblinien verschiedener Probenahmen im Bereich des Saugkerzenbaums auf biologischer Seite („Wagna Ost“) in unterschiedlichen Tiefen; bis auf jene Beprobung in 320 – 340cm unter Geländeoberkante zeigen sich sehr ähnliche Kornverteilungen. Der überwiegend homogen aufgebaute Aquifer besteht hauptsächlich aus grobsandigen sowie kiesigen Komponenten mit geringen Anteilen an Feinsand. Lokale Heterogenitäten, wie in der Probe 320 – 340cm zu erkennen, bei der ein geringerer Anteil kiesigen Materials vorzufinden ist, sind der glazialen Entwicklung geschuldet.

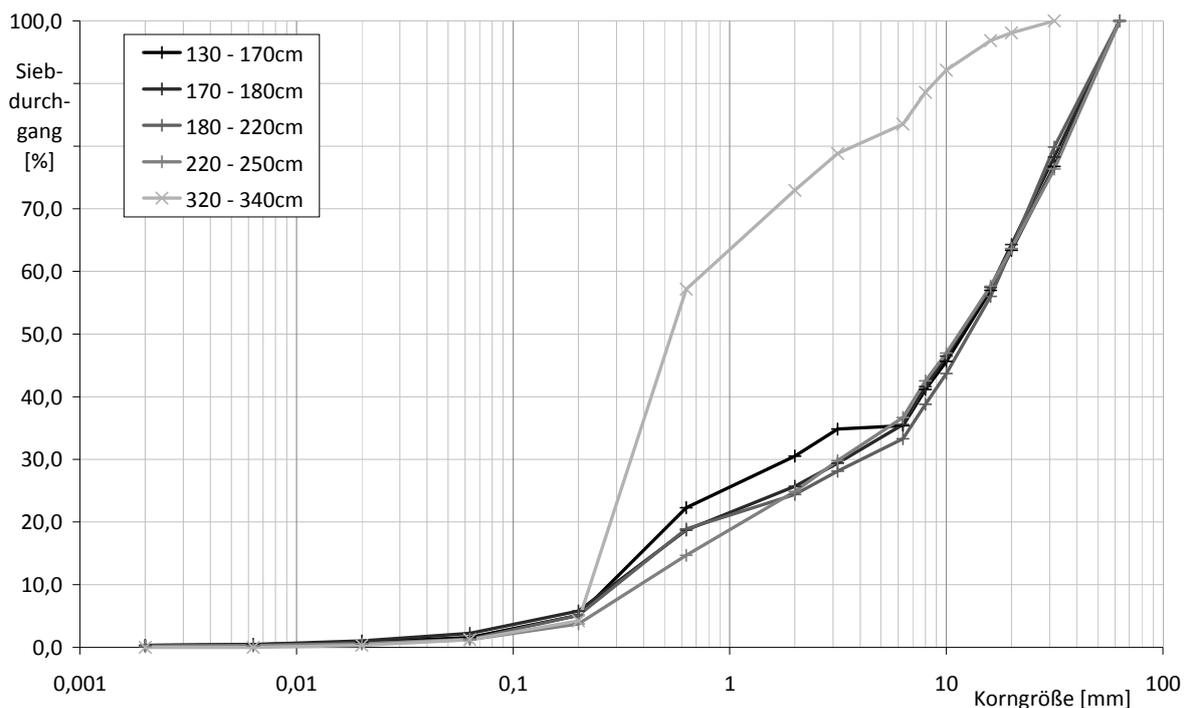


Abb. 3-17 Kornsummenlinie, Ergebnisse der Profilaufnahmen des Standortes Wagna Ost [2005]

Residual- bzw. Sättigungswassergehalt des Aquifermaterials wurde von [Fank, 1999] auf $\theta_r = 0.035$ bzw. $\theta_s = 0.2$ bestimmt. In Abb. 3-18 sind Daten zu pF-Kurven von drei unterschiedlichen Analysen aufgeführt: zwei instationäre Laborversuche ungestörter Proben aus verschiedenen Tiefen (Lab1_100-130cm, Lab2_220-250cm) sowie Feldmessungen des Lysimeters auf biologischer Seite mit TDR-Sonden und Tensiometern in der Tiefe 180cm unter GOK (Feld_180cm). Beide Laboranalysen zeigen, trotz vergleichbarer Materialbeschaffenheit und Versuchsdurchführung, deutliche Unterschiede. Wiederum verschiedene Resultate liefert die langfristige Auswertung der Feldmessungen. Zwei Fragenstellungen gilt es dabei als mögliche Ursachen der auftretenden Differenzen festzuhalten: 1) Existiert ein Skalenproblem bei den Messmethoden? 2) Wie repräsentativ ist das jeweilige beprobte Volumen für den Bodenkörper? Die Beantwortung dieser Fragen steht jedoch nicht im Mittelpunkt der Aufgabenstellung. Auf Basis der Analyseergebnisse wurden zwei umhüllende pF-Kurven aufgetragen, welche die Variationsbreite der Parameter umfassen („upper“ und „lower“).

Weiterhin geht aus Abb. 3-18, den Ausführungen von [Fank, 1999] (Fig. 32 & 33, S.176 ff.) sowie aus den langjährigen Messreihen hervor, dass in der ungesättigten Zone unterhalb 200cm unter GOK (also im Messhorizont des Saugkerzenbaums) zu keinem Zeitpunkt, selbst während längerer Trockenperioden, Matrixpotentiale $\psi < -100\text{cmWS}$ (entspricht $\theta \approx 0.07$) aufgezeichnet wurden. Dies liegt zum einen darin begründet, dass die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit des sandig-kiesigen Aquifers bei geringer werdendem Matrixpotential äußerst geringe Werte annimmt (siehe Abb. 3-19, S. 48 sowie Fig. 38, S. 185 in [Fank, 1999]) und dadurch die Wasserbewegung stark gehemmt wird; zum anderen sind die Phasen mit geringem oder keinem Sickerwasserfluss zu kurz, um niedrigere Matrixpotentiale durch Austrocknung zu bedingen. Diese Beobachtung ist von entscheidender Bedeutung für die Kalibrierung des Modells und wird mit Hilfe des Parameters i („pore-connectivity“) der Mualem-van-Genuchten-Gleichung zur Berechnung der ungesättigten Leitfähigkeit (Gleichung (1-2), S. 2) in das Modell übertragen.

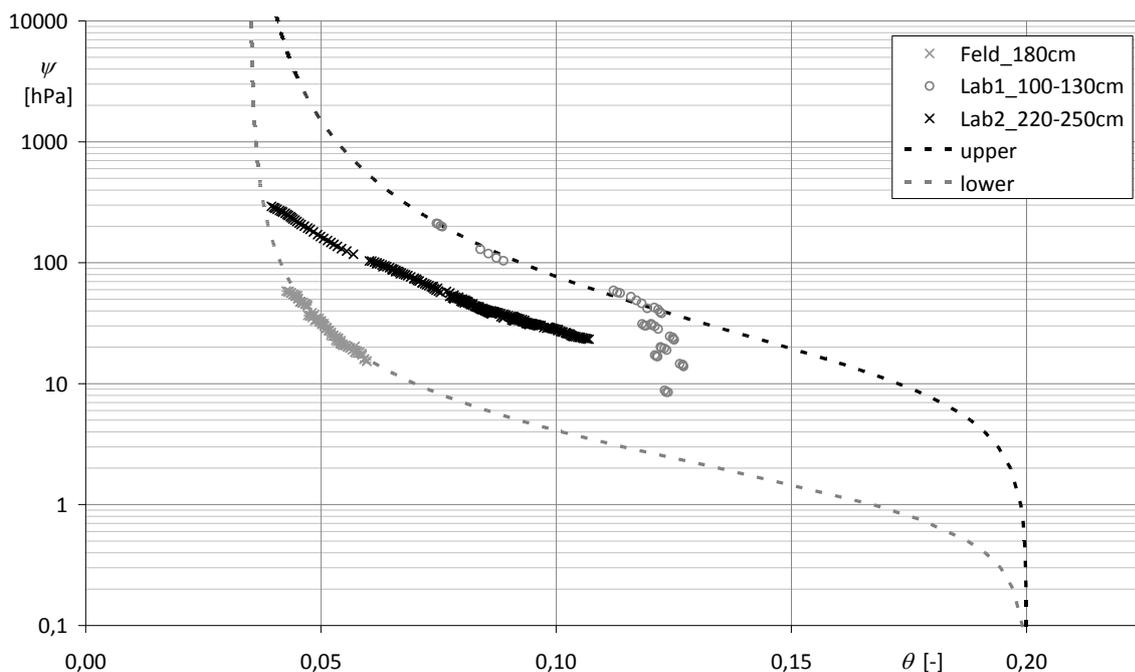


Abb. 3-18 Saugspannungs-Sättigungs-Kurve, Bodenanalyse und Feldmessung Wagna sowie Umhüllende; Daten „Feld_180cm“ als Mittelwerte dargestellt (Zeitraum November 2004 bis August 2005)

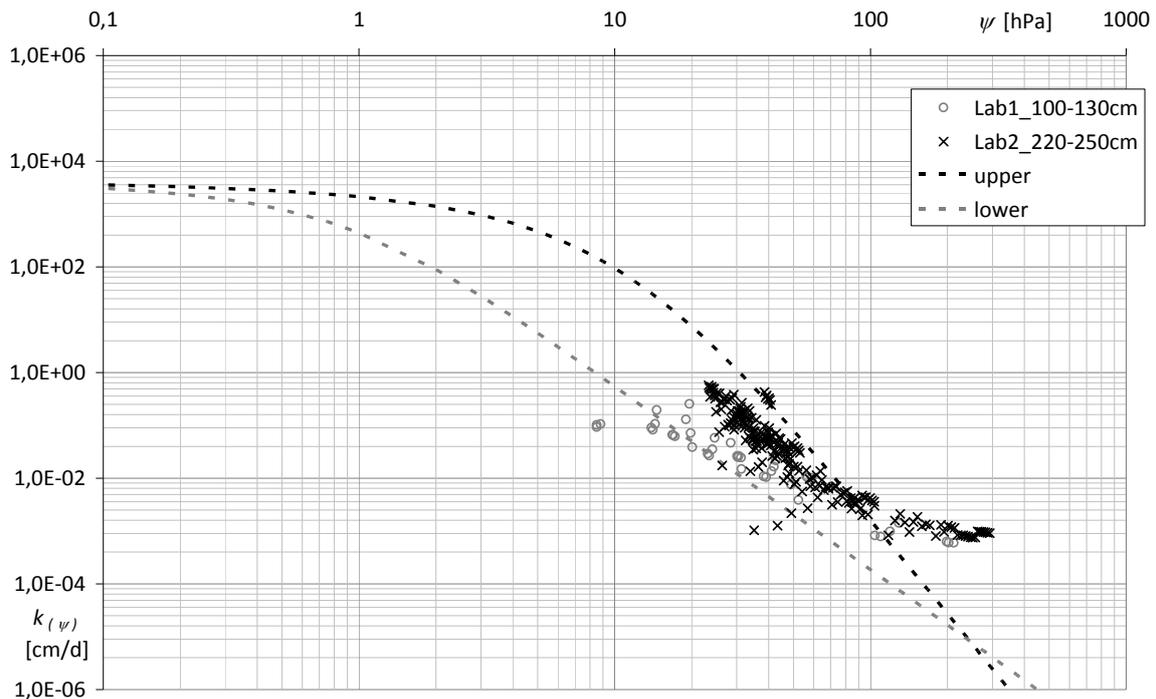


Abb. 3-19 $\psi - k$ -Beziehung des Aquifermaterials Wagna aus Lysimeter- und Labormessungen

Die zunächst ermittelten Mualem-van-Genuchten-Parameter orientieren sich an der unteren Umhüllenden („lower“) bzw. den Felddaten und werden aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit im gesättigten Bereich der pF-Kurve und der Streuweite der unterschiedlichen Analysen lediglich als Schätzungen angesehen. Eine Kalibrierung erfolgt über den Abgleich der Probevolumina zwischen Simulation und Messung.

Lysimetermessungen und bodenhydraulische Laborversuche ergaben die in Abb. 3-19 dargestellte $\psi - k$ -Beziehung; erneut sind die Umhüllenden mit den zuvor gesetzten Parametern α und n sowie θ_r und θ_s dargestellt. Variiert wurde der Parameter i zur Abbildung der Messwerte. Beide Laborversuche (Lab1_100-130cm und Lab2_220-250cm) ergeben eine vertikale hydraulische Leitfähigkeit bei einem Matrixpotential $\psi \approx -100\text{cmWS}$ von $k_{-100\text{cm},v} \approx 2.9 \cdot 10^{-10}\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 2.5 \cdot 10^{-3}\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$. Die obere Umhüllende („upper“) konnte schlechter als die untere Umhüllende („lower“) an die Messdaten angepasst werden; bei Matrixpotentialen $\psi < -100\text{cmWS}$ bildet letztere die Laborwerte im Rahmen der Parametervariation jedoch hinreichend gut ab. Die Werte der ungesättigten vertikalen hydraulischen Leitfähigkeit liegen, ähnlich den Laborwerten, bei $k_{-100\text{cm},v} \approx 2.6 \cdot 10^{-10}\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 2.3 \cdot 10^{-3}\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$. Diese Werte sind um zwei Zehnerpotenzen geringer als die Angaben aus Fig. 38, S. 185 in [Fank, 1999], jedoch gehen letztere von einem „Sandboden“ aus – aufgrund der Kiesanteile im Versuchsgebiet sind diese geringeren Werte der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit durchaus realistisch.

Um die Bohrung des Saugkerzenbaums wurde ein nicht näher definierter Filterkies (Hauptkorndurchmesser 2.0 – 3.15mm) eingebracht. Der Durchmesser des Filterkiesbereichs beträgt $20\text{cm} < d < 30\text{cm}$. Für diese sich durch ein enges Kornspektrum auszeichnenden Industriekiese sind eine hohe gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, eine sehr geringe ungesättigte Leitfähigkeit, ein geringer Kapillarsaum sowie eine mittlere Porosität und ein sehr geringer

Residualwassergehalt typisch (Parameterannahmen siehe Tab. 3-4, S. 49, sowie Abb. 3-20, S. 49, und Abb. 3-21, S. 50).

Im Inneren der Bohrung ($d < 20\text{cm}$) wurde der ausgehobene Boden, nach Siebung und Entfernen der gröberen Kiesanteile, wiederverfüllt. Durch die Siebung des Materials sollte ein möglichst guter Kontakt zwischen Saugkerze und Boden hergestellt werden. Die Mualem-van-Genuchten-Parameter wurden so geschätzt, dass sich ein höherer Kapillarsaum, eine etwas geringe gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, aber ein weniger starker Rückgang der $\psi - k$ -Beziehung ergibt. Dazu wurden die Parameter der „lower“-Kurve in ebendieser Weise angepasst. Außerdem wurde aufgrund des geringeren Großkornanteils der Sättigungswassergehalt geringfügig erhöht (Abb. 3-20).

Bei einer Simulation mit dem zuvor an die Labordaten angepassten Parameter $i = -0.9$ des Bodensmaterials („lower“) konvergierte der Iterationsvorgang nicht. Bei $i = 0$ war eine oszillationsfreie Simulation möglich. Die leicht veränderte $\psi - k$ -Beziehung kann die Labordaten dennoch gut abbilden (Abb. 3-21). Desweiteren gibt Tab. 3-4 eine Übersicht der durch die vorhergehenden Auswertungen gewonnenen Werte zur Parametrisierung des HYDRUS-Modells.

Tab. 3-4 Übersicht Mualem-van-Genuchten-Parameter, Feld

Nr.		θ_r [-]	θ_s [-]	α [cm^{-1}]	n_{MvG} [-]	$k_{s,h}$ [$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$]	i [-]
1	Boden („lower“)	0.035	0.20	0.80	1.74	18134	0
2	Boden, gesiebt	0.035	0.225	0.60	1.50	9067	0
3	Filterkies	0.010	0.40	0.50	5.00	86400	0.5
4	Saugkerzen	0.034	0.40	0.02	1.37	0.357	0.5

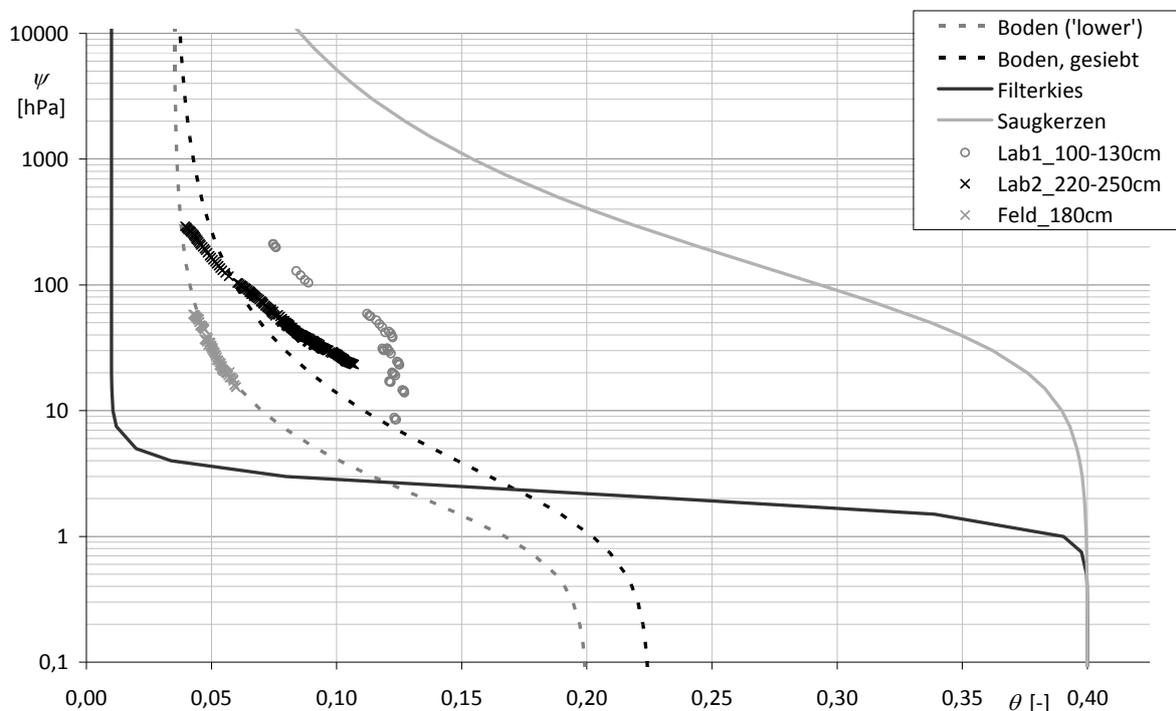


Abb. 3-20 Saugspannungs-Sättigungs-Kurve für gewählte Mualem-van-Genuchten-Parameter, Feldsimulation

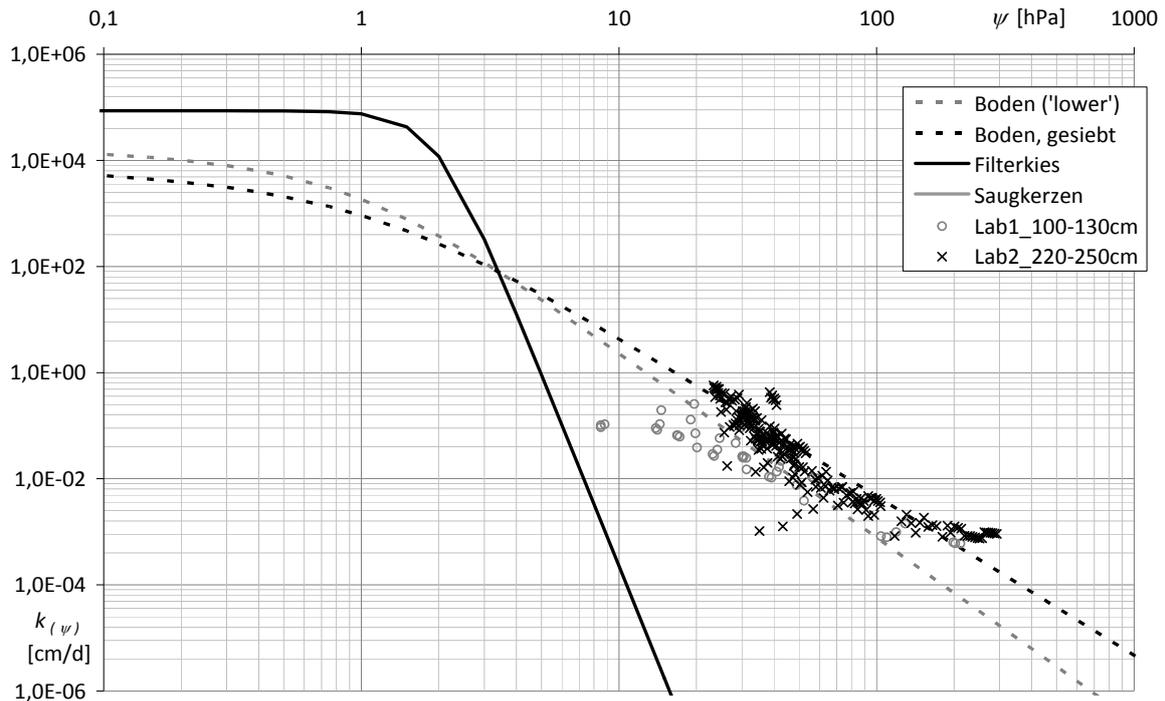


Abb. 3-21 $\psi - k$ -Beziehung, Annahmen Feldsimulation

3.2.3 Konzeptionelles und numerisches Modell

Die Modellierung des gesamten Grundwasserkörpers des Testfeldes Wagna in ausreichend hoher räumlicher Auflösung ist aufgrund rechen technischer Grenzen nicht möglich. Der Auswahl des zu modellierenden Bereichs lagen folgende Anforderungen zugrunde:

- Repräsentative Reduktion der vertikalen Mächtigkeit zur Bestimmung des Einzugsgebietes der Saugkerzen
- Minimierung des Einflusses der Randbedingungen des Modells
- Variationsmöglichkeit für verschiedener Szenarien zu niedrigem/hohem Grundwasserstand zur Widerspiegelung unterschiedlicher Sättigungsverhältnisse im Bereich der Saugkerzen

Unter Beachtung o.g. Maßgaben ist das in Abb. 3-22 skizzierte konzeptionelle Modell entstanden (Darstellung nicht maßstabgetreu; schraffierte Flächen kennzeichnen Öffnungen im Modell). Die Unterkante des Modells wurde an das natürliche Gefälle von 0.0015 angepasst.

Anmerkung: Das in Wagna vorhandene geschlitzte Filterrohr wurde nicht im Modell realisiert. Einerseits war die Auflösung des Modells zu gering, um die 1mm breiten Filterschlitzte zu integrieren, andererseits wurde vermutet, dass die Anbindung des wiederverfüllten Materials an den Filterkies sehr gering ist und dadurch einen großen hydraulischen Widerstand darstellt. Die möglicherweise fehlende Anbindung der Böden ist jedoch ebenfalls nicht im Modell zu realisieren und die Dimension der Reduktion der hydraulischen Leitfähigkeit nicht wissenschaftlich vertretbar abzuschätzen.

Die horizontale Unterteilung des Modells erfolgte wie in Tab. 3-5 aufgeführt. Im Bereich der Saugkerzen wurden geringer Layerhöhen angesetzt; andere Modellschichten, von geringerem Interesse, wurden gröber unterteilt.

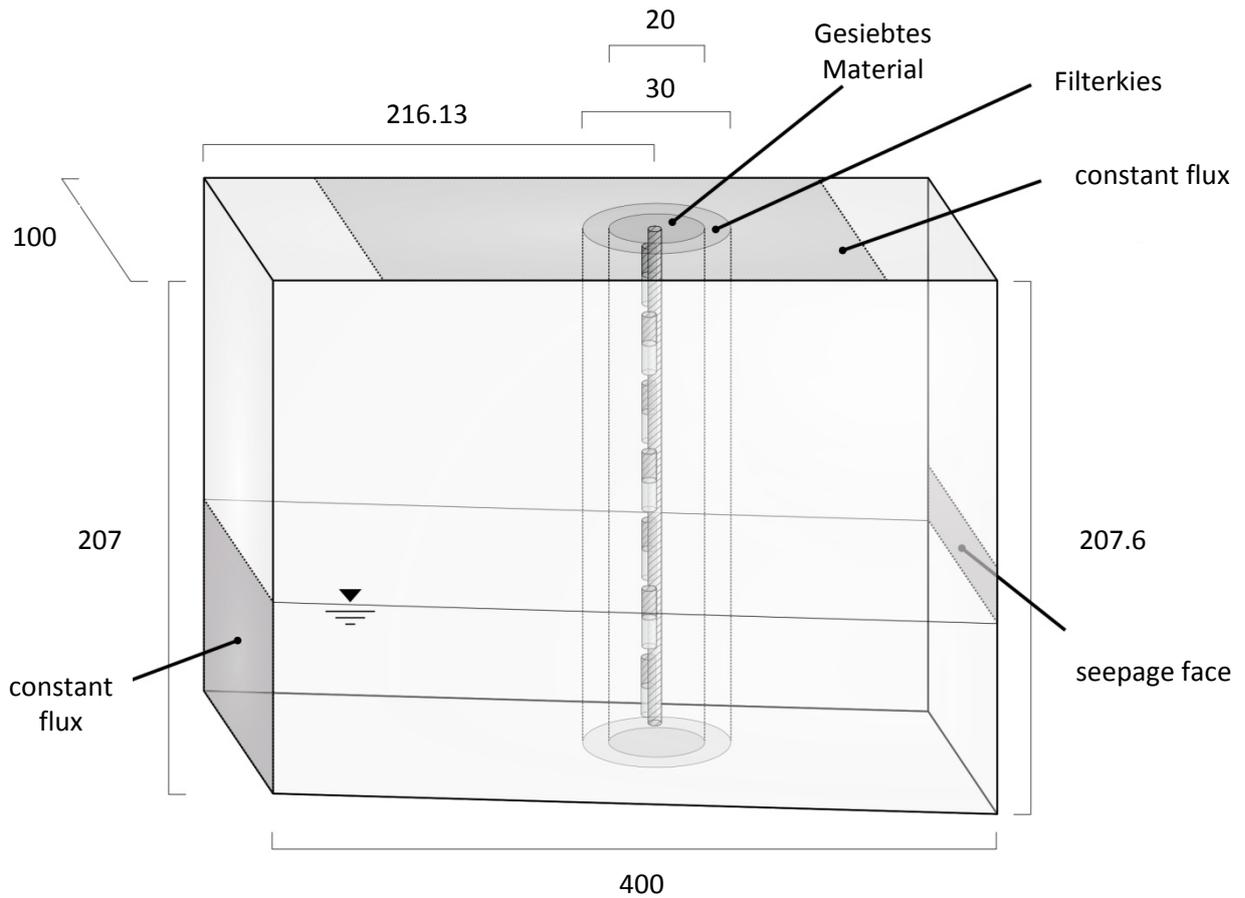


Abb. 3-22 Konzeptionelles Modell, Feld; Maße in [cm], Abbildung nicht maßstabgetreu

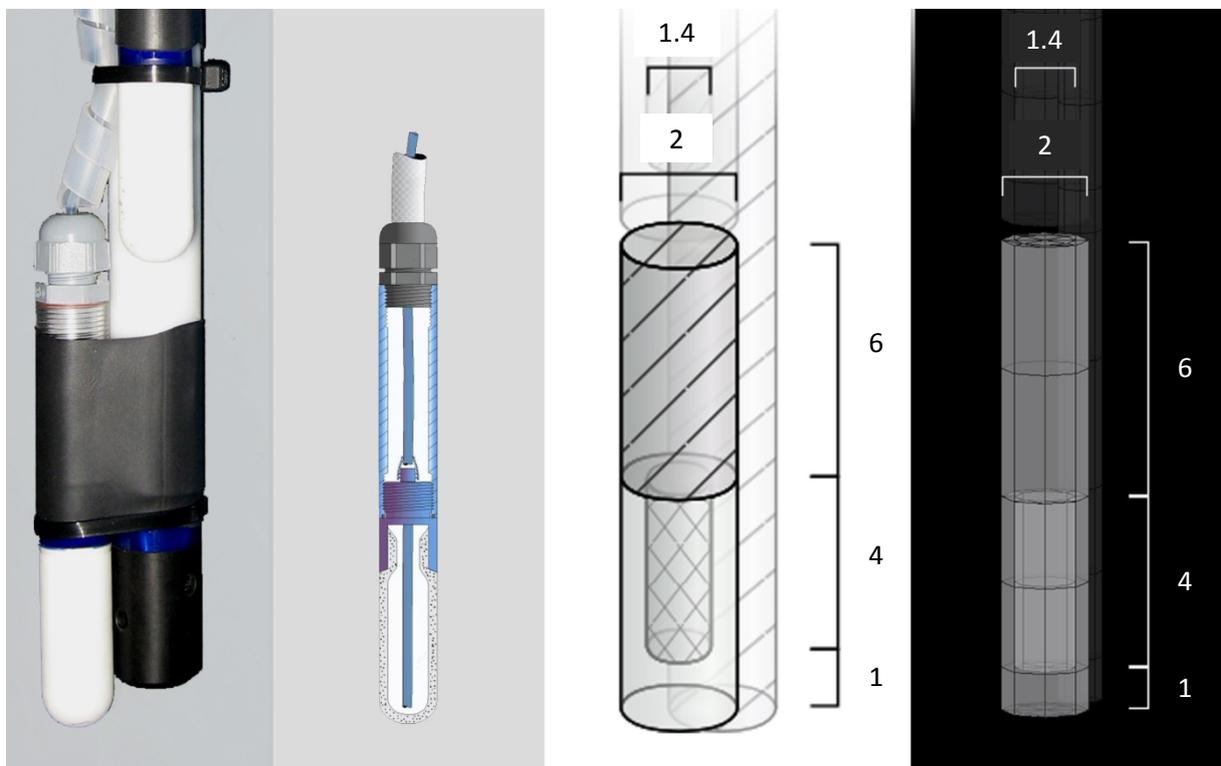


Abb. 3-23 Übersicht SK20 (v.l.n.r.): Foto Spitze SKB (Georg v. Unold, Fa. UMS München), Skizze Aufbau SK20 (verändert, aus [UMS GmbH München, 2008]), Konzeptionelles Modell SK20, Numerische Realisierung SK20; Maße in [cm]

Tab. 3-5 Unterteilung Layer, numerisches Modell, Feld

Layer	Mächtigkeit [cm]	Tiefe [cm]	Bemerkung
1	15	15	
2	10	25	
3	3	28	Schaft SK1
4	3	31	Schaft SK1
5	2	33	Por. Teil + RB von SK1
6	2	35	Por. Teil + RB von SK1
7	1	36	Por. Teil von SK1
8	3	39	Schaft SK2
9	3	42	Schaft SK2
10	2	44	Por. Teil + RB von SK2
11	2	46	Por. Teil + RB von SK2
12	1	47	Por. Teil von SK2
13	3	50	Schaft SK3
...
60	2	154	Por. Teil + RB von SK12
61	2	156	Por. Teil + RB von SK12
62	1	157	Por. Teil von SK12
63	3	160	
64	3	163	
65	5	168	
66	10	178	
67	10	188	
68	10	198	
69	9.6 – 10	207.6	



Abb. 3-24 Seitenansicht Layer inkl. SKB

Realisierung der Saugkerzen

Die Umsetzung der Saugkerzen in das numerische Modell ist, neben der Parametrisierung des Bodens, ein für die Simulation des Einzugsbereichs der Saugkerzen elementarer Bestandteil. Es werden zwölf Saugkerzen im Modell modelliert, sodass jeweils die Bereiche gesättigter, ungesättigter und Kapillarraum repräsentativ abgedeckt sind.

Die Abb. 3-23 zeigt eine Übersicht zur Realisierung der im Feld verwendeten Saugkerzen SK20: von links nach rechts ist die an der Spitze des Saugkerzenbaums befestigte Saugkerze, ein skizzierter Querschnitt, die konzeptionelle Darstellung sowie die im numerischen Modell realisierte Form der Saugkerze dargestellt. Am inneren Bereich der Kerzen (in der konzeptionellen Darstellung der doppelt schraffierte Bereich) ist im Modell die Randbedingung „Variable Head“ (Dirichlet-Randbedingung) angelegt.

Die Saugkerzen wurden vom Hersteller UMS München in Laborversuchen parametrisiert. In Wasser wurde für die SK20 ein Durchflusswert von $Q = 12 \text{ ml} \cdot \text{bar}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ermittelt. Die durchströmte Oberfläche A wird an der mittleren Wandstärke berechnet und ergibt sich zu

$$A = A_{\text{Mantel}} + A_{\text{Kuppe}} = 25.9 \text{ cm}^2 \quad (3-1)$$

mit den Teilgleichungen

$$A_{\text{Mantel}} = 2 \cdot \pi \cdot (r_{\text{SK}} - 0.5 \cdot d_{\text{Wand,SK}}) \cdot h_{\text{SK}} \quad (3-2)$$

$$A_{\text{Kuppe}} = 2 \cdot \pi \cdot (r_{\text{SK}} - 0.5 \cdot d_{\text{Wand,SK}})^2 \quad (3-3)$$

Der Druckabfall über die Strecke $dx = 0.3 \text{ cm}$ (das poröse Material der Saugkerzen) beträgt $dh = -1 \text{ bar} \approx -1000 \text{ cmWS}$. Damit folgt nach Umstellen aus

$$Q = v_D \cdot A = -k_f \cdot \frac{dh}{dx} \cdot A \quad (3-4)$$

die hydraulische Leitfähigkeit der SK20

$$k_{f,SK20} = -\frac{Q \cdot dx}{dh \cdot A} = 0.2 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1} = 2.32 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3-5)$$

Als „Material“ (HYDRUS-interne Bezeichnung für die hydraulischen Eigenschaften des Bodens) wurden, neben der zuvor ermittelten hydraulischen Leitfähigkeit, die in Tab. 3-4, S. 49, aufgelisteten Mualem-van-Genuchten-Parameter verwendet, welche dem Schluff („Silt“) der HYDRUS-Datenbank entsprechen.

Die numerische Realisierung der Saugkerzen wurde in einem simplen Modell überprüft. In einem Würfel (Volumen $V = 1 \text{ m}^3$) wurde eine Saugkerze mittig in der Höhe $h = 0.5 \text{ m}$ eingebracht, die Druckrandbedingung der Saugkerze variiert und der jeweilige Durchfluss an jener aufgezeichnet. Als umgebendes Material wurde das gesiebte Material der Anlage Wagna festgelegt (Boden „lower“). Bei einem konstanten Überstau von 12.6 cm erreicht eine Kerze mit dem zuvor geschätzten Wert $k_{f,SK20} = 0.2 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ folgende, vom angelegten Potential abhängige Saugleistung (Abb. 3-25).

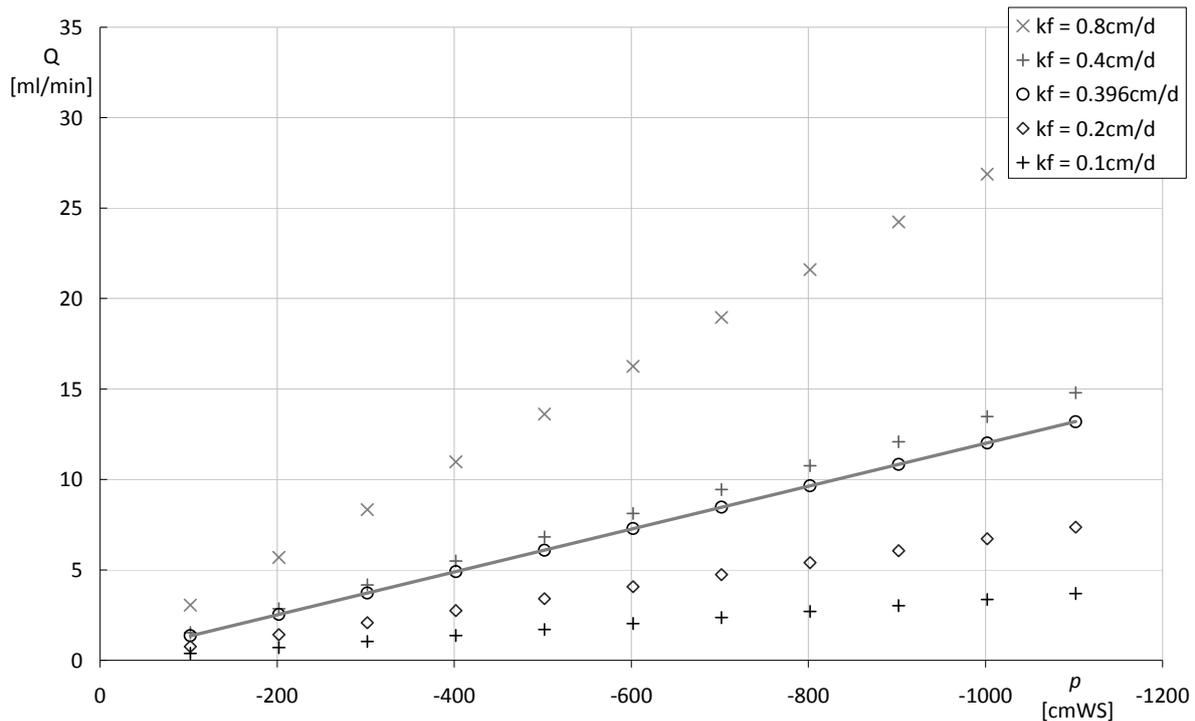


Abb. 3-25 Durchfluss-Saugspannungs-Beziehung in Abhängigkeit unterschiedlicher $k_{f,SK20}$ -Werte

Aufgrund der Abstraktion des Saugkerzendesigns im numerischen Modell ergibt sich bei einer Potentialrandbedingung von -1000cmWS und der Verwendung des zuvor berechneten Wertes der hydraulischen Leitfähigkeit der SK20 $k_{f,SK20} = 0.2\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ lediglich ein Volumenstrom $Q_{(\psi, k_{f,SK20})}$ von $Q_{(-1000, 0.2)} = 6.72\text{ml} \cdot \text{min}^{-1}$. Die Kalibration der Saugkerzen erfolgte über die Variation der hydraulischen Leitfähigkeit. Mit $k_{f,SK20} = 0.357\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ergeben sich mit der Labormessung vergleichbare Volumenströme von $Q \approx 12\text{ml} \cdot \text{bar}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Auch die im Feld gemessenen Volumenströme in der gesättigten Zone ($Q \approx 0.4\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$ bei ca. -600hPa entspricht $Q \approx 11\text{ml} \cdot \text{bar}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) ergeben ähnliche Werte.

Eine kurze Sensitivitätsanalyse der übrigen Parameter (α , $n_{M,vG}$, θ_s , θ_r) innerhalb sinnvoller Variabilitätsgrenzen ergab keine Veränderung im Volumenstrom. Auch die Variation des umgebenden Materials hatte keinen Einfluss auf die Saugleistung der Kerze (bei gesättigten Verhältnissen).

Somit kann die beschriebene Realisierung der Saugkerzen im numerischen Modell in der bestehenden Form in andere Modellvarianten übertragen werden.

Numerisches Modell

Eine von HYDRUS bereitgestellte Routine generiert anhand der eingegebenen geometrischen Daten und Verfeinerungen ein konsistentes Modellgitter (Abb. 3-26 und Abb. 3-27). Tab. 3-6 gibt Auskunft über die Anzahl der Gitterpunkte und Elemente des generierten, dreidimensionalen Modells.

Abb. 3-26 zeigt das generierte 3D-Modell von oben; farblich kodiert sind die unterschiedlichen Materialien an den Knotenpunkten (dunkelblau – M1, grün – M3, hellblau – M2). Die rote Gerade markiert einen zweidimensionalen Schnitt durch das Modell und die linke Seite des Saugkerzenbaums.

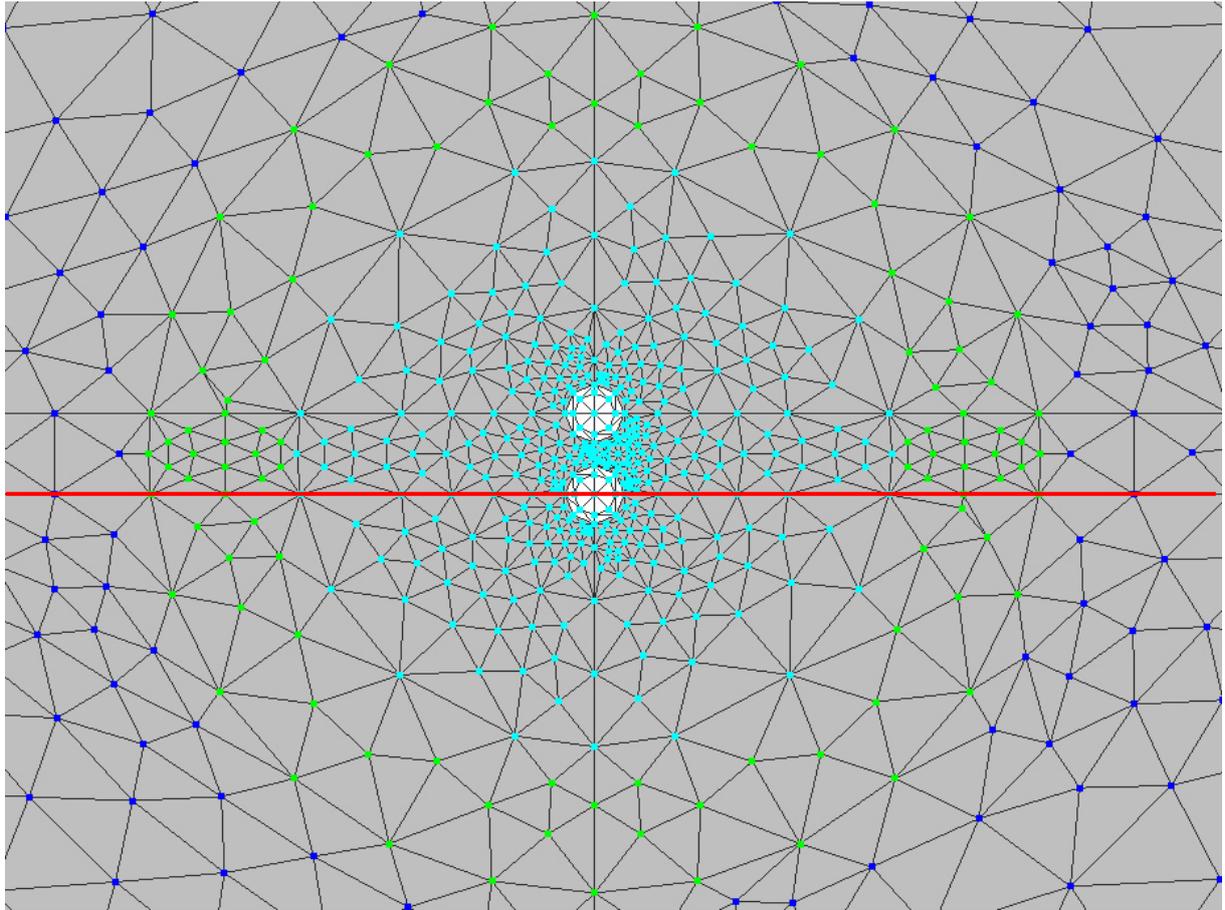


Abb. 3-26 Numerisches Modell, Feld, Draufsicht Bereich Saugkerzenbaum, Darstellung ca. $40 \times 30 \text{ cm}^2$

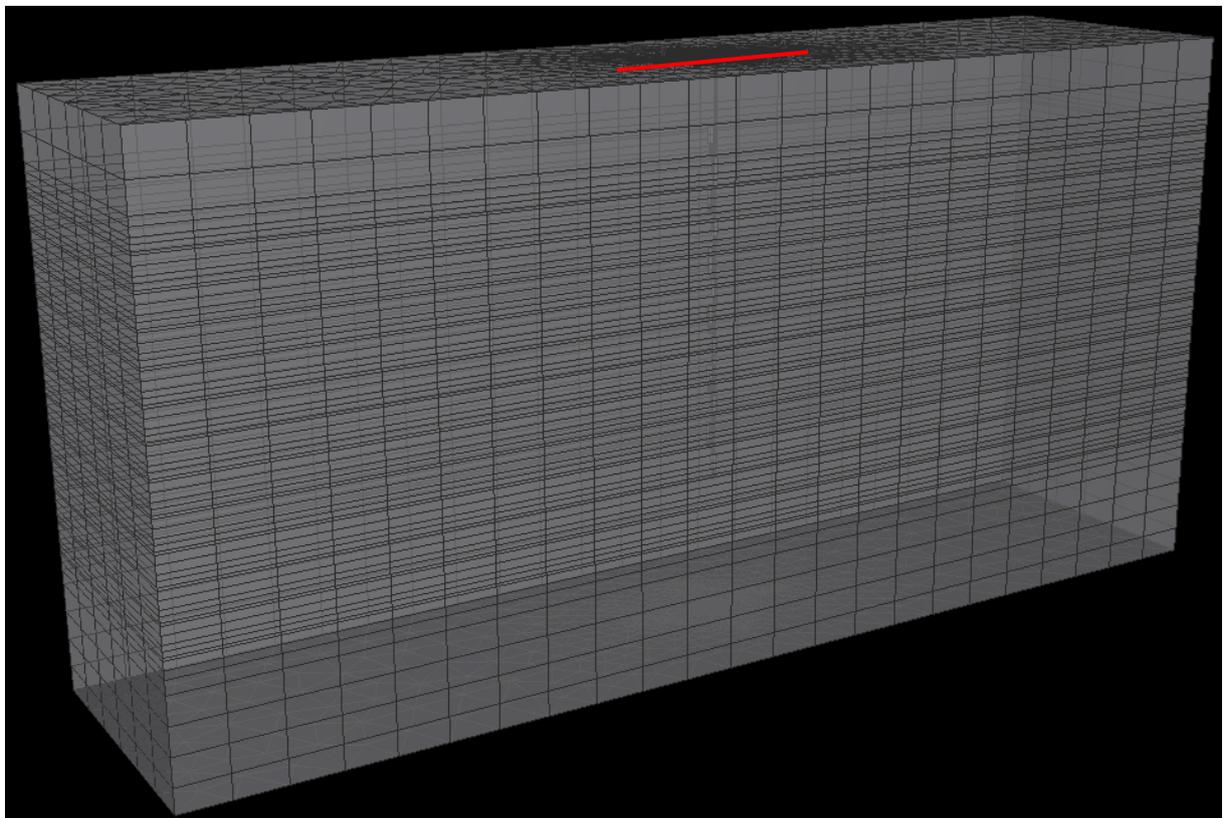


Abb. 3-27 Numerisches Modell, Feld, 3D-Darstellung; Länge 400 cm , Höhe 207 cm , Tiefe 100 cm

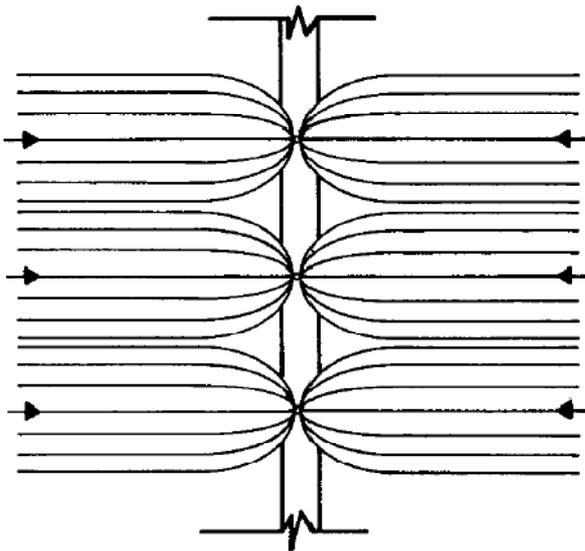


Abb. 3-28 Idealer Anstrombereich Grundwasser-Multi-layer-sampler im Pumpbetrieb; aus [Graham, 2006], figure 6, S. 6

Tab. 3-6 Mesh-Eigenschaften, Feld

Objekt	Anzahl
Nodes	74350
2D-Elements	2048
3D-Elements	141540

3.2.4 Szenarios, Anfangs- und Randbedingungen

Szenarios

Es werden zwei Szenarios mit je zwei Varianten betrachtet: eine Phase (trocken - T) ohne Sickerwasserfluss sowie eine Phase (feucht - F) mit Sickerwasserfluss. Beide Szenarios werden einmal mit hohem (H) und einmal mit niedrigem (N) Grundwasserstand betrachtet. Somit ist es möglich, den Anstrom der Kerzen in der gesättigten Zone (feuchte und trockene Varianten mit hohem Grundwasserspiegel T-H und F-H) sowie die Strömungsverhältnisse im Übergangsbereich SUIR und der ungesättigten Zone mit unterschiedlichen Sickerwassermengen (feuchte/trockene Varianten mit niedrigem Grundwasserspiegel) zu untersuchen.

Saugkerzen, die sich unterhalb des Grundwasserspiegels befinden, werden, ähnlich den Ausführungen von [Graham, 2006], Abb. 3-28, ausschließlich vom Grundwasser gespeist und aus der Schicht entnehmen, in der sie sich befinden.

Für jene Saugkerzen im ungesättigten Bereich ist zu erwarten, dass bei niedrigem Grundwasserstand und keiner Sickerwasserbewegung (Szenario T-N) sich ein Gebiet mit stark negativem Matrixpotential in der Mitte der Saugkerzen bildet; die oberhalb angelegte „constraint“-Randbedingung (siehe zur Art dieser Randbedingung Ausführungen weiter unten) wird entsprechend den Einzugsbereich der oberen Kerzen prägen, die unterhalb liegenden Saugkerzen werden vom Kapillaraufstieg und dem aufsteigendem Grundwasser zehren. Bei Szenario F-N (Sickerwasserfluss, geringer Grundwasserspiegel) wird sich, je nach Sickerwasservolumenstrom, der Einzugsbereich der Saugkerzen nach oben ausdehnen. Bei den Szenarios T-H und F-H (hohe Grundwasserspiegel) ist damit zu rechnen, dass das Einzugsgebiet der Kerzen stärker zum Grundwasser gerichtet ist.

Randbedingungen

Im Programm HYDRUS stehen dem Benutzer zwei Typen von Zulauf-Randbedingungen zur Verfügung: eine Dirichlet-Randbedingung (1. Art) – „constant/variable head“ – und eine Neumann-

Randbedingung (2. Art) – „constant/variable flux“. Erstere hält einen festgelegten Potentialwert aufrecht und passt den entsprechenden Fluss an, letztere funktioniert umgekehrt, hält einen bestimmten Fluss und berechnet das sich ergebende Potential. Die Randbedingung „constant head“ kann bei bekannter Druckverteilung im Medium gewählt werden, was im vorliegenden Fall nicht gegeben ist. Außerdem würde die Randbedingung 1. Art eine Absenkung des Grundwasserspiegels bei einem Pumpvorgang nicht zulassen, sondern durch einen erhöhten Zufluss ausgleichen. Zur Berechnung des spezifischen Zuflusses wurde folgendermaßen verfahren.

Aus dem bekannten hydraulischen Gradienten $i = -0.0015$ und der gesättigten horizontalen hydraulischen Leitfähigkeit $k_{s,h} = 2.1 \cdot 10^{-3} m \cdot s^{-1} \approx 18134 cm \cdot d^{-1}$ kann die Filtergeschwindigkeit nach dem Darcy-Gesetz (3-6) berechnet werden. Der durchflossene Querschnitt entspricht der Modellbreite multipliziert mit der erforderlichen Grundwasserspiegelhöhe. Als Modelleingabe benötigt HYDRUS einen spezifischen Fluss q_s an einer Fläche, welcher sich demnach zu (3-7) ergibt.

$$v_D = -k_{s,h} \cdot i = 27.2 cm \cdot d^{-1} \quad (3-6)$$

$$q_s = \frac{Q}{A} = \frac{v_{s,h} \cdot A}{A} = -k_{s,h} \cdot i = v_D \quad (3-7)$$

Bei der Auswahl der unterstromigen Randbedingung wurde die „seepage face“-Randbedingung gewählt. Die „constant head“-RB würde den Rückstrom in das Modell aufgrund einer Grundwasserspiegelabsenkung innerhalb des Modells stark überschätzen, da die Grundwasserspiegelhöhe konstant gehalten wird; die „constant flux“-RB würde, unabhängig von dem im Modell verfügbaren Wasservolumen, grundsätzlich einen bestimmten Fluss aus dem Modell aufrechterhalten (ungeachtet der dadurch entstehenden, wohlmöglich stark negativen Matrixpotentiale). Die „seepage face“-RB reagiert auf einen schwankenden Grundwasserspiegel und fungiert nur als Auslaufbedingung. Allerdings ist diese Randbedingung lediglich im gesättigten Bereich der Grundwasserströmung aktiv und lässt keinen ungesättigten Fluss zu, wird in diesem Fall aber als zweckmäßigste Lösung angesehen.

Weiterhin wurde, wie schon bei der Simulation des Laborgerinnes, zur Minimierung des Einflusses der Randbedingung auf das Strömungsfeld in einem Bereich von etwa 30cm vor dem Auslauf die Leitfähigkeit des Materials stark erhöht. Abb. 3-31 zeigt bei dem Szenario T-H die Grundwasserströmung und das Matrixpotential auf den letzten 150cm der rechten Kante des Modells, der Saugkerzenbaum ist weiter Richtung Oberstrom positioniert. Die Randbedingung beeinflusst das Strömungsfeld in einem Bereich von ca. 50cm vor dem Auslauf (entspricht ca. 130cm nach dem Saugkerzenbaum); die Störung weiter oberstromig ist vernachlässigbar gering.

Als obere Randbedingung wird in einigen Modellvarianten (F-N, F-H) eine Randbedingung 2. Art an die Oberkante des Modells angelegt, um die Sickerwasserbewegung zu simulieren. Selbige fungiert zusätzlich als „constraint“-Randbedingung: [Fank, 1999] zeigt, dass im Aquifer unterhalb 180cm Tiefe das Matrixpotential nicht unterhalb $\psi < -100 cm$ sinkt (gehemmte Wasserbewegung aufgrund sehr geringer ungesättigter hydraulischer Leitfähigkeit oder rechtzeitige Aufweitung durch Sickerwasser); im Bereich des wiederverfüllten, gesiebten Materials ist zu vermuten, dass aufgrund des veränderten Kornspektrums und der dementsprechend veränderten hydraulischen Materialeigenschaften dennoch ein etwas geringeres Matrixpotential auftreten kann. Die

„constraint“-RB wird somit erst aktiv, wenn ein Matrixpotential $\psi < -150\text{cm}$ erreicht wurde; an der Oberkante des Modells wird in einem solchen Fall dieses Potential konstant gehalten, indem ein entsprechender Fluss in das System gegeben wird.

An den Innenbereich der Saugkerzen wird eine Randbedingung 1. Art angelegt (siehe vorherige Ausführungen in 3.2.3, S. 50 ff.). Zur Erfassung des an den Saugkerzen auftretenden Flusses stehen allerdings nur drei unterschiedliche Randbedingungen dieses Typs zur Verfügung. Die zwölf im Modell integrierten Saugkerzen werden in Vierergruppen auf die drei Randbedingungen, welche mit jeweils mit einem Potential von -600cmWS belegt sind, verteilt.

HYDRUS rechnet zu dem vom Benutzer angegebenen Druckpotential zusätzlich noch das geodätische Potential (je nach Höhe der Randbedingung) hinzu. Der an den Saugkerzen anliegende Druck wird im Feld durch eine Vakuumstation im Lysimeterkeller konstant bei -600hPa gehalten. Befindet sich in den Zulaufschläuchen Wasser, so ist die Beaufschlagung des geodätischen Potentials korrekt, sind die Schläuche jedoch luftgefüllt, so ist der Druck an den Saugkerzen konstant. Laut einer mündlichen Auskunft von J. Fank und der Bestätigung von G. v. Unold (UMS München) wird der Lufteintrittspunkt der Saugkerzen bei dem angelegten Unterdruck nicht erreicht – der „bubble-point“ liegt bei zirka -2000hPa (Anleitung SK20, UMS GmbH München, [2008]). Der Zuschlag des geodätischen Potentials wäre demnach korrekt.

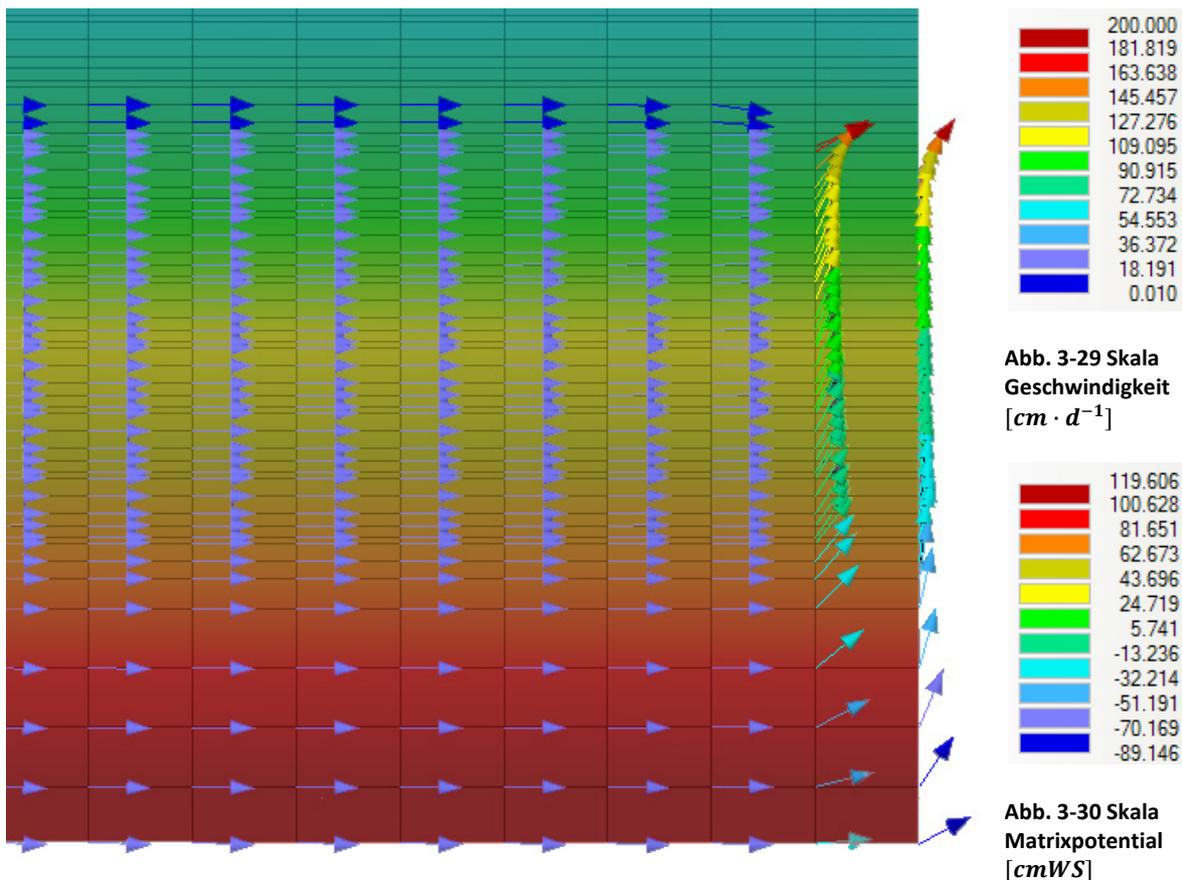


Abb. 3-31 Grundwasserströmung (Skala Abb. 3-29) und Matrixpotential (Skala Abb. 3-30) Szenario T-H, rechte Modellkante; dargestellt sind die letzten 150cm vor Auslauf

Anfangsbedingungen

Als Anfangsbedingungen werden für die jeweiligen Szenariovarianten folgende Vorsimulationen durchgeführt. Im oberen Bereich des Modells wurde ein Matrixpotential von $\psi \approx -90\text{cm}$ zugewiesen und bis auf die Höhe des jeweiligen Grundwasserstandes erhöht. Die obere Randbedingung war, während der Simulation mit einer Laufzeit von 30 Tagen, je nach Szenariovariante aktiv (F-N, F-H) beziehungsweise inaktiv (T-N, T-H). Die so erzielten Berechnungen dienen als Eingangswerte (Initialbedingungen) für die jeweiligen Varianten bei aktivierten Saugkerzen.

In einem 2D-Modell ($2 \times 2\text{m}^2$, inklusive Anisotropie) wurde das Austrocknen des Bodens „lower“ und des gesiebten Materials über einen Zeitraum von 365 Tagen simuliert. In den unteren 15cm wurde ein invariabler Grundwasserstrom über eine „constant flux“-RB auf der einen Seite und eine „seepage face“-RB auf der anderen Seite nachgebildet. Im Modell wurden im oberen Bereich unterschiedliche Startwerten des Matrixpotentials eingestellt; das Matrixpotential wurde jeweils bis zum gesättigten Grundwasserspiegel im unteren Bereich erhöht. Ein Observationspunkt auf der Höhe 190cm (ca. 175cm über Grundwasserspiegel) zeigt den zeitlichen Verlauf des Matrixpotentials und der Wassersättigung repräsentativ für die obere Schicht.

Die Abb. 3-32 und Abb. 3-33 zeigen, dass die Entwässerung beider Böden nur sehr langsam erfolgt; schon nach wenigen Tagen reduziert sich die Sättigung des Bodens, sodass einhergehend die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit stark zurückgeht und die Sickerwasserbewegung zusätzlich gehemmt wird. Weiterhin kann bei Vergleich mit Messdaten eine ähnliche Rückgangskurve verzeichnet werden (vgl. [Fank, 1999], Fig. 33, S.178). Wird an die Oberkante des quadratischen 2D-Modells eine Flussrandbedingung zur Wiederspiegelung des Sickerwasserflusses mit $q = 0.05\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ (Median des Sickerwasserflusses für Jahr 2005 bei $q = 0.04\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$) angelegt, so erhöht sich das Matrixpotential am Observationspunkt von $\psi = -100\text{cmWS}$ binnen zehn Tagen auf einen konstanten Wert von $\psi = -20\text{cmWS}$ für den Boden „lower“ und auf $\psi = -45\text{cmWS}$ für den gesiebten Boden. Auch dies entspricht in etwa den Messergebnissen von [Fank, 1999].

Anmerkung: Eine korrekte Parametrisierung eines Bodens diesen Typs für (un-)gesättigte Fließvorgänge ist möglicherweise mit dem Mualem-van-Genuchten-Modell nicht möglich. Dieser thematische Komplex stellt einen aktuellen Forschungsschwerpunkt des Instituts für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik der Universität Braunschweig unter der Leitung W. Durners [Durner, 2008] dar und soll an dieser Stelle nicht weiter erörtert werden. Es genügt jedoch festzuhalten, dass mit der Parametrisierung des Bodens Berechnungen erzielt werden, welche gut mit den Daten langjähriger Feldbeobachtungen übereinstimmen.

Mit den gewählten Mualem-van-Genuchten-Parametern war es möglich, das Austrocknen der oberen Bereiche des 3D-Modells nach der 30-tägigen Vorlaufsimulation bei allen Varianten zu verhindern; im Bodenmaterial („lower“) wird der Grenzwert $\psi < -100\text{cmWS}$ nur geringfügig unterschritten, im Bereich des gesiebten Materials ergibt $\psi \approx -130\text{cmWS}$; die „constraint“-Randbedingung ist zu keinem Zeitpunkt der Vorlaufzeit (d.h. ohne Probenahme der Saugkerzen) aktiv. Die Abb. 3-35 bis Abb. 3-38, S. 61, zeigen beispielhaft vier Darstellungen des Verlaufs der Austrocknung über 30 Tage des Szenarios T-N im vertikalen Schnitt, wie in Abb. 3-26 aufgetragen.

Anmerkung: Weitere Vertikalschnitte zeigen immer den in Abb. 3-26 bzw. Abb. 3-27, S. 55, mit roter Gerade dargestellten Schnitt durch den, in Fließrichtung gesehen, rechten Teil des Saugkerzenbaums.

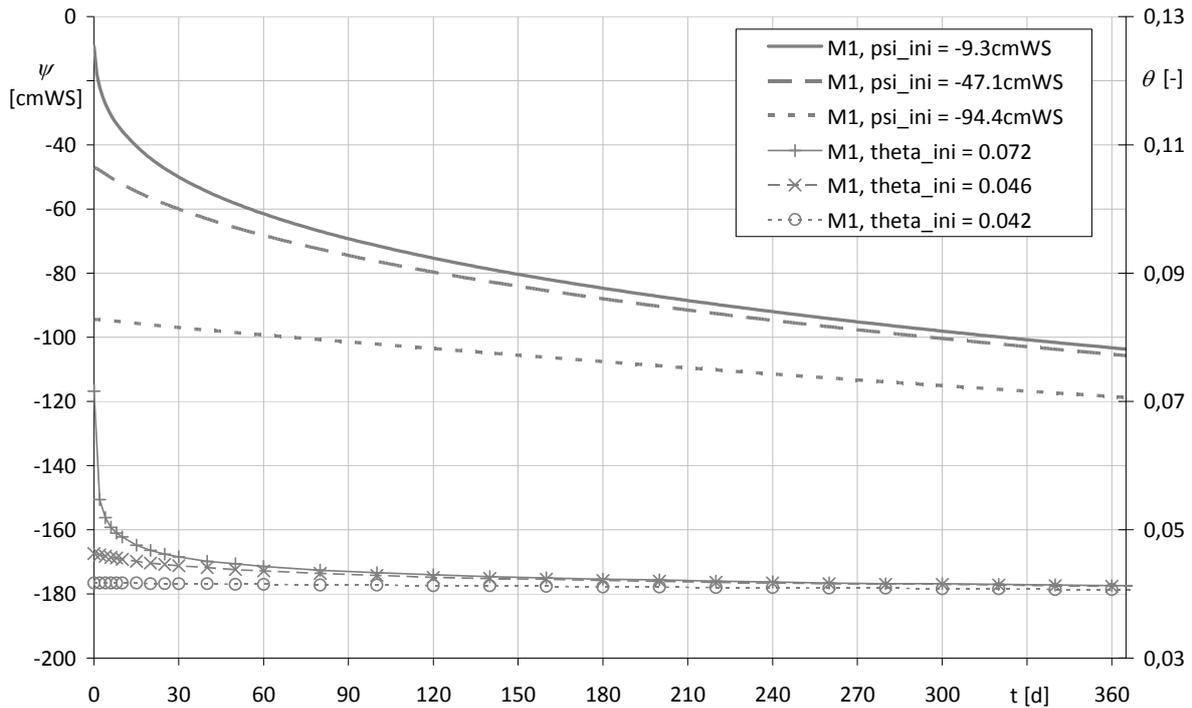


Abb. 3-32 Matrixpotential (linke Ordinate) und Sättigung (rechte Ordinate) in 175cm oberhalb GWS, 2D-Modell, Material 1 (Boden „lower“)

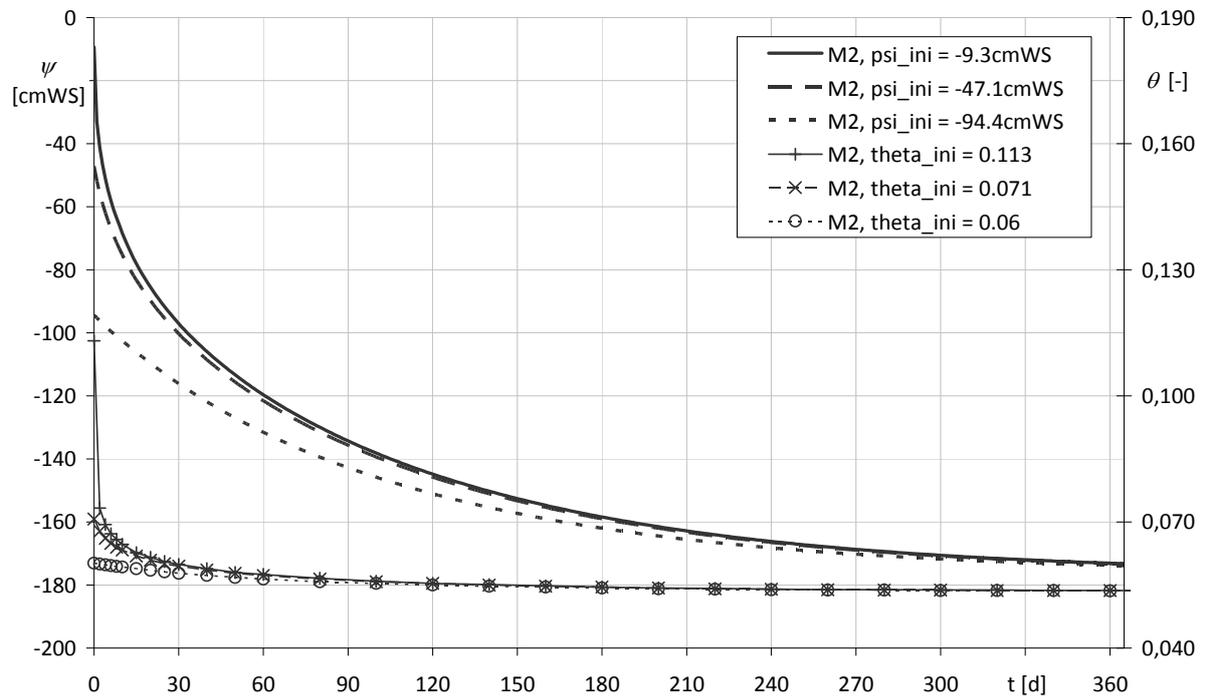


Abb. 3-33 Matrixpotential (linke Ordinate) und Sättigung (rechte Ordinate) in 175cm oberhalb GWS, 2D-Modell, Material 2 (Boden, gesiebt)

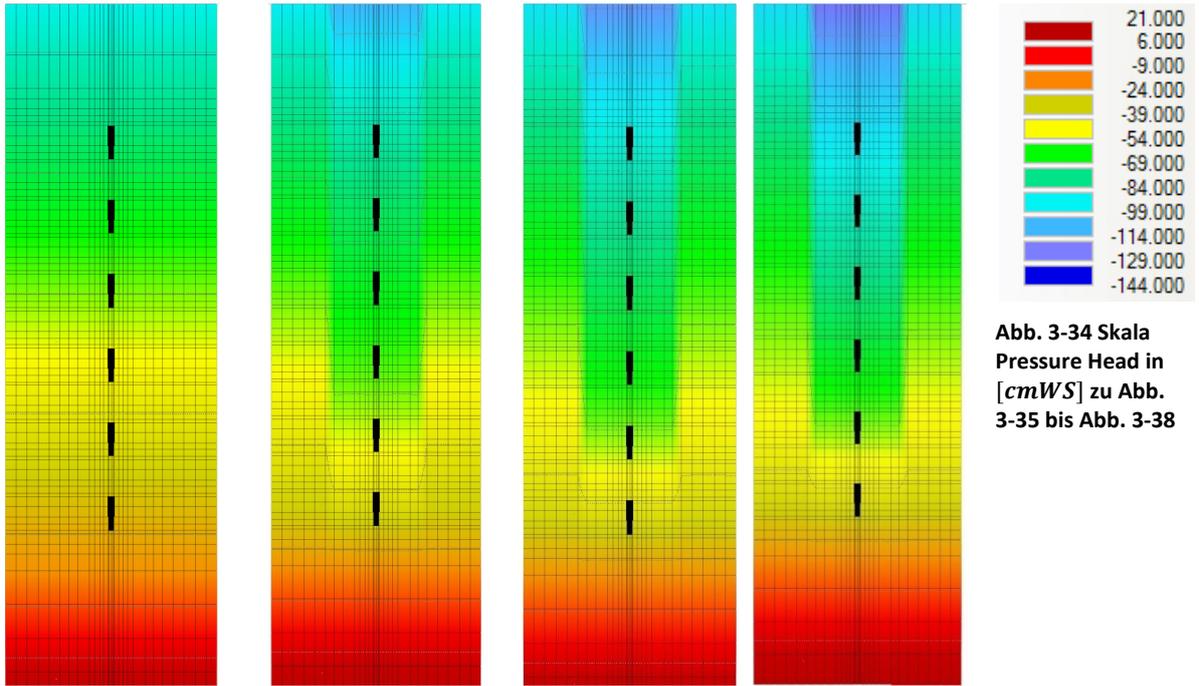


Abb. 3-34 Skala
Pressure Head in
[cmWS] zu Abb.
3-35 bis Abb. 3-38

Abb. 3-35 t=0d

Abb. 3-36 t=10d

Abb. 3-37 t=20d

Abb. 3-38 t=30d

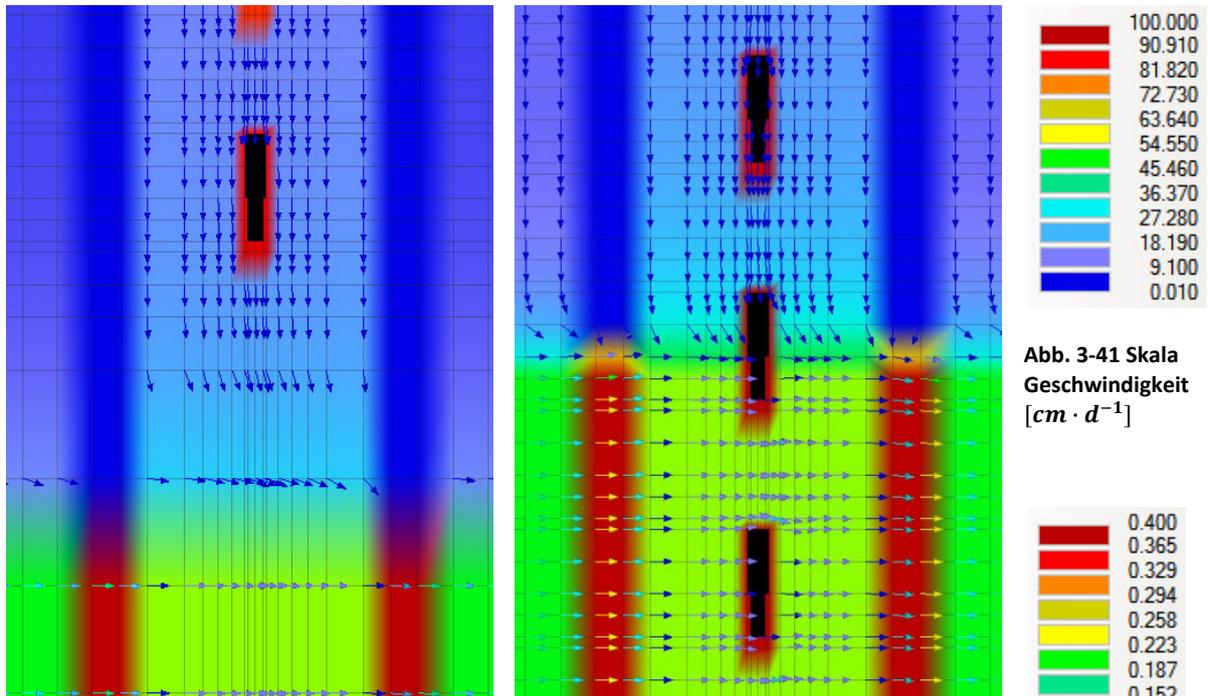


Abb. 3-41 Skala
Geschwindigkeit
[cm · d⁻¹]

Abb. 3-39 Fließvektoren (Skala Abb. 3-41)
und Sättigung (Skala Abb. 3-42),
Ruhezustand, Szenario T-N

Abb. 3-40 Fließvektoren (Skala Abb. 3-41)
und Sättigung (Skala Abb. 3-42),
Ruhezustand, Szenario F-H

Abb. 3-42 Skala
Sättigung [-]

Für die Simulationen im Ruhezustand (d.h. Saugkerzen sind nicht aktiv) ergibt sich das Bild der Fließvektoren ($v > 0.01 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$) und die Sättigung für die Szenarios T-N und F-H im Bereich des Kapillarsaums in einem Vertikalschnitt wie in Abb. 3-39 und Abb. 3-40 dargestellt. Die vertikale Sickerwasserbewegung im trockenen Szenario ist sehr gering (im Bereich des umgebenden Bodens ist die Fließgeschwindigkeit $v < 0.01 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$), hingegen ist im feuchten Szenario F-H eine deutlich höhere Sickerwassergeschwindigkeit zu erkennen. In beiden Fällen allerdings zeigt sich, dass es kaum Sickerwasserfluss im Bereich des Filterkieses gibt. Die Fließgeschwindigkeiten innerhalb der gesättigten Zone sind in etwa vergleichbar, dabei finden sich höhere Geschwindigkeiten innerhalb des Filterkieses, welcher eine höhere hydraulische Leitfähigkeit aufweist, als die anderen Materialien. Das Fließfeld im Bereich des Saugkerzenbaums ist horizontal (im gesättigten Bereich) und weist keine Beeinflussung der Randbedingungen auf.

Wenn die Geschwindigkeit für signifikante (Sicker-)Wasserbewegungen bei einem Wert von $v \approx 0.01 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ gesehen wird, so kann die Höhe des Kapillarsaums im umgebenden Bodenmaterial (Boden „lower“) und im wiederverfüllten, gesiebten Material auf ungefähr $h_c \approx 10 \text{ cm}$ sowie im Filterkies auf etwa $h_c \approx 3 \text{ cm}$ geschätzt werden (vgl. Abb. 3-43).

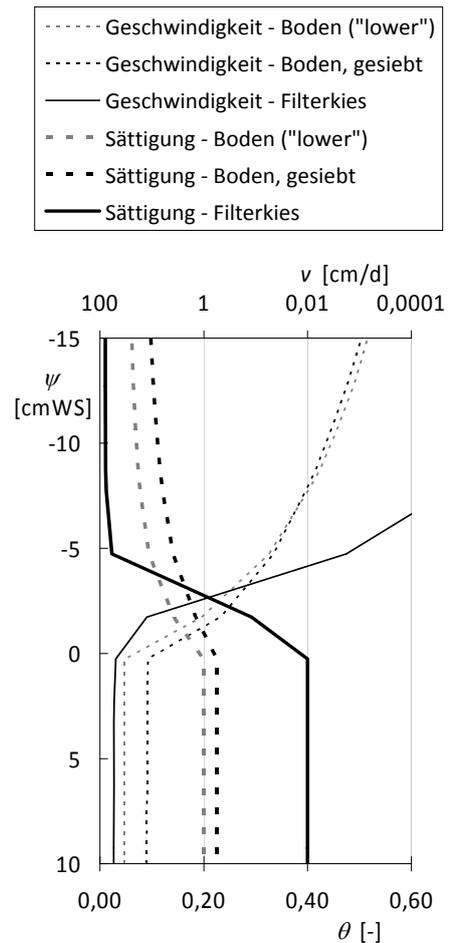


Abb. 3-43 Sättigung und Geschwindigkeit über Matrixpotential, Ruhezustand, Szenario

3.2.5 Bestimmung des Einzugsgebiets der Saugkerzen

Nach einer Vorlaufzeit von insgesamt 60 Tagen wurde die Randbedingung der Saugkerzen aktiviert. Da der Saugkerzenbaum im Feld und damit der an den Kerzen angelegte Unterdruck ständig aktiv bleibt, wird sich, je nach Sickerwasserzufluss, im Modell ein gewisser Gleichgewichtszustand einstellen. Der Zeitpunkt zur Auswertung des Einzugsgebiets der verschiedenen Szenarios wurde auf 60 Tage nach Einschalten der Randbedingung gelegt. In der Realität ist ein solcher Gleichgewichtszustand selten, lediglich nach langen Trockenperioden, zu erwarten, da durch den zeitlich und räumlich variablen Sickerwasserfluss ständig unterschiedlich gesättigte Bereiche auftreten. Durch die verschiedenen Szenarien sollen aber einige, mögliche Extrema nachgebildet und die jeweiligen Fließfelder anhand der Ergebnisse der Simulationen abgeschätzt werden.

Zur Bestimmung des Einzugsgebiets der Saugkerzen sollen folgende Annahmen vorangestellt werden. Das Einzugsgebiet der Saugkerzen im ungesättigten Bereich ist aufgrund sehr geringer Wasserbewegung im Ruhezustand nahezu zylindrischer Ausprägung. Die Höhenzunahme jenes zylinderförmigen Einzugsbereichs verringert sich aufgrund der Einwirkung der anderen Kerzen mit zunehmender Entfernung von der Saugkerze, maximale Höhe ist die Summe aus Saugkerzenlänge und zweimal dem halben Abstand zwischen zwei Saugkerzen.

Der Zustrom zur Saugkerze ist – im Gleichgewichtszustand – konstant, es gilt

$$Q = A_{SK,M} \cdot v_{SK} = A_Z \cdot v_Z \quad (3-8)$$

mit

$$A_{SK,M} = A_{Mantel} + A_{Kuppe} = 2 \cdot \pi \cdot r_{SK,M} \cdot h_{SK,M} + \pi \cdot r_{SK,M}^2 \quad (3-9)$$

$$A_Z = A_{Z,Mantel} + 2 \cdot A_{Z,Kuppe} = 2 \cdot \pi \cdot r_Z \cdot h_Z + 2 \cdot \pi \cdot r_Z^2 \quad (3-10)$$

mit $r_{SK,M}$ und $h_{SK,M}$ als Radius bzw. Höhe der Saugkerze sowie mit r_Z und h_Z als Radius bzw. Höhe des zylindrischen Einzugsgebiets der Saugkerze

Die aktive Oberfläche $A_{SK,M}$ sei die Außenseite der Saugkerze, die Geschwindigkeit v_{SK} sei die an der Oberfläche $A_{SK,M}$ simulierte. Die Fläche des durchströmten zylindrischen Einzugsgebiets A_Z in der Entfernung r_Z von der Saugkerze wird durch Höhe des zylindrischen Einzugsgebietes h_Z beschrieben. Dabei sei letztere über folgende Funktion beschrieben:

$$h_Z = -\frac{h_{SK}}{x^b} + c \quad (3-11)$$

Dabei ist x über das Verhältnis der beiden Radien der Saugkerze und des Einzugsgebietes definiert als

$$x = \frac{r_Z}{r_{SK,M}} \quad (3-12)$$

Der Parameter c sei die maximale Höhe des Ausbreitungszylinders (11cm) und b ein freier Formparameter. Für $b = 5$ ergibt sich die Höhe des Zylinders mit zunehmendem Radius wie in Abb. 3-44 dargestellt.

Die Geschwindigkeit eines sich im Einzugsgebiet einer Saugkerze befindlichen Partikels wird nach Gleichung (3-8) bei kleiner werdender Zylinderfläche zunehmen. Ziel ist es, jene Mindestgeschwindigkeit zu bestimmen, die ein Partikel in dem zylindrischen Einzugsgebiet besitzen muss, um die Saugkerze innerhalb einer definierten Zeit zu erreichen. Alle langsameren und weiter von der Saugkerze entfernteren Partikel, befinden sich zwar im Einzugsgebiet, werden die Saugkerze aber nicht innerhalb des definierten Zeitraums erreichen.

Die Bestimmung jener Mindestgeschwindigkeit wird iterativ gelöst, indem zunächst die Geschwindigkeit v_Z in Abhängigkeit des Radius r_Z bestimmt wird. Anschließend gilt es, die Zeit zu ermitteln, die ein Teilchen an der Position r_Z braucht, um zur Saugkerze zu gelangen. Dabei ist

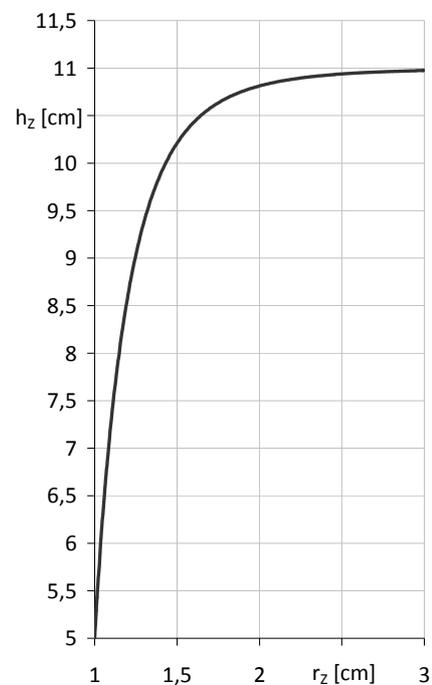


Abb. 3-44 Höhe des zylindrischen Einzugsgebiets h_Z mit zunehmendem Radius r_Z

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (3-13)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = \int_{s_1}^{s_2} \frac{1}{v} \cdot ds \quad (3-14)$$

Mit den Gleichungen (3-8) bis (3-11) folgt

$$t = \frac{1}{v_{SK} \cdot A_{SK,M}} \cdot \int_{r_{SK}}^{r_Z} A_Z \cdot dr \quad (3-15)$$

Nach Einsetzen, Integrieren und Umstellen ergibt sich

$$t = \frac{2 \cdot \pi}{v_{SK} \cdot A_{SK,M}} \left[\frac{c}{2} (r_Z^2 - r_{SK}^2) - \frac{h_{SK} \cdot r_{SK}^b}{2-b} (r_Z^{2-b} - r_{SK}^{2-b}) + \frac{1}{3} (r_Z^3 - r_{SK}^3) \right] \quad (3-16)$$

Nun kann die Zeit bestimmt werden, welche ein Partikel von einem bestimmten Punkt der Oberfläche A_Z bis zur Saugkerze (Fläche $A_{SK,M}$) benötigt und somit iterativ das Einzugsgebiet (bzw. der „kritische Radius“) abgegrenzt werden, aus welchem alle Partikel in einer bestimmten Zeit die Saugkerze erreichen. Diese Zeit entspricht der Länge der Probenahmeintervalle (im Normalfall eine Woche). Darüberhinaus ist es mit Gleichung (3-8) möglich, jene Mindestgeschwindigkeit zu bestimmen, die ein Partikel am „kritischen Radius“ besitzt.

In Abb. 3-48 und Abb. 3-49 werden simulierte und berechnete Geschwindigkeiten bezüglich des Abstands zur Saugkerze gegenübergestellt. Beim Vergleich stellte sich heraus, dass ein Formbeiwert von $b = 0$ den Werten der Simulation am ehesten entsprach; dies bedeutete, dass bei zunehmender Entfernung von der Saugkerze die Höhe des zylindrischen Einzugsgebietes konstant bliebe, was in der Realität sicherlich nicht der Fall ist. Die beste Übereinstimmung kann im Bereich der Saugkerzen 4 und 6, also auf mittlerer Höhe des Saugkerzenbaums, erkannt werden; in diesem Bereich scheint die Annahme eines zylindrischen Anstroms am ehesten zutreffend. Offenbar ist die Form des Einzugsgebietes im Bereich der übrigen Saugkerzen eine andere; so wurde das aufsteigende Kapillarwasser (im Bereich der unteren Saugkerzen) oder das von oben perkolierende Sickerwasser (im Bereich der oberen Kerzen) sowie eine gegenseitige Beeinflussung der Kerzen bei der Berechnung nicht beachtet, obgleich letzteres wohl in weiterer Entfernung der betrachteten Saugkerze von Bedeutung sein wird. Die analytische Bestimmung der Einzugsgebietsform soll allerdings nicht Gegenstand der Fragestellung und die Abschätzung der Mindestgeschwindigkeit anhand der getroffenen Annahmen für diesen Fall ausreichend sein. Wenn überdies bedacht wird, dass die Fließgeschwindigkeiten innerhalb der ungesättigten Zone sehr gering sind (z.B. $v \approx 0.01 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$), und die dabei zurückgelegte Entfernung innerhalb von sieben Tagen (Länge des Probenahmeintervalls in Wagna) lediglich $ds = 0.07 \text{ cm}$ beträgt, wird deutlich, dass das Einzugsgebiet sehr geringe Ausmaße hat. Die Bestimmung der Mindestgeschwindigkeit wird im Folgenden zumindest als grobe Näherung zur Abgrenzung des Einzugsgebietes gesehen.

In HYDRUS wird nun die Geschwindigkeit an der Saugkerze abgelesen und alle Fließvektoren, die einen geringeren Wert als die erforderliche Mindestgeschwindigkeit zum Erreichen der Saugkerze besitzen, ausgeblendet. Da sich die Geschwindigkeiten an den verschiedenen Saugkerzen unterscheiden und die Ausprägung des Einzugsgebietes nicht bekannt ist, sondern nur als

zylindrische Form angenommen wurde, ferner beim Vergleich der berechneten und simulierten Werte beschriebene Differenzen auftraten, wird die Zeit zur Bestimmung der Mindestgeschwindigkeit (und damit das Einzugsgebiet der Saugkerzen) um 50% verlängert und somit überschläglich das Einzugsgebiet für eine Fließzeit von zehn Tagen bestimmt.

Anmerkung: In den Abb. 3-50 bis Abb. 3-55 sind die jeweiligen Geschwindigkeiten an den dargestellten Saugkerzen verwendet, um die Mindestgeschwindigkeit zur Ausblendung nicht an der Probenahme beteiligter Wasserpartikel und damit das Einzugsgebiet der Saugkerzen zu bestimmen.

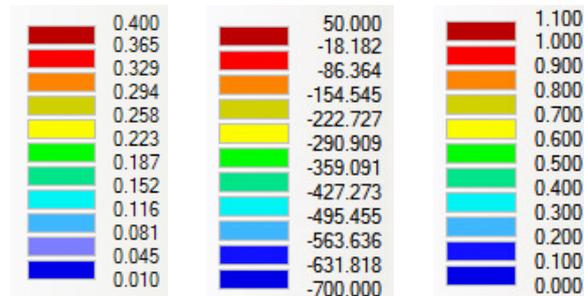


Abb. 3-45 Skala Sättigung [-]

Abb. 3-46 Skala Matrixpotential [cmWS]

Abb. 3-47 Skala Geschwindigkeit [cm · d⁻¹]

Bei den Szenarien mit niedrigem Grundwasserstand ist für das Einzugsgebiet der im ungesättigten Bereich gelegenen Saugkerzen folgendes zu beobachten: die obersten Kerzen werden vom nachfließenden Sickerwasser gespeist und bilden ein nach oben gerichtetes Einzugsgebiet aus (vgl. Abb. 3-50, Abb. 3-53); die in der Nähe des Grundwasser gelegenen Kerzen dehnen ihren Einflussbereich nach unten aus und erhalten Wasser aus dem Kapillarsaum bzw. dem Grundwasser (vgl. Abb. 3-52, Abb. 3-55); die auf mittlerer Höhe gelegenen Saugkerzen erhalten ihr Wasser aus direkter Umgebung (vgl. Abb. 3-51, Abb. 3-54), da sich im umgebenden Bereich hohe, negative Werte des Matrixpotential ausbilden, was daran liegt, dass die oberhalb und unterhalb befindlich Saugkerzen das verfügbare Wasser aufnehmen und das Einzugsgebiet der mittleren Saugkerzen begrenzen (vgl. auch Abb. 3-56).

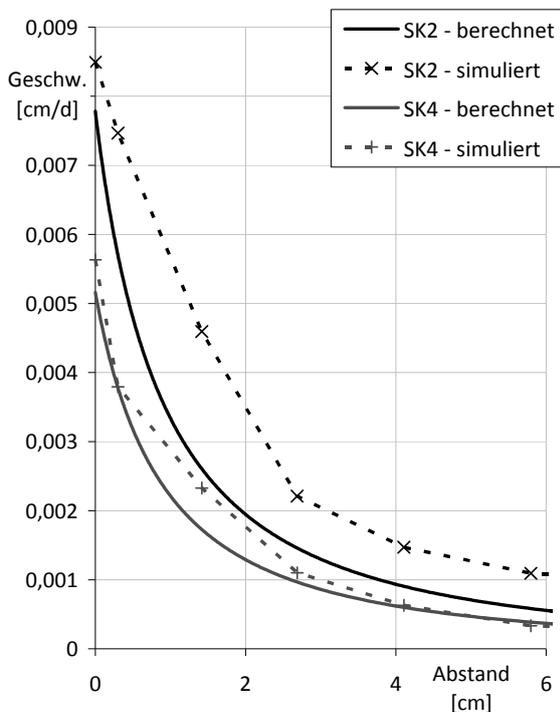


Abb. 3-48 Geschwindigkeit vs. Abstand zur Saugkerze, simulierte und berechnete Werte; oberer, ungesättigter Bereich, Szenario T-N

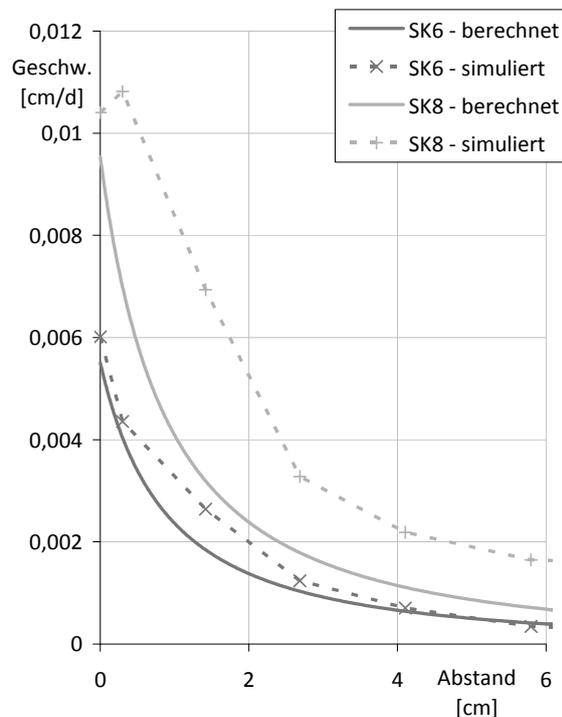


Abb. 3-49 Geschwindigkeit vs. Abstand zur Saugkerze, simulierte und berechnete Werte; unterer, ungesättigter Bereich, Szenario T-N

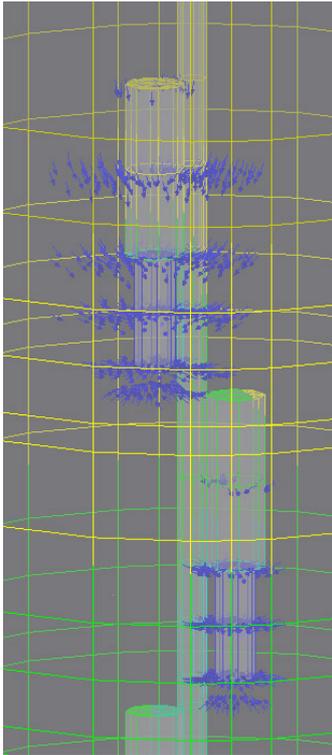


Abb. 3-50 Einzugsgebiet SK1, SK2;
Fließvektoren (Skala Abb. 3-47),
Matrixpotential (Skala Abb. 3-46);
Szenario T-N

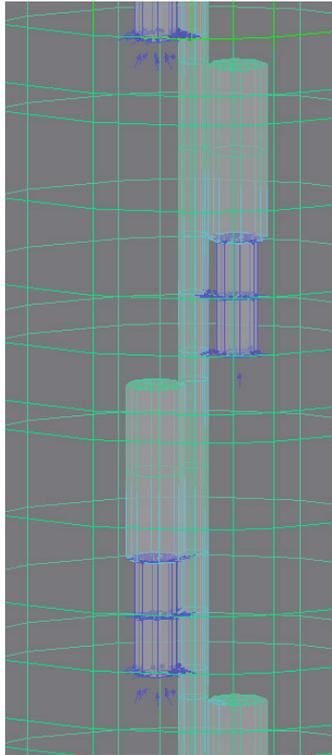


Abb. 3-51 Einzugsgebiet SK4, SK5;
Fließvektoren (Skala Abb. 3-47),
Matrixpotential (Skala Abb. 3-46);
Szenario T-N

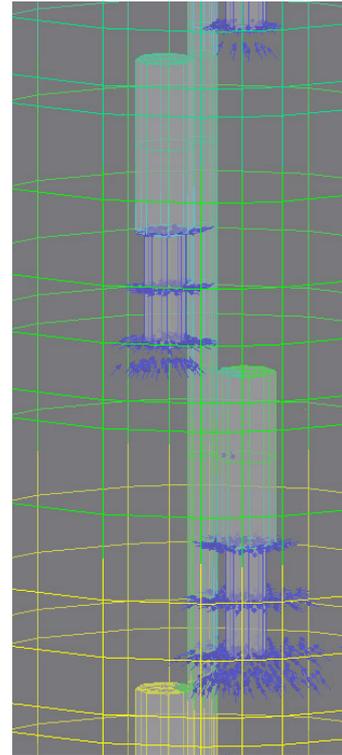


Abb. 3-52 Einzugsgebiet SK7, SK8;
Fließvektoren (Skala Abb. 3-47),
Matrixpotential (Skala Abb. 3-46);
Szenario T-N

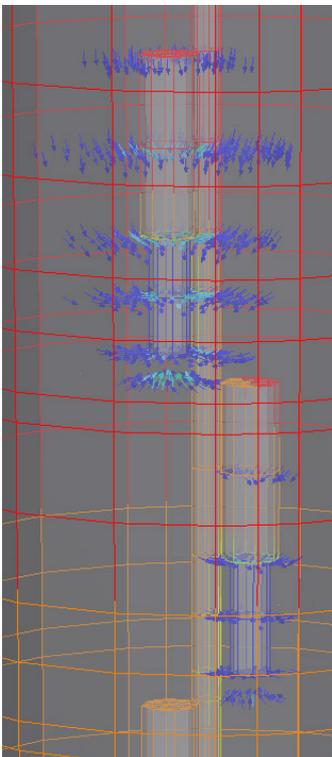


Abb. 3-53 Einzugsgebiet SK1, SK2;
Fließvektoren (Skala Abb. 3-47),
Matrixpotential (Skala Abb. 3-46);
Szenario F-N

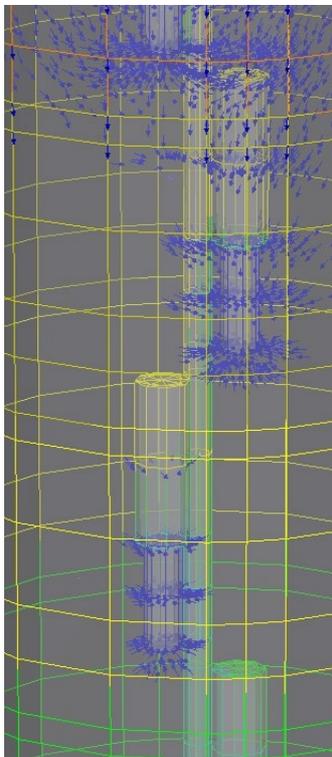


Abb. 3-54 Einzugsgebiet SK4, SK5;
Fließvektoren (Skala Abb. 3-47),
Matrixpotential (Skala Abb. 3-46);
Szenario F-N

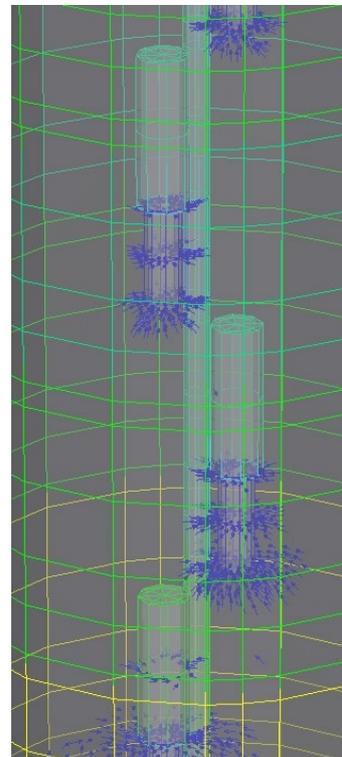


Abb. 3-55 Einzugsgebiet SK7, SK8;
Fließvektoren (Skala Abb. 3-47),
Matrixpotential (Skala Abb. 3-46);
Szenario F-N

In Abb. 3-56 ist die Situation nach 60 Tagen Simulationszeit für das Szenario F-N als Vertikalschnitt im Bereich des Saugkerzenbaums dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Matrixpotential auf Höhe der mittleren Saugkerzen stark negative Werte aufweist ($\psi \approx -500 \text{ cmWS}$) und im ober- und unterliegenden Bereich aufgrund der Wiederaufsättigung durch Sicker- bzw. Grund-/Kapillarwasser ansteigt. Dabei dehnt sich das beprobte Gebiet im ungesättigten Bereich maximal bis zum angrenzenden Filterbereich aus, welcher im unteren Teil der Abbildung anhand der hohen Sättigung (rote Hintergrundfärbung) und im darüberliegenden Gebiet durch die intensivere Blaufärbung zu erkennen ist. Auch ist eine erhöhte Sättigung im Bereich der unteren Saugkerze zu sehen; der Einzugsbereich dieser wird stark vom aufsteigenden Kapillarwasser geprägt.

In Abb. 3-58 ist das Anstromverhalten der Saugkerzen innerhalb des Übergangsbereichs vom Kapillarsaum zur gesättigten Zone dargestellt. Dabei kann die oben ausgeführte Abgrenzung des Einzugsgebiets durch Ausblenden von am Zustrom zur Kerze unbeteiligter Fließvektoren nicht durchgeführt werden, da das Einzugsgebiet durch die Grundwasserströmung geprägt und die Ausprägung desselben nicht in solch einfacher Weise abzuschätzen ist. Es werden die Szenarien mit hohen Grundwasserständen zur Auswertung herangezogen (T-H und F-H). Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird zunächst der in Abb. 3-27 dargestellte 2D-Schnitt zur Abschätzung des Einzugsgebietes genutzt (in Fließrichtung rechter Teil des Saugkerzenbaums). Der durch die Probenahme hervorgerufene Aufstieg des Kapillar- bzw. Grundwassers findet ausschließlich innerhalb des wiederverfüllten Materials statt – auch in diesem Übergangsbereich wirkt der schnell entwässernde Filtersand als Barriere und Abgrenzung gegenüber dem umgebenden Bodenmaterial. Die Aufstiegsgeschwindigkeiten liegen bei etwa $v < 2 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$; eine Probenahme über ein Intervall von sieben Tage mit einer Saugkerze im Abstand von maximal $dh \approx 15 \text{ cm}$ von der gesättigten Zone würde demnach vom Grundwasser geprägt sein.

Die in Abb. 3-60 gezeigte 3D-Ansicht des Strömungsverhaltens im Kapillarsaumbereich dient zur Verdeutlichung des Anstroms der im teilgesättigten Bereich befindlichen Saugkerzen; die Grundwasseroberfläche ist im Bereich des porösen Materials der ersten vollständig dargestellten Saugkerze von unten situiert.

Abb. 3-59 zeigt das Fließverhalten zu den Saugkerzen, welche sich im gesättigten Bereich des Grundwasserleiters befinden. Die dargestellten Fließvektoren sind weitestgehend gleichförmig ausgerichtet und das Einzugsgebiet der Saugkerzen erstreckt sich in Richtung des zuströmenden Grundwassers im Einbauniveau.

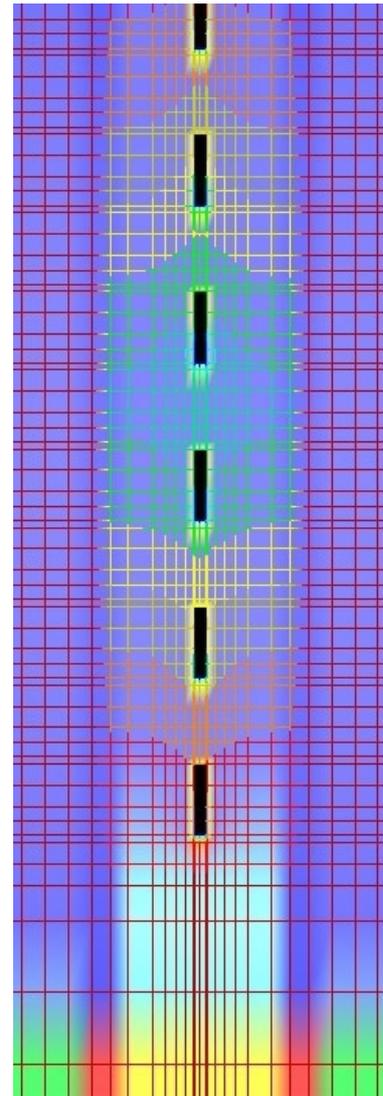


Abb. 3-56 Vertikalschnitt, Sättigung (Skala Abb. 3-45) als Füllung, Matrixpotential (Skala Abb. 3-46) als Zellbegrenzung

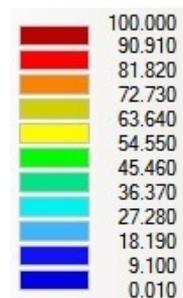


Abb. 3-57 Skala Geschwindigkeit [$\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$]

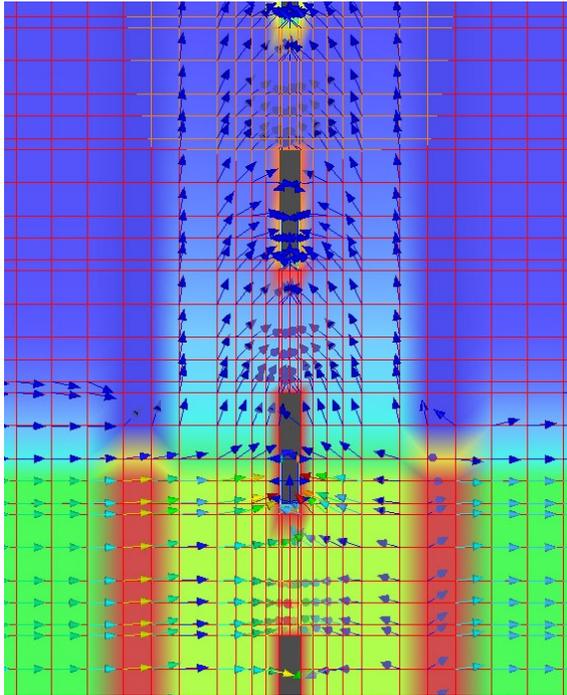


Abb. 3-58 Fließfeld im Bereich Kapillarsaum (SK2 bis SK8); Fließvektoren (Skala Abb. 3-57), Sättigung (Skala Abb. 3-45) als Füllung, Matrixpotential als Zellbegrenzung (Skala Abb. 3-46); Szenario T-H

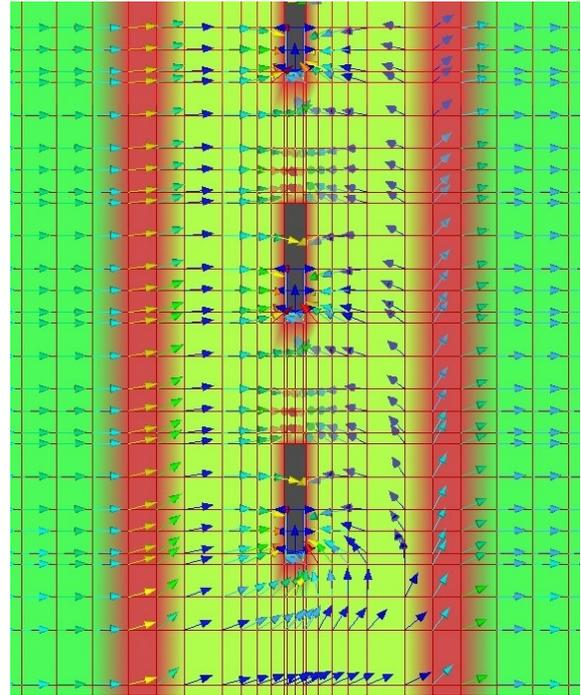


Abb. 3-59 Fließfeld im Bereich Grundwasser (SK8 bis SK12); Fließvektoren (Skala Abb. 3-57), Sättigung (Skala Abb. 3-45) als Füllung, Matrixpotential als Zellbegrenzung (Skala Abb. 3-46); Szenario T-H

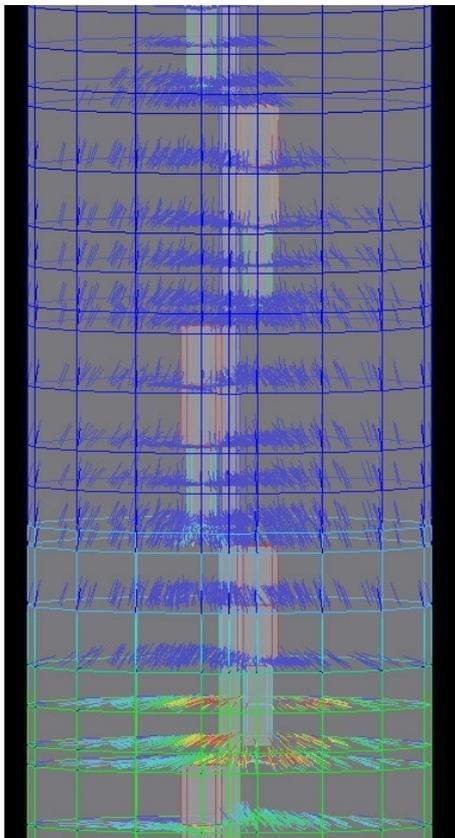


Abb. 3-60 Fließfeld im Bereich Kapillarsaum (SK3 bis SK7); 3D-Ansicht in Fließrichtung; Fließvektoren (Skala Abb. 3-57), Sättigung als Zellbegrenzung (Skala Abb. 3-45); Szenario T-H

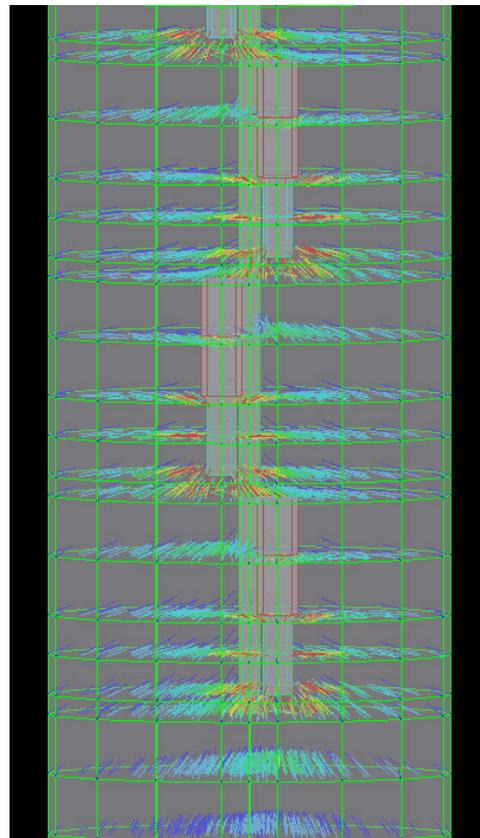


Abb. 3-61 Fließfeld im Bereich Grundwasser (SK9 bis SK12); 3D-Ansicht in Fließrichtung; Fließvektoren (Skala Abb. 3-57), Sättigung als Zellbegrenzung (Skala Abb. 3-45); Szenario T-H

Im Abstrom kommt es zu einer Ablenkung der Fließvektoren aufgrund der Aktivität der Saugkerzen und zum Ansaugen von Wasser, welches aus tiefergelegenen Bereichen stammt; dies wird besonders anhand der untersten Saugkerze deutlich. Das aus dem Abstrom gefasste Wasser stellt allerdings nur einen kleinen Teil des Probevolumens dar; das Haupteinzugsgebiet der Saugkerzen ist der direkte, horizontale Anstrom sowie, im lateralen Bereich der Kerzen, der Anstrom aus dem Filterkies und umliegender Gebiete gleichen Höhenniveaus.

3.2.6 Vergleich der Simulationen mit Feldmessungen

Mit Hilfe der drei verfügbaren, einzeln auswertbaren Potentialrandbedingungen wurden die Entnahmemengen pro Saugkerze innerhalb der Simulationen der Szenarien T-H und F-H ermittelt und mit jenen der Feldmessung verglichen. Die Reduktion der Entnahmemenge ergibt sich beispielhaft für ausgewählte Saugkerzen aus Szenario T-H, wie in Abb. 3-62 dargestellt. So lässt sich bei den im ungesättigten Bereich befindlichen Kerzen eine Annäherung an einen stationären Wert nach etwa 50 Tagen erkennen, während die im gesättigten Bereich, beziehungsweise nahe dem Grundwasser, befindlichen Saugkerzen eine sofortige Kontinuität bei der Volumenspende der Beprobung aufweisen.

Es wurde, unter Verwendung des Durchflusses zum Zeitpunkt $t = 60d$, jenes Volumen bestimmt, welches nach einem Intervall von sieben Tagen pro Saugkerze gefasst würde. Das innerhalb des genannten Zeitintervalls maximal mögliche, zu fassende Volumen beträgt $600ml$ (Fassungsvolumen der Probenahmebehälter in Wagna); höhere Ergebnisse wurden auf diesen Wert reduziert. Dies war ausschließlich im gesättigten Bereich und der Übergangszone zum Kapillarsaum der Fall. Außerdem wurden die aus Feldmessungen gewonnenen, tiefenspezifischen Daten jeweils auf die Höhe der Grundwasseroberfläche normiert und zusammen mit den simulierten Probevolumina in Abb. 3-63 aufgetragen.

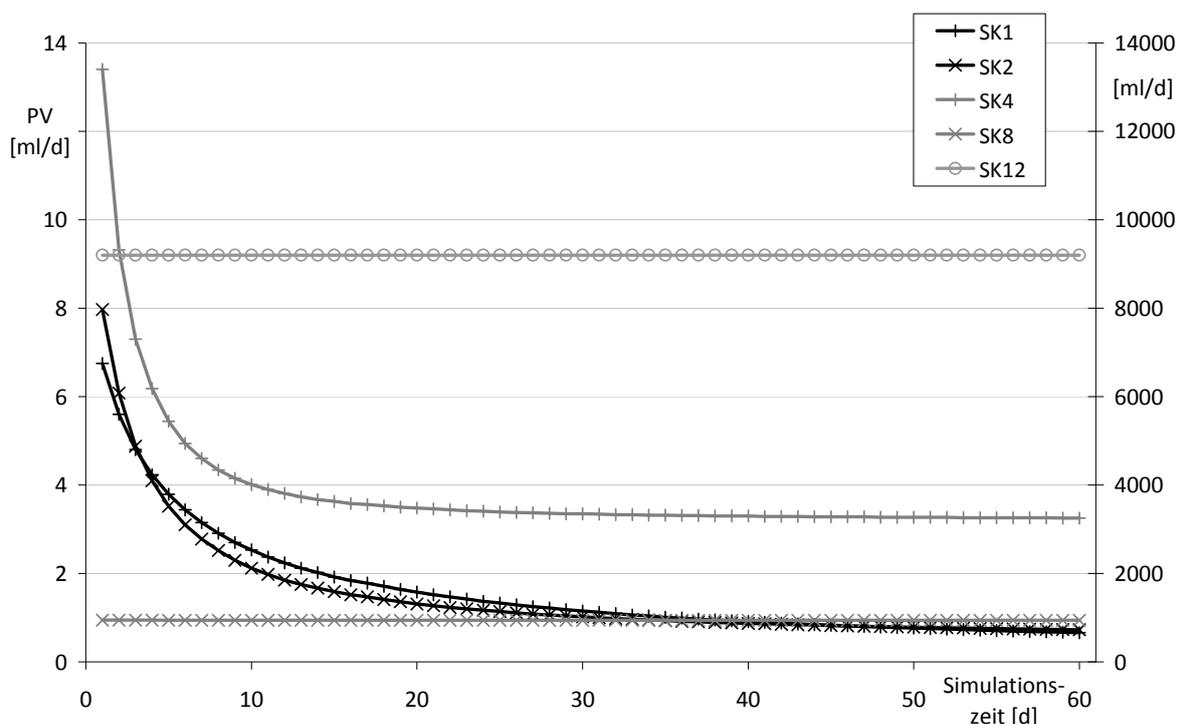


Abb. 3-62 Vergleich Entnahmemengen (Probevolumen PV) pro Saugkerze und Tag, Szenario T-H; SK1 bis SK4 auf linker Ordinate, SK8 und SK12 auf rechter Ordinate aufgetragen

Die Daten, welche bei der Simulation gewonnen wurden, stimmen mit den Feldmessungen relativ gut überein. Innerhalb des gesättigten Bereiches wird das maximale Probevolumen erreicht, oberhalb des Kapillarsaums werden vergleichbare Volumina mit Hilfe der Saugkerzen gezogen. Die Daten des Szenarios T-H, F-H und F-N zeigen im Übergangsbereich zur ungesättigten Zone allerdings etwas geringere Werte, als mit den Feldmessungen belegt sind, auch zeigt sich die Form der Kurve der Simulationswerte deutlich ausgeglichener. Eine Ursache für die beobachteten Unterschiede ist in der homogenen Verteilung des Materials bei der numerischen Simulation zu sehen; obgleich das wiederverfüllte Material gesiebt und größere Kiesbestandteile entfernt wurden, sind innerhalb des Bodens Inhomogenitäten im Kornspektrum vorhanden, die im Modell nicht explizit wiedergegeben sind. So ist auch die Anbindung der Saugkerzen an den Boden nicht mit Sicherheit gegeben, was die Probenahmemenge reduzierte. Weiterhin können durch verschieden starke Verdichtung des Bodens lokale Unterschiede der Anisotropie auftreten, welche ebenfalls nicht in das Modell integriert wurden. Die Messung und Quantifizierung der benötigten Parameter zur Verfeinerung des Modells stellt eine große Herausforderung und einen hohen Aufwand dar, welcher möglicherweise, obgleich höheren Dateninputs, nicht in größerer Modellgenauigkeit resultiert, was allerdings an anderer Stelle evaluiert werden sollte.

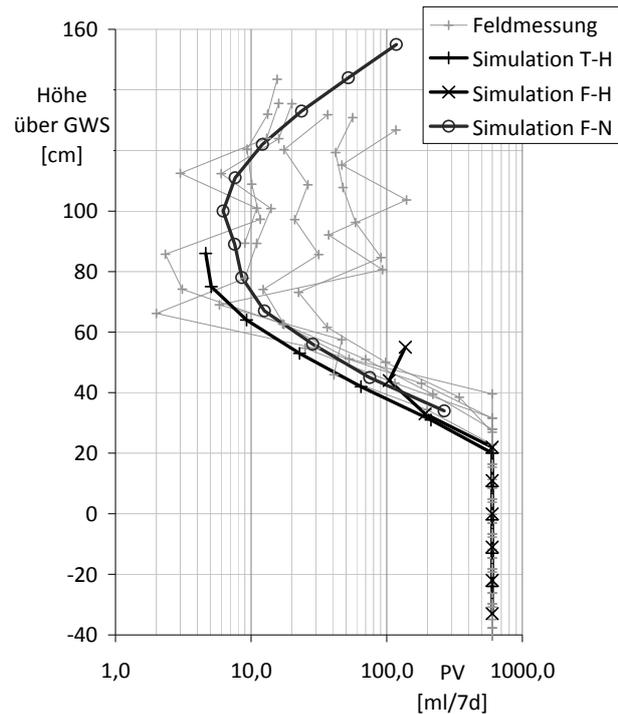


Abb. 3-63 Tiefenspezifisches Probevolumen PV, Vergleich Simulationswerte und Feldmessungen

3.2.7 Simulationen ohne Filterkies

Die Auswirkungen des Filterkieses (Isolation der Anlage bei Probenahme, Störung im Fließverhalten in der ungesättigten Zone) wurden mehrfach angesprochen. Beispielhaft wurden die Szenarios T-H und F-N ausgewählt und ohne Filtermaterial simuliert, letzteres wurde mit dem wiederverfüllten Material ersetzt. Die Abb. 3-64 und Abb. 3-65 zeigen die Ergebnisse der Simulationen.

Bei beiden Abbildungen ist der Bereich des wiederverfüllten Materials anhand des Unterschieds der Sättigung zu erkennen (hellblaue Färbung der Zellfüllung); in ebendiesem Bereich kommt es bei Szenario T-H, ähnlich den Varianten mit Filterkies, zu einem Aufstieg von Kapillar-/Grundwasser zu innerhalb der ungesättigten Zone gelegenen Saugkerzen. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass es zu einem seitlichen Zustrom von Wasser aus dem Bodenmaterial kommt. Dieser Zustrom wird bei Szenario T-H von zuvor aufgestiegenem Grundwasser gespeist, welches nahezu parallel zur Grundwasseroberfläche den jeweiligen Saugkerzen zuströmt. Für Szenario F-N besteht dieser seitliche Zustrom nahezu ausschließlich aus Sickerwasser (vgl. Abb. 3-64).

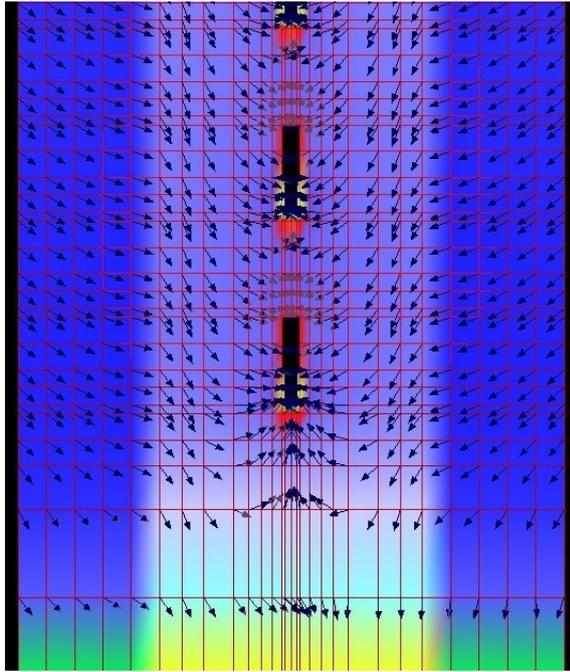


Abb. 3-64 Fließfeld im Bereich Kapillarsaum (SK8 bis SK12); Fließvektoren (Skala Abb. 3-57), Sättigung (Skala Abb. 3-45) als Füllung, Matrixpotential als Zellbegrenzung (Skala Abb. 3-46); Szenario F-N ohne Filterkies

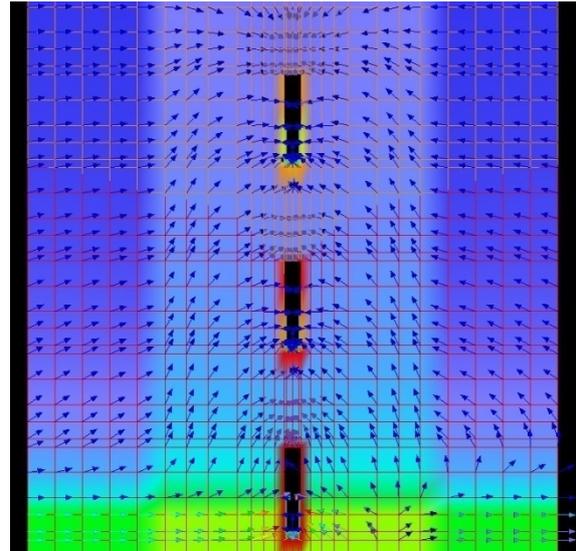


Abb. 3-65 Fließfeld im Bereich Kapillarsaum (SK2 bis SK6); Fließvektoren (Skala Abb. 3-57), Sättigung (Skala Abb. 3-45) als Füllung, Matrixpotential als Zellbegrenzung (Skala Abb. 3-46); Szenario T-H ohne Filterkies

Diese theoretische Überlegung zur Variation der Anlage hätte den Vorteil, dass das jeweilig tiefenspezifisch beprobte Gebiet nicht ausschließlich innerhalb des wiederverfüllten Materials läge, sondern sich auf die umliegende Bodenzone ausdehnte. Ferner zeigt sich anhand der Matrixpotentiale (Zellbegrenzung), dass die zuvor sehr hohen Werte von bis zu $\psi \approx -600\text{cmWS}$ innerhalb des wiederverfüllten Materials nunmehr ausschließlich in unmittelbarer Umgebung der Saugkerzen zu finden sind; im Boden sind Werte bis maximal $\psi < -100\text{cmWS}$, für das Szenario ohne Sickerwasser, bzw. $\psi < -40\text{cmWS}$, für das Szenario mit Sickerwasser, zu verzeichnen. Dies entspricht nahezu den Werten der Initialbedingungen, was bedeutet, dass die Saugkerzen einen deutlich geringeren Einfluss auf den Boden haben, als es bei der Variante mit Filterkies der Fall ist. Außerdem erhöhen sich die Probenahmeholumina innerhalb der ungesättigten Zone, da das beprobte Gebiet ein größeres und damit der Anstrom zu den Saugkerzen höher ist.

Die Störung im Anstrom aufgrund des Materialwechsels ist auch ohne Filterkies deutlich erkennbar; den Einfluss auf den Stofftransport gilt es in diesem Zusammenhang, v.a. unter Beachtung der Ergebnisse der Laborsimulationen (vgl. Abschnitt 2.4, S. 28 ff.) zu überprüfen.

3.2.8 Zusammenfassung der Simulationen der Feldanlage

Die Simulationen der Feldsituation mit dem Programm HYDRUS werden auf Basis der erlangten Ergebnisse, auch im Vergleich mit den Felddaten als erfolgreich betrachtet. Es ist mit Hilfe der verfügbaren bodenhydraulischen Analysen gelungen, die Materialien im Bereich des Saugkerzenbaums, das gesiebte, wiederverfüllte Material, den Filterkies und den umgebenden Boden, sowie die Anlage an sich in ein konzeptionelles und numerisches Modell zu überführen. Anhand der durchgeführten Simulationen bleibt festzuhalten, dass das Einzugsgebiet der Saugkerzen, welche sich in der ungesättigten Zone befinden zum einen von nachfließendem Sickerwasser, zum

anderen von aufsteigendem bzw. angesogenem Kapillarwasser geprägt ist. So bildet sich ein Bereich auf mittlerer Höhe zwischen Grundwasseroberfläche und oberster Saugkerze aus, welcher, je nach Höhe des Grundwasserspiegels und der Menge des Sickerwassers, relativ hohe, negative Werte des Matrixpotentials aufweist, da das Sickerwasser hauptsächlich von den oberen, das Grundwasser von den unteren Saugkerzen abgefasst wird. Seitlich begrenzend wirkt die angelegte Filterschicht; die äußerst geringe Sättigung und entsprechend niedrige, ungesättigte, hydraulische Leitfähigkeit innerhalb des verwendeten, kiesigen Materials lassen praktisch keine Wasserbewegung zu und schirmen das Beprobungsgebiet des Saugkerzenbaums vom umliegenden Material ab. Der Radius des Einzugsgebietes der Saugkerzen in der ungesättigten Zone kann auf wenige Zentimeter bzw. im, dem Grundwasser näherliegendem Bereich, auf wenige Dezimeter geschätzt werden.

Im gesättigten Bereich ist eine Störung aufgrund der Filterschicht nicht zu beobachten. Das Einzugsgebiet der Saugkerzen ergibt sich, ähnlich der Darstellung von [Graham, 2006], Abb. 3-28, S. 56, aus dem horizontalen Anstrom der Kerzen im jeweiligen Höhenniveau, wird im unteren Bereich des Saugkerzenbaums aber durch tiefere Schichten des Aquifers geprägt. Bei einer tiefengestaffelten Beprobung der gesättigten Zone stammen demnach die Proben der untersten Saugkerzen, je nach vorliegenden Gegebenheiten und Aufbau des Aquifers, nicht zwingend aus dem Niveau dieser Kerzen, was bei der Auswertung der Proben beachtet werden sollte.

4 EIGNUNG DES SAUGKERZENBAUMS ALS INSTRUMENT ZUR TIEFENGESTAFFELTEN PROBENAHME UND ALTERNATIVE EINSATZMÖGLICHKEITEN

4.1 Erkenntnisse aus Laborexperimenten, Felddaten und zugehörigen Simulationen

Sowohl das Laborexperiment mit dem künstlichen Gerinne, als auch die tiefengestaffelte Anlage im Messfeld Wagna konnten erfolgreich mit dem Modell HYDRUS simuliert und anhand von Messwerten validiert werden. Die Erkenntnisse der Experimente und Simulationen sind folgende:

- 1) Eine gegenseitige Beeinflussung der beim Laborexperiment verwendeten Saugkerzen oder eine signifikante Veränderung der hydraulischen Verhältnisse durch die Probenahme ist nicht zu erkennen, die Probenahme erfolgt in der direkten Umgebung. Die ermittelten Durchbruchkurven sind, unter Beachtung eines geringen zeitlichen Versatzes aufgrund des Totvolumens der Zulaufschläuche, der jeweiligen Höhe der Saugkerze zuzuweisen.
- 2) Die Unterschiede der Konzentrationsverläufe zwischen Experiment 1 und 2A sind auf den Einbau des Filterkieses zurückzuführen. Letzterer hat entscheidenden Einfluss auf die Ausprägung und Beschaffenheit der SUIR und damit den Konzentrationsverlauf sowie die vertikale Verteilung eines innerhalb des Kapillarsaums transportierten Stoffes.
- 3) Der Transport eines aus der ungesättigten Zone perkolierenden Stoffes erfolgt zunächst ober-/innerhalb des Kapillarsaums bzw. der SUIR. Es ist zu vermuten, dass die (partielle) Einmischung eines auf diese Weise transportierten Stoffes in das Grundwasser durch Störungen des Kapillarsaums aufgrund von strukturellen Unterschieden im Aquifer, wie einer Veränderung der Kornverteilung (z.B. Tonlinse, Filterkies), oder anderen Hindernissen (Keller- oder Brunnenwände), nach längerem Fließweg aufgrund von Dispersion oder durch Schwankungen des Grundwasserstandes erfolgt.
- 4) Das Einzugsgebiet der Saugkerzen der Feldanlage ist je nach Sickerwasserfluss und relativer Höhenlage der jeweiligen Kerze zum Grundwasserstand zu beurteilen. Oben gelegene Kerzen weisen bei allen Varianten ein nach oben ausgerichtetes Einzugsgebiet auf, Kerzen in der SUIR werden von aufsteigendem Kapillar- bzw. Grundwasser gespeist, auf mittlerem Niveau befindliche Kerzen zeigen einen Zustrom aus gleicher Höhe. Bei den Szenarien mit Sickerwasserfluss (F-N, F-H) werden mehr Saugkerzen von selbigem gespeist und die Zone, in welcher aufgrund der Probenahme hohe, negative Matrixpotentiale zu finden sind, bildet sich in größerer Tiefe aus, als bei den Szenarien ohne Sickerwasserfluss (T-N, T-H).
- 5) Der eingebrachte Filterkies begrenzt das Beprobungsgebiet der Saugkerzen. Innerhalb des wiederverfüllten Materials entstehen durch die limitierende Wirkung zum Teil hohe, negative Matrixpotentiale; ein Zustrom zu den Saugkerzen mittleren Niveaus ist kaum vorhanden, die Probenahmeholumina sind sehr gering. Ein seitlicher Anstrom durch den ungesättigten Bereich des Filterkieses ist praktisch nicht möglich. Eine ähnlich limitierende Wirkung wird bei dem zwischen Filterkies und gesiebtem Material eingebrachten, geschlitzten Filterrohr vermutet; die Anbindung des wiederverfüllten Bodens an den Filterkies und damit der seitliche Anstrom zu der Anlage wird durch dieses, vor allem in der ungesättigten Zone,

deutlich erschwert. Die Anbindung der beiden Bodenkörper kann durch eine Vergrößerung der Schlitzweite, so das Rohr aus einbautechnischen Gründen nötig ist, verbessert werden.

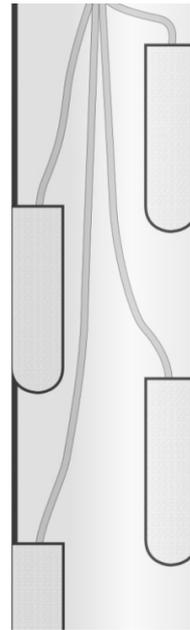
- 6) Der Radius des Einzugsgebietes der Saugkerzen im Feld kann mit Hilfe der Simulationen im oberen Bereich (je nach Sickerwasserzustrom) sowie im Bereich der SUIR auf wenige Dezimeter, auf mittlerer Höhe, im Bereich stark negativer Matrixpotentiale, auf wenige Zentimeter innerhalb eines Beprobungsintervalls von sieben Tagen geschätzt werden. Das Einzugsgebiet der sich unterhalb des Grundwasserspiegels befindlichen Saugkerzen entspricht der Höhenlage der jeweiligen Saugkerze und ist, je nach Grundwasserströmungsgeschwindigkeit, von unterschiedlichem Umfang.
- 7) Die aktuell verwendeten Definitionen zum „Ort der Beurteilung“ sind, schon auf Basis der Publikationen von [Silliman, et al., 2002], [Dunn, et al., 2003] oder [Berkowitz, et al., 2004], aber auch unter Beachtung der hierbei erneut nachgewiesenen Differenzen zu den Interpretationen des Stofftransports nach oberflächlichem Eintrag, zu überdenken. Dabei ist, neben der schon angesprochenen Untersuchung zum Einschichtverhalten eines Stoffes in das Grundwasser, eine detaillierte Prüfung der Messergebnisse derzeit vorgeschriebener Probenahmetechnik im Vergleich zu tiefenspezifischen Anlagen, welche es ermöglichen, auch in der ungesättigten Zone Proben zu gewinnen, durchzuführen. Ebenso sind die Rückschlüsse aus den Ergebnissen derzeitig verwendeter Probenahmesysteme bezüglich des Ursprungs und Umfangs einer Stoffemission äußerst kritisch zu bewerten.

4.2 Anpassungen und Modifikationen der tiefendifferenzierten Probeanlage sowie alternative Anwendungsmöglichkeiten

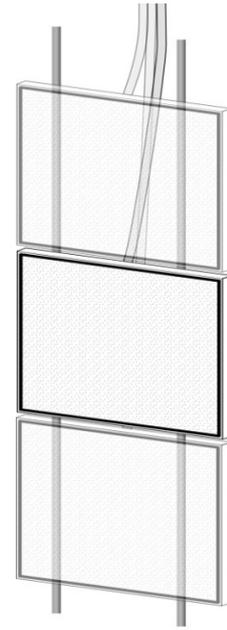
Bei der Realisierung einer neuen Anlage mit dem Konzept einer tiefenspezifischen Probenahme ergeben sich aus den o.g. Erkenntnissen die folgenden Punkte zur Verbesserung der Messergebnisse:

- 1) Von der Einbringung eines Filterkieses oder Filterrohres ist aufgrund der äußerst geringen ungesättigten, hydraulischen Leitfähigkeit und Anbindung der Böden abzusehen. Wenn es für die Errichtung aus technischen Gründen nötig ist, sollte ein Material gewählt werden, das dem umgebenden Boden ähnelt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Höhe des Kapillarsaums entsprechend der Einbauweise und späterer Setzungsprozesse ausbildet, was Einfluss auf den Stofftransport innerhalb der SUIR hat (vgl. Exp2, Abschnitt 2.4.3, S. 31 ff.).
- 2) Gleiche Beachtung sei der Kapillarsaumhöhe innerhalb des wiederverfüllten Materials geschenkt; in der Anlage Wagna war eine Siebung des Bodens aufgrund der größeren Skelettanteile nötig, da ansonsten eine Anbindung des Materials an die Saugkerzen deutlich schwieriger zu bewerkstelligen gewesen wäre. An einem Alternativstandort ist eine Verfüllung mit ungesiebttem Material zu überdenken.
- 3) Ferner sollte die Anbindung der Saugkerzen (oder ähnlicher Probenahmeverrichtungen) an den umgebenden Boden durch entsprechende Maßnahmen (Einschlämmen, Vibrationstechnik o.ä.) gewährleistet werden.
- 4) Um den durch die Probenahme entstehenden Eingriff in die hydraulischen Verhältnisse der umliegenden Bodenbereiche möglichst gering zu halten, ist eine Reduktion der an den Saugkerzen angelegten Potentiale, v.a. innerhalb der SUIR, zu erwägen.

Eine Veränderung der bestehenden Anlage ist lediglich in Form veränderter Betriebsart möglich. Unter der Voraussetzung, dass aus dem beprobten Medium eine für die Laboranalyse ausreichende Menge an Sickerwasser gewonnen wird, ist zu überdenken, ob die Saugkerzen zwischen den jeweiligen Probenahmen eine gewisse Zeit lang inaktiv bleiben sollten, damit sich die stark negativen Matrixpotentiale durch nachfließendes Sickerwasser ausgleichen können, um anschließend wieder eine Probenahme zu ermöglichen, bei der in kurzer Zeit genügend Probevolumen erhalten werden kann. Eventuell wäre auch der Betrieb der gesamten Anlage bis zu jenem Zeitpunkt vorstellbar, bei dem in allen Auffangbehältern die für eine Laboranalyse minimal nötige Wassermenge vorhanden ist.



**Abb. 4-1 Querschnitt
Modellkonzept verschaltete,
tiefendiff. Probeanlage**



**Abb. 4-2 Modellkonzept
tiefendiff. Probeanlage mit
Saugplatten**

Weiterhin ist bei der derzeitigen Ausführung der Anlage die Anbindung der Saugkerzen an den Boden, vor allem im Bereich des Befestigungsgestänges, und damit die Funktion selbiger fragwürdig und wahrscheinlich nicht in vollem Umfang gegeben. So besteht die Möglichkeit, die poröse Fläche, mit Hilfe welcher die Probenahme durchgeführt wird, in eine Verschalung (Abb. 4-1) einzubinden, die zudem auch einen geringen Strömungswiderstand im gesättigten Bereich bietet. Mit einer solchen zylinderförmigen Bauweise erübrigte sich möglicherweise eine Wiederverfüllung beziehungsweise stellte zumindest einen geringeren Aufwand dar. Zudem wäre die Anbindung im Bereich des porösen Materials der Saugkerzen beim Einbau einfacher, als bei der recht komplexen Oberfläche der bisherigen Anlage. Ferner ist die Kopplung einer solchen verschalteten Variante mit dem Direct-Push-Verfahren vor allem bezüglich der Stabilität der Saugkerzen zu evaluieren. Auch sind zuvor eventuelle Wechselwirkungen des anstehenden Wassers mit der Außenwand der Verschalung zu überprüfen.

Eine horizontale, statt wie bisher vertikale Ausrichtung der Saugkerzen würde einen weiteren Probenahmebereich innerhalb eines Höhenniveaus ermöglichen (allerdings entstanden dabei erneut Schwierigkeiten beim Einbau und auch die Stabilität des porösen Materials ist bei auftretenden Setzungsprozessen fraglich). Je nach Bodentyp und Ausprägung der Kapillarsaumhöhe ist aber auch eine vertikal dichtere oder weitere Anordnung der Saugkerzen denkbar.

Neben einer Variation der Anordnung der Saugkerzen ist es auch vorstellbar, Saugplatten (Abb. 4-2), ringförmige Saugkörper oder Saugblöcke anstelle von Saugkerzen zu verwenden, welche übereinander angeordnet eine Profilbeprobung ermöglichen. Ferner kann die Anlage mit zusätzlicher Sensorik, wie TDR- oder Temperatursonden, ausgestattet werden, welche selber nur einen geringen Platz benötigen und möglicherweise auch in die Saugkörper integriert werden kann (z.B. Temperatursonden); die Messung der Wassersättigung wäre dann allerdings nur bei inaktiver Anlage möglich. Überdies ist eine Reduktion der zugehörigen Geräte zu überdenken, um die Attraktivität z.B. für Stationen geringeren Umfangs (ohne Kellieranlage) oder mobile Einsätze zu steigern. Außerdem könnte die in [Cherry, et al., 1983] präsentierte Lösung zur Überwindung der maximalen Ansaughöhe

von 9m (vgl. „Positive-displacement Multilevel Point-sampler“, Abschnitt 1.3.1, S.5 ff.) in die bestehende Anlage integriert werden, um auch in größeren Tiefen Messungen durchzuführen. Dazu wird die in der Tiefe gewonnene Probe mit Überdruck auf Geländehöhe gepumpt. Auch wäre eine mit [Ryan, et al., 2000] vergleichbare Anlage eines „Saugkerzenbaum-Zaunes“ (mehrere SKBs in Reihe) zur spezifischen Erforschung des Einschichtverhaltens eines Tracers denkbar.

Neben der derzeitigen Verwendung der Anlage in Wagna zur Überwachung des Eintrags von Düngemitteln, welche auf die darüberliegenden, bewirtschafteten Flächen appliziert werden, und für die Ergründung stoffspezifischer Umsatzprozesse, ist eine Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten des Saugkerzenbaums wünschenswert. Es offenbart sich ein großes Anwendungsfeld in Gebieten, bei denen das beprobte Grundwasser verschiedenen Ursprungs ist. So zum Beispiel, wenn auf Inseln der Umfang vorhandener Süßwasserlinsen kontrolliert werden muss bzw. die Süß-Salzwasser-Grenze zu bestimmen ist; wenn in Folge eines Unfalles Gefahr für die Grundwassernutzung durch die Intrusion eines Schadstoffes in den Boden besteht; wenn eine Beschädigung der Versiegelung von Deponien vermutet wird oder wenn die verschiedenen Abflusskomponenten bei einem Regenereignis zu identifizieren sind, um Rückschlüsse auf die Entstehung von Hochwasserwellen zu ziehen. Weiterhin eignet sich die Anlage dazu, gezielt den Übergangsbereich ungesättigte/gesättigte Zone zu beproben und damit Erkenntnisse zu Umsatzprozessen chemischer und biologischer Art, dem Stofftransport und dem Einschichtverhalten eines Stoffes sowie zum allgemeinen Systemverständnis der SUIR zu gewinnen und stellt damit eine kostengünstige, einfach und zeitnah zu installierende sowie gering zu wartende Alternative zu sonst für diesen Zweck speziell konzipierten Lysimetern oder aufwendig anzulegenden Aufschlüssen dar.

4.3 Ausblick – weiterer Forschungsbedarf mit einer tiefenspezifischen Probevorrichtung unter Beachtung des Stofftransports im Kapillarsaum

Die Planung modifizierter Anlagen auf Basis von Simulationen mit HYDRUS ist ein mögliches Vorgehen für die Gewinnung optimaler Messergebnisse. Insbesondere die Modellierung des Stofftransports, inklusive der Ermittlung der zugehörigen Parametersätze, ist zur Optimierung der Anlagenform und -bauweise anzustreben. So kann die Parametrisierung eines Stofftransportmodells mit Tracerexperimenten und entsprechenden Messungen im Feld einhergehen. Ebenfalls kann die Fragestellung der Einmischung eines Stoffes in den Grundwasserstrom, auch unter Berücksichtigung von Dichteunterschieden, Untersuchungsgegenstand sein.

Des Weiteren ist die Überprüfung der Anwendungsmöglichkeit des Mualem-van-Genuchten-Modells zur Berechnung der Wasserbewegung in der ungesättigten Zone bei sandigen bis kiesigen Bodenformen notwendig. Auch dafür bieten sich Experimente im Labor, vorzugsweise mit monolithischen, ungestörten Bodenkörpern, neben einer zusätzlichen Evaluation der Mualem-van-Genuchten-Theorie unter Verwendung alternativer Bodenwassermodelle, wie zum Beispiel „modified van Genuchten“ nach [Vogel, et al., 1988], „Brooks-Corey“ nach [Brooks, et al., 1964] oder „Dual-Porosity“ nach z.B. [Durner, 1994], an. Das verwendete Bodenmodell sollte dabei, unter Beachtung der vorgestellten Ergebnisse bezüglich des Stofftransportes im Kapillarsaum, allerdings in der Lage sein, die hohe Variabilität der SUIR gut abzubilden.

Schlussendlich ist es ebenfalls nötig, die Eignung eines, wie bei den Laborexperimenten verwendeten, Gerinnes zur Abbildung des zweidimensionalen Stofftransports zu überprüfen.

Simple Modellierung des Stofftransports der Gerinneexperimente (Exp1 und Exp2A) als Ausblick

Ziel dieser Simulationen, bei denen die von HYDRUS gegebenen Standardwerte des Stofftransports verwendet worden, war es nicht, eine vollständig geschlossene Stoffbilanzierung durchzuführen sondern vielmehr, unabhängig von der imaginären Konzentrationseinheit, die Ergebnisse der Simulation mit denen der Experimente prinzipiell zu vergleichen.

Die Modellierung ergab die in Abb. 4-5 dargestellten Durchbruchkurven des Tracers der jeweiligen Saugkerzen. Die simulierten Durchbruchkurven verlaufen in ähnlicher Form, wie jene, welche bei den Experimenten bestimmt worden (vgl. dazu auch Abb. 2-35, S.34). Bei SK1 und SK2 sind bei beiden Experimenten signifikante Unterschiede in der Höhe der Konzentrationsmaxima erkennbar, wobei scheinbar wiederum, bei gleichen Randbedingungen, eine stärkere Einmischung des Stoffes in die gesättigte Zone während des Passieren der Glasperlenschicht erfolgt, was bei der Simulation des Experimentes 2A in einem geringeren Konzentrationsmaximum bei SK1 und einem folglich höherem Maximum bei SK2 resultiert. Ebenso liegt der bei SK2 zu beobachtende Peak vor jenem der SK1 und auch der Durchgang der Kurve erfolgt schneller, da im Niveau der SK2 eine größere Sättigung vorherrscht und größere Fließgeschwindigkeiten auftreten. Die SK3 liefert nur sehr geringe Konzentrationen, welche wohl unterhalb der Detektionsgrenze lägen.

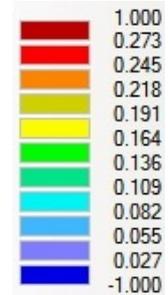


Abb. 4-3 Skala Konzentration [mmol · cm³]

Der Tracerverlauf am rechten Rand des Modells ist in den Abb. 4-5 und Abb. 4-6 dargestellt und gleicht ebenfalls den Beobachtungen der Experimente; die Glasperlen stören sowohl den Verlauf der Geschwindigkeitsvektoren, als auch die Tracerbahn. Auch kommt es im Abstrom der beiden Filterschichten nicht zu einer Einmischung des Tracers in den Grundwasserstrom, sondern zu einem weiteren Transport innerhalb der SUIR bei gleichzeitiger vertikaler Aufweitung der Tracerfront.

Weiterhin finden sich Videos dieser Simulationen im digitalen Anhang (vgl. Abschnitt 5, S. E).

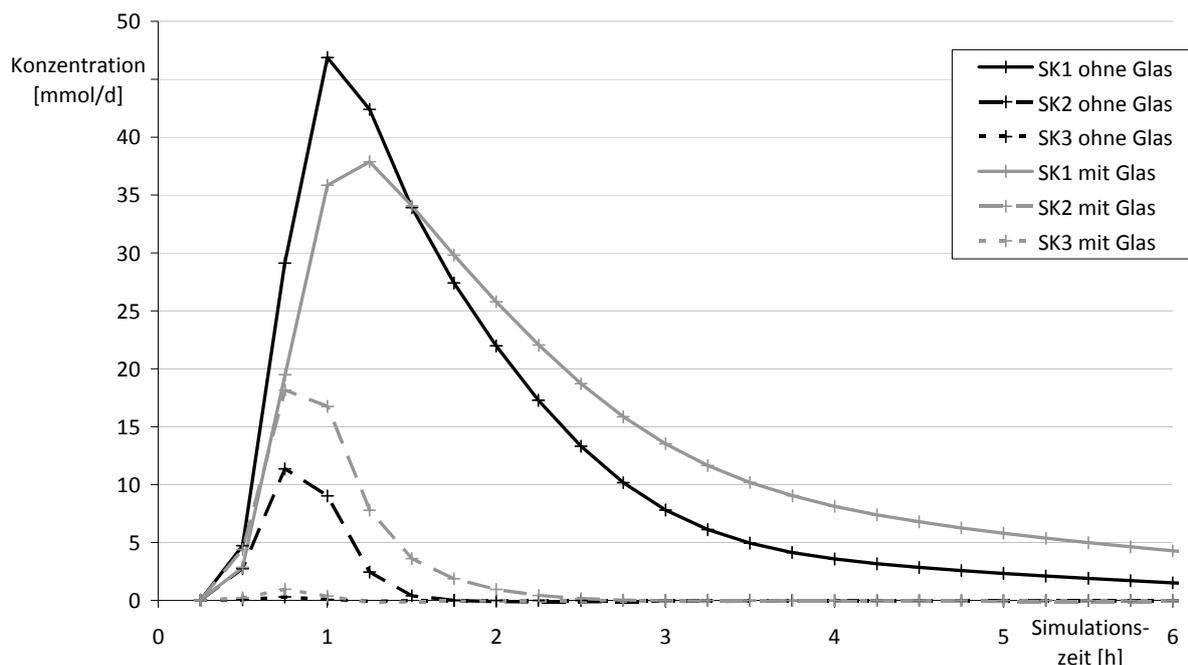


Abb. 4-4 Durchbruchkurven Stofftransportsimulation

Anmerkung zur Simulation des Stofftransports: Negative Konzentrationen entstehen dadurch, dass bei der Simulation zu hohe Werte eines Stabilitätskriteriums, der Peclet-Zahl (Verhältnis von Advektion zu Dispersion, vgl. (4-1) aus [Liedl, 2007]), auftreten. Ist die Gitterweite Δx im Vergleich zur Dispersion D zu klein (Zielwert $\Delta x < 2 \cdot D / |v|$), wird das Modell numerisch instabil. Um dieses zu vermeiden, wäre eine Verfeinerung der Gitterweite von Nöten. Die erzielten Ergebnisse der Simulation sollen hier allerdings als Ausblick genügen und als Hinweis für mögliche, detaillierte Stofftransportuntersuchungen bezüglich der zu realisierenden Gitterweite dienen.

$$Pe = \frac{|v| \cdot \Delta x}{D} \quad (4-1)$$

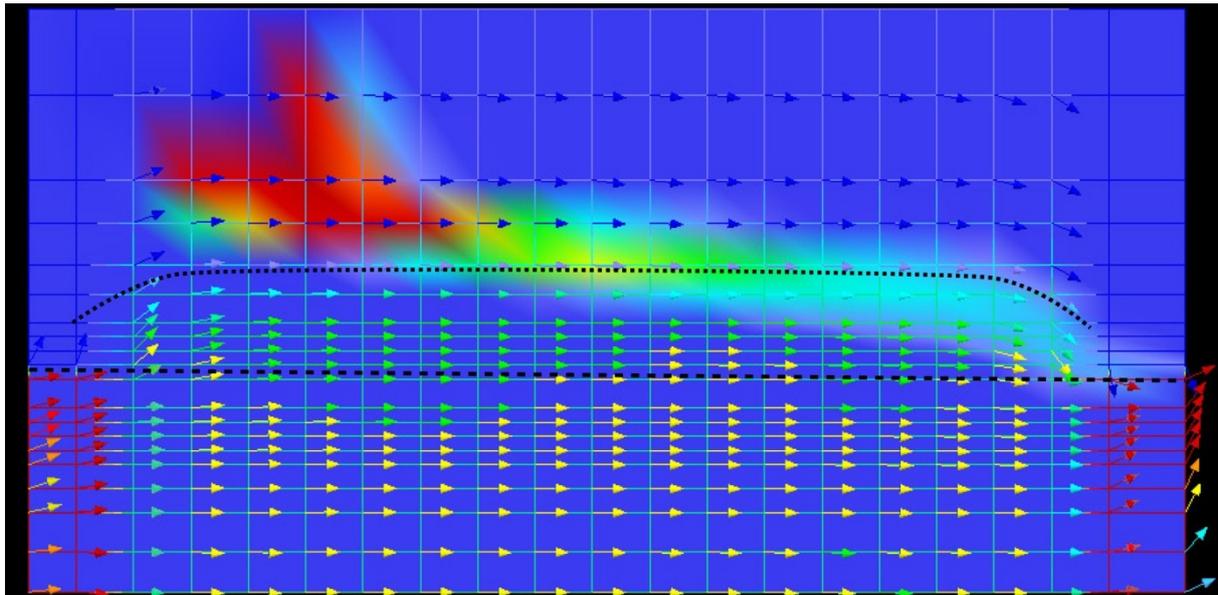


Abb. 4-5 Konzentrationsverlauf (Skala Abb. 4-3) als Zellfüllung, Geschwindigkeitsvektoren (Skala Abb. 3-9) und Sättigung (Skala Abb. 3-8) als Zellbegrenzung für Experiment 1 ohne Glasperlenfilter; rechter Gerinnerand, zwei Stunden nach Tracerinjektion; gepunktete Linie entspricht Kapillarsaum, gestrichene Linie entspricht Grundwasserspiegel

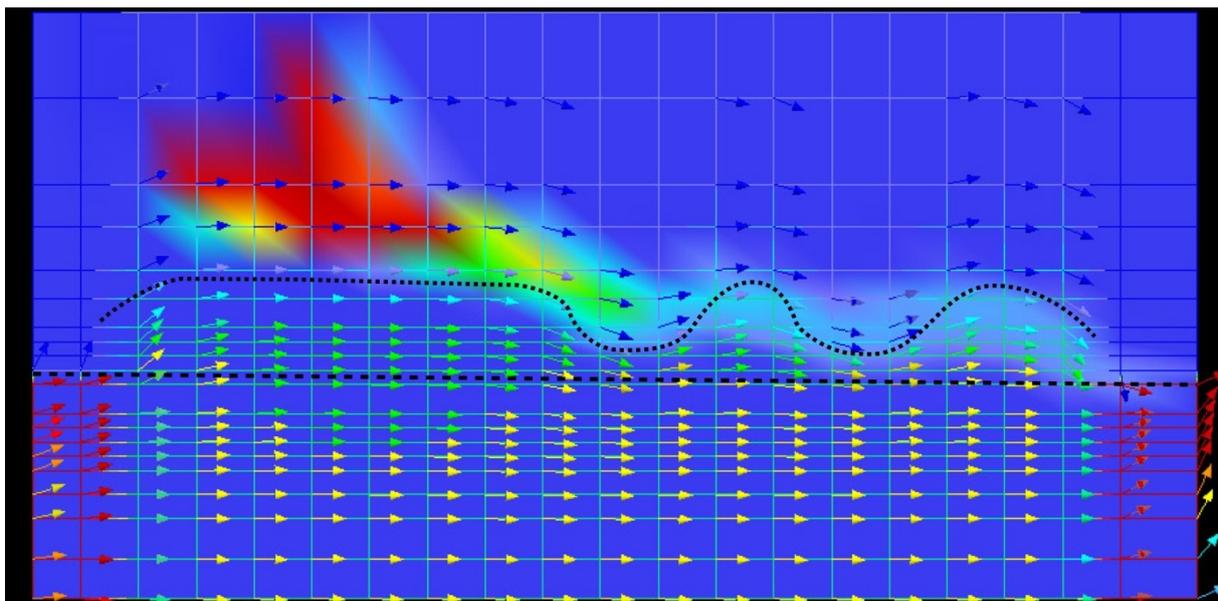


Abb. 4-6 Konzentrationsverlauf (Skala Abb. 4-3) als Zellfüllung, Geschwindigkeitsvektoren (Skala Abb. 3-9) und Sättigung (Skala Abb. 3-8) als Zellbegrenzung für Experiment 2A mit Glasperlenfilter; rechter Gerinnerand, zwei Stunden nach Tracerinjektion; gepunktete Linie entspricht Kapillarsaum, gestrichene Linie entspricht Grundwasserspiegel

5 ANHANG

Literaturverzeichnis

- Abit, Sergio M., et al. 2008.** Solute Transport in the Capillary Fringe and Shallow Groundwater: Field Evaluation. *Vadose Zone Journal*. 2008, 7, S. 890-898.
- Bear, Jacob. 1988.** *Dynamics of fluids in porous media*. Dover: American Elsevier Publishing Company, Inc, 1988. S. 784. ISBN 0486656756, 9780486656755.
- Behera, S., Jha, Madan K. und Kar, S. 2003.** Dynamics of water flow and fertilizer solute leaching in lateritic soils of Kharagpur region, India. *Agricultural Water Management*. 2003, 63, S. 77-98.
- Berkowitz, Brian, Silliman, Stephen E. und Dunn, Andrea M. 2004.** Impact of the Capillary Fringe on Local Flow, Chemical Migration, and Microbiology. *Vadose Zone Journal*. 2004, 3, S. 534-548.
- Böttcher, Norbert. 2007.** *Simulation von Wasserfluss, Wärme- und Stofftransport auf der Lysimeterskala*. Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Institut für Grundwasserwirtschaft, Technische Universität Dresden. Dresden: s.n., 2007. S. 110, Diplomarbeit.
- Brooks, R. H. und Corey, A. T. 1964.** Hydraulic properties of porous media. *Hydrological Paper*. 1964, No. 3.
- . 1966. Properties of porous media affecting fluid flow. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 1966, v. 92, no. IR2, S. 61-88.
- Brouyère, Serge, Dassargues, Alain und Hallet, Vincent. 2004.** Migration of contaminants through the unsaturated zone overlying the Hesbaye chalky aquifer in Belgium: a field investigation. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2004, 72, S. 135-164.
- Cherry, J. A., et al. 1983.** MIGRATION OF CONTAMINANTS IN GROUNDWATER AT A LANDFILL. 2. Groundwater Monitoring Devices. *Journal of Hydrology*. 1983, 63, S. 31-49.
- Dezernat Altlasten und Schadensfälle (Bearbeiter: Zeisberger, Volker; Schmid, Thomas). 2002.** *Untersuchung und Beurteilung des Wirkungspfades Boden - Grundwasser, Sickerwasserprognose. 2., überarbeitete Auflage*. Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie; Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten, 2002. Bd. 3 (Teil 3). ISBN 3-89026-802-1.
- Dunn, A. M. und Silliman, S. E. 2003.** Air and water entrapment in the vicinity of the water table. *Ground Water*. 2003, Vol. 41, No. 6, S. 729-734.
- Dunn, Andrea M, et al. 2005.** Demonstration of microbial transport into the capillary fringe via advection from below the water table. *Journal of Hydrology*. 2005, 306, S. 50-58.
- Durner, W. 1994.** Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*. 1994, Vol. 32, No. 9, S. 211-223.
- Durner, Wolfgang. 2008.** Projektdetails "Verbesserte Vorhersage der Wasserleitfähigkeit in ungesättigten porösen Medien mit einem neuen parametrischen Modell". *Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, Technische Universität Braunschweig*. [Online] 2008. [Zitat vom: 26. August 2008.] <http://www.soil.tu-bs.de/pros/detail.php?lang=de&id=41>.

- Einarson, Murry D. und Cherry, John A. 2002.** A New Multilevel Ground Water Monitoring System Using Multichannel Tubing. *Ground Water Monitoring & Remediation*. 2002, 22, no.4, S. 52-65.
- Fank, Johann. 1999.** Die Bedeutung der ungesättigten Zone für Grundwasserneubildung und Nitratbefruchtung des Grundwassers in quartären Lockersediment-Aquiferen am Beispiel des Leibnitzer Feldes (Steiermark, Österreich). *Beiträge zur Hydrogeologie*. 1999, 49/50, S. 101-388.
- French, Helen K., et al. 2002.** Monitoring snowmelt induced unsaturated flow and transport using electrical resistivity tomography. *Journal of Hydrology*. 2002, 267, S. 273-284.
- Garg, Kaushal K., Jha, Madan K. und Kar, S. 2005.** Field Investigation of Water Movement and Nitrate Transport under Perched Water Table Conditions. *Biosystems Engineering*. 2005, 92, S. 69-84.
- Genuchten, M. Th. van. 1980.** A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1980, 44, S. 892-898.
- Gillham, R. W. 1984.** The Capillary Fringe and its Effects on the Water Table Response. *Journal of Hydrology*. 1984, 67, S. 307-324.
- Graham, Wendy D. 2006.** *An inexpensive device for multiple depth sampling of groundwater quality in cohesionless aquifers*. Agricultural and Biological Engineering Department, Institute of Food and Agricultural Sciences. Gainesville, Florida, USA : University of Florida, 2006. S. 7.
- Griggs, Erin M., Kump, Lee R. und Böhlke, J. K. 2003.** The fate of wastewater-derived nitrate in the subsurface of the Florida Keys: Key Colony Beach, Florida. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2003, 58, S. 517-539.
- Grossman, Ethan L., Cifuentes, Luis A. und Cozzarelli, Isabelle M. 2002.** Anaerobic Methane Oxidation in a Landfill-Leachate Plume. *Environmental Science Technology*. 2002, Vol. 36, No. 11, S. 2436-2442.
- Hazen, A. 1893.** Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration. *24th Annual Report*. 1893, S. 541-556.
- Helm, Björn. 2007.** *Laboruntersuchungen zu Modellsanden*. Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Institut für Grundwasserwirtschaft, Technische Universität Dresden. Dresden : unveröffentlicht, 2007.
- Hinz, Christoph. 1998.** Analysis of unsaturated/saturated water flow near a fluctuating water table. *Journal of Contaminant Hydrology*. 1998, 33, S. 59-80.
- Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Petzenkirchen. 2005.** *Prüfbericht, Bodenproben Wagna*. Bundesamt für Wasserwirtschaft. Petzenkirchen : s.n., 2005. S. 63.
- Jellali, Salah, et al. 2003.** A large-scale experiment on mass transfer of trichloroethylene from the unsaturated zone of a sandy aquifer to its interfaces. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2003, 60, S. 31-53.
- Kengni, L., et al. 1994.** Field measurements of water and nitrogen losses under irrigated maize. *Journal of Hydrology*. 1994, 162, S. 23-46.
- Khazada, A.N., et al. 1998.** Groundwater uptake and sustainability of Acacia and Prosopis plantations in Southern Pakistan. *Agricultural Water Management*. 1998, 36, S. 121-139.

Krajenbrink, G. J. W., et al. 1988. MONITORING OF RECHARGE WATER QUALITY UNDER WOODLAND. *Journal of Hydrology*. 1988, 98, S. 83-102.

Lahvis, M., Baehr, A. und Baker, R. 1999. Quantification of aerobic biodegradation and volatilization rates of gasoline hydrocarbons near the water table under natural attenuation conditions. *Water Resources Research* . 1999, Vol. 35, No. 3, S. 753-765.

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (Arbeitsgruppe). 2003. *Vollzugshilfe zur Gefährdungsabschätzung "Boden-Grundwasser", Hinweise zur Untersuchung und Bewertung von Grundwassergefährdungen durch Altlasten nach Bodenschutzrecht.* [Hrsg.] Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW). 2. Auflage. Essen : Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, 2003. Bd. 17. ISSN 1432-3575.

Lanthaler, Christine. 2005-2008. *European Lysimeter Platform.* [Online] 2005-2008. [Zitat vom: 10. September 2008.] http://www.lysimeter.at/HP_EuLP/index.html.

Laor, Yael, Ronen, Daniel und Graber, Ellen R. 2003. Using a Passive Multilayer Sampler for Measuring Detailed Profiles of Gas-Phase VOCs in the Unsaturated Zone. *Environmental Science & Technology*. 2003, Vol. 37, No. 2, S. 352-360.

Legout, Cédric, et al. 2007. Solute transfer in the unsaturated zone-groundwater continuum of a headwater catchment. *Journal of Hydrology*. 2007, 332, S. 427-441.

Lehmann, Peter, et al. 1998. Effect of hysteresis on water flow in a sand column with a fluctuating capillary fringe. *Journal of Contaminant Hydrology*. 1998, 33, S. 81-100.

Liedl, Rudolf. 2007. *Grundwasserbewirtschaftung.* Fakultät Forst-, Geo-und Hydrowissenschaften, Fachrichtung Wasserwesen, Institut für Grundwasserwirtschaft, Technische Universität Dresden. Dresden : s.n., 2007. Vorlesungsunterlagen.

Lippok, Werner. 1966. Modellversuche über das Verhalten von Heizöl EL in porösen Medien. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*. 1966, Jg. 10, H. 5.

Mao, X., et al. 2006. Tidal influence on behaviour of a coastal aquifer adjacent to a low-relief estuary. *Journal of Hydrology*. 2006, 327, S. 110-127.

Martin, C., et al. 2004. Seasonal and interannual variations of nitrate and chloride in stream waters related to spatial and temporal patterns of groundwater concentrations in agricultural catchments. *Hydrological Processes*. 2004, 18, S. 1237-1254.

Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*. 1976, 12, S. 513-522.

Nielsen, Peter und Perrochet, Pierre. 2000. Watertable dynamics under capillary fringes: experiments and modelling. *Advances in Water Resources*. 2000, 23, S. 503-515.

Ronen, D. und Sorek, S. 2005. *The unsaturated zone - a neglected component of nature.* Water Quality Division, Israel Water Commission. Tel-Aviv : s.n., 2005. S. 16.

Ronen, D., Scher, H. und Blunt, M. 1997. On the Structure and Flow Processes in the Capillary Fringe of Phreatic Aquifers. *Transport in Porous Media*. 1997, 28, S. 159-180.

Ronen, Daniel, Magaritz, Mordeckai und Levy, Itzhak. 1986. A MULTI-LAYER SAMPLER FOR THE STUDY OF DETAILED HYDROCHEMICAL PROFILES IN GROUNDWATER. *Water Resources Research*. 1986, Vol. 20, No. 3, S. 311-315.

Ryan, M. C., et al. 2000. Field and modeling evidence for a "stagnant flow" zone in the upper meter of sandy phreatic aquifers. *Journal of Hydrology*. 2000, 233, S. 223-240.

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. 1998. *Probenahme bei der Technischen Erkundung von Altlasten*. s.l. : Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 1998. Bd. 3.

Silliman, Stephen E., et al. 2002. Fluid Flow and Solute Migration Within the Capillary Fringe. *Ground Water*. 2002, Vol. 40, No. 1, S. 76-84.

Søvik, Anne Kristine, et al. 2002. Transport and Degradation of Toluene and o-Xylene in an Unsaturated Soil with Dipping Sedimentary Layers. *Journal of Environmental Quality*. 2002, 31, S. 1809-1823.

Stejskal, Martin und Zeman, Josef. k. A.. *Large scale physical model on transport within a capillary fringe*. Institute of Geological Sciences, Faculty of Science, Masaryk University, Brno. Brno : unveröffentlicht, k. A.

—. **2003.** *Sub-atmospheric lateral flow above the water table*. Institute of Geological Sciences, Faculty of Science, Masaryk University, Brno. Brno : unveröffentlicht, 2003.

Twardowska, Irena. 1995. Areas of long-lasting anthropopression: assessment and monitoring of pollution potential to soil and ground water. *Proc. SPIE*. 1995, Vol. 2504, S. 253-264.

UMS GmbH München. 2008. *Bedienungsanleitung SK20 Saugkerze*. München : s.n., 2008. S. 36.

Unterausschuss "Sickerwasserprognose" (Arbeitsgruppe) . 2003. *Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen*. Altlastenausschusses (ALA), Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO). Niedersachsen : s.n., 2003. S. 65.

Vogel, T. und Císlarová, M. 1988. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Transport in Porous Media*. 1988, Vol. 3, No. 1, S. 1-15.

Zhao, Bing-Zi, et al. 2007. Groundwater Contamination with NO₃-N in a Wheat-Corn Cropping System in the North China Plain. *Pedosphere*. 2007, 17, S. 721-731.

Struktur digitaler Anhang

Zum Dokument gehört ein digitaler Anhang, dessen Aufbau sich folgendermaßen gestaltet.

Tab. 5-1 Struktur digitaler Anhang

Pfad	Beschreibung
..\DA_MWalther.pdf	Diplomarbeit als pdf-Dokument
..\Codec und Player*	Anwendung (VLC Player) und Codec (Xvid 1.1.3) zum Abspielen der Videos
..\Experimente*	Daten der Experimente
..\Experimente\Versuchsprotokolle*	Versuchsprotokolle für Exp0, Exp1, Exp2A, Exp2B
..\Experimente\Datenaufzeichnung*	Mit PC erfasste Daten der Waagen, des Tensiometers und der Leitfähigkeitssonde aller Experimente
..\Experimente\Videos*	Kameraaufnahmen der Laborexperimente im Zeitraffer
..\Modelle*	Daten der Modelle
..\Modelle\HYDRUS_Daten*	Dateien der HYDRUS-Modelle, Laborexperimente mit Stofftransport (Exp1 und Exp2A) und der Szenarios des Saugkerzenbaums im Feld (T-N, F-N, T-H und F-H)
..\Modelle\Videos*	Videos der Simulationen des Stofftransports der Experimente 1 und 2A

Anmerkung: Für die Wiedergabe der Videodateien wird der Codec „Xvid 1.1.3“ benötigt. Sollten Probleme beim Abspielen mit dem Windows Media Player auftreten, wird zunächst empfohlen, die Anwendung „VLC Player“ und, wenn das Abspielen weiterhin fehlschlägt, im Anschluss den Codec zu installieren.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit geholfen haben.

Herzlichen Dank an Prof. Dr. Rudolf Liedl, der mir die Bearbeitung am Institut für Grundwasserwirtschaft ermöglichte.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Betreuern Univ.-Doz. Dr. Johann Fank (JOANNEUM RESEARCH, Graz) und Dipl.-Ing. Thomas Reimann (IGW, TU Dresden), die mir jederzeit bei Fragen oder Problemen geholfen und mit vielen Denkanstößen einen Großteil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ebenso gilt mein Dank Ing. Gerhard Rock (JOANNEUM RESEARCH, Graz), der mir bei der Modellierung hilfreich zur Seite stand sowie Dipl.-Ing. Norbert Böttcher (IGW, TU Dresden), der mich bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche sehr unterstützt hat.

Vielen Dank an Dipl.-Ing. Georg von Unold (UMS München) für die Bereitstellung der Saugkerzen der Laborexperimente. Auch möchte ich mich bei Dr. Heike Brückner (Labor Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, TU Dresden) und Doreen Degenhardt (Labor IGW, TU Dresden) für die Hilfe und die Betreuung bei der Laboranalytik bedanken.

Danke an die vielen ungenannten, kleinen und großen Helfer, die mit Rat und Tat Ihren Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Besonderer Dank gilt aber meinen Eltern für deren Fürsorge und Unterstützung, wodurch mir dieses Studium möglich war.