
Strukturuntersuchungen zur Charakterisierung der ungesättigten Wasserströmung in porösen Medien

Jens Michael Kuckelkorn



München 2004

meiner wunderbaren Familie

Strukturuntersuchungen zur Charakterisierung der ungesättigten Wasserströmung in porösen Medien

Jens Michael Kuckelkorn

Dissertation
an der Fakultät für Geowissenschaften
der Ludwig-Maximilians-Universität
München

vorgelegt von
Jens Michael Kuckelkorn
aus Köln

München, den 20.9.2004

Erstgutachter: Univ.-Prof. Dr. S. Wohnlich
Zweitgutachter: Univ.-Prof. Dr. H. Miller
Tag der mündlichen Prüfung: 23.3.2005

Ohne ausdrückliche Genehmigung des Autors ist es nicht gestattet, das Werk oder Teile daraus nachzudrucken oder auf fotomechanischem oder elektronischem Wege zu vervielfältigen.

Kurzfassung

Die physikalische Bestimmung der Hydraulik der ungesättigten Zone in Sedimenten und in porösen Baustoffen ist Grundlage der Berechnung und Modellierung von Fluid-, Schadstoff- und Wärmetransport. Dabei spielen die Porengrößenverteilung und die heterogene Struktur des Porenraumes eine entscheidende Rolle als Eingangsgröße.

Durch Desorptions- und Tankversuche konnten Parameter der Hydraulik und ungesättigten Strömung von Sedimentkörpern in zweidimensionalen Visualisierungen dargestellt werden. Der Versuchsaufbau beinhaltete die zweidimensionale Messung des hydraulischen Potentials und die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit während verschiedenen stationären und dynamischen Strömungsprozessen. Bei der Auswertung dieser sowie bei der Anwendung von optischen Verfahren mittels Tomographie und Bildanalyse konnten hier neue Ansätze für eine Bestimmung der Porenraumeigenschaften und deren Heterogenität ermittelt werden:

Bei den hydraulischen Laborversuchen konnte in homogenen Sedimentkörpern eine Variation der Strömungsparameter bestimmt werden. Bei den optischen Verfahren bietet die zerstörungsfreie Methode der Tomographie mit ungestörten Proben ein großes Entwicklungspotential, da gegenüber dem verwendeten Röntgentomographen noch deutliche Verbesserungen bei der optischen Auflösung physikalisch möglich sind. Die Auswertung durch Bildanalyse von eingescannten Anschliffen ist dagegen mit einer Probenaufbereitung verbunden, zeichnet sich aber auch durch eine hochgradige Automatisierung und geringe Kosten aus.

Die Anwendung der verschiedenen Methoden konnte den Zusammenhang von Porenraumstruktur und hydraulischen Eigenschaften darstellen. Durch die optischen Verfahren werden die komplexen strukturellen Eigenschaften schnell und vielseitig verwendbar erfaßt. So konnten unter anderem die Porengrößenverteilung und die Summe der Kornoberflächen ermittelt werden. Daraus konnte ein numerischer Modellansatz für die hydraulischen Eigenschaften und den Feuchtetransport von porösen Medien entwickelt werden.

Abstract

The physical determination of the hydraulics of the vadose zone in sediments and porous building-materials is the basis of the calculation and modelling of fluid, pollutant and heat transport. Here the pore size distribution and the heterogeneous structure of the pore space play a decisive role as an input parameter.

Parameters of the hydraulics and unsaturated flow of sediment bodies were obtained by desorption and tank experiments and represented in two-dimensional visualizations. The experimental setup contained a two-dimensional measurement of the hydraulic potential and the distribution of the electrical conductivity during different stationary and dynamic flow processes. These experiments, along with the application of visual methods by means of tomography and image analysis, allowed for new approaches for the detection of the pore space properties and its heterogeneities:

The hydraulic laboratory experiments identified a variation of the flow parameters in homogeneous sediment bodies. Optical methods demonstrated through the non-destructive process of the tomography a future practical strategy for undisturbed probes since great development potentials of the optical resolution are still physically possible opposite the used x-ray scanner. By contrast, the image analysis of scanned polished sections is connected to a sample treatment, but stands out due to a high degree of automation and low costs.

The application of the different methods could represent the correlation of pore space structure and hydraulic properties. Due to the visual methods the complex structural properties are received quickly and versatilely. So the pore size distribution and the sum of the grain surfaces could be detected among other things. From this, a numeric model approach could be developed for the hydraulic properties and the moisture transport of porous media.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	XI
Verzeichnis der Symbole, Abkürzungen und Einheiten.....	XV
Danksagungen.....	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	1
1.2 Arbeitsprogramm.....	1
1.3 Vorarbeiten.....	2
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1 Feststoffmatrix.....	3
2.1.1 Lagerungsdichte	3
2.1.2 Korngrößenverteilung und Kornform	3
2.2 Porenraum	5
2.2.1 Porosität.....	5
2.2.2 Porengrößenverteilung	6
2.3 Hydraulische Eigenschaften.....	7
2.3.1 Eigenschaften des Wassers.....	7
2.3.2 Wassergehalt	8
2.3.3 Sättigungsgrad.....	8
2.3.4 Kapillarer Aufstieg.....	9
2.3.5 Potentialtheorie.....	10
2.3.6 Potentialgradienten.....	12
2.3.7 pF-Kurve	13
2.3.8 Hydraulische Leitfähigkeit.....	16
2.4 Elektrische Leitfähigkeit	18
3. Methodik der hydraulischen Versuche.....	21
3.1 Sedimentbestimmung	21
3.1.1 Siebung.....	21
3.1.2 Sedimentationsverfahren	21
3.1.3 Porenraum	21
3.2 Versuchsanlagen.....	22
3.2.1 Säulenversuche.....	22
3.2.2 Tankversuche	23
3.3 Meßtechnik.....	26
3.3.1 Meßerfassungsrechner.....	26
3.3.2 Software	27
3.3.3 Berechnungssysteme	29
3.3.4 Abflußmessung.....	29
3.3.5 Saugspannungsmessung	30
3.3.6 Temperaturmessung	32
3.3.7 Elektrische Leitfähigkeit	34
4. Verwendete Materialien	35

4.1 Auswahl der Materialien	35
4.2 Bodenparameter	36
5. Laborversuche zur Sedimenthydraulik	41
5.1 Heterogenität des Porenraums	41
5.2 Hydraulik der ungesättigten Zone	42
5.2.1 Säulenversuche	42
5.2.2 Tankversuche mit homogener Beregnung	45
5.2.3 Tankversuche mit heterogener Beregnung	48
5.3 Strömungsverhalten	51
5.3.1 Homogene Eingabe	51
5.3.2 Heterogene Eingabe	51
6. Optische Verfahren	55
6.1 Probenaufbereitung und Digitalisierung	55
6.1.1 Fixierung	55
6.1.2 Bilderzeugung	57
6.2 Computer-Tomographie	59
6.2.1 Methodik der Computer-Tomographie	59
6.2.2 CT-Aufnahme und Bearbeitung	60
6.3 Bildanalyse	66
6.3.1 Bildaufbereitung	66
6.3.2 Bildanalyse und Parameterberechnung	67
6.3.2.1 Analyse der Flächen	67
6.3.2.2 Analyse der Grenzen	68
6.3.2.3 Porenraumanalyse	69
6.3.2.4 Ergebnisse der Analyse	69
6.4 Vorteile optischer Verfahren	74
7. Zusammenfassung und Ausblick	75
8. Literaturverzeichnis	77
9. Anhang	83
9.1 Verwendete Software	83
9.2 Sedimentanalyse	83
9.3 Versuchsaufbau der hydraulischen Versuche	85
9.3.1 Anlagenkomponenten	85
9.3.2 Kalibrierung	87
9.4 Messungen und Auswertung der Säulenversuche	91
9.5 Messungen und Auswertung der Tankversuche	93
9.5.1 Messungen der Versuchsreihe V3-1	93
9.5.2 Messungen der Versuchsreihe V3-2	95
9.5.3 Messungen der Versuchsreihe V3-3	98
9.5.4 Messungen der Versuchsreihe V3-4	101
9.5.5 Hydraulische Auswertungen der Versuchsreihe V3	103
9.5.6 Verteilungen der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3	105
9.6 Probenaufbereitung und Auswertung der optischen Verfahren	107
9.6.1 Verwendete Chemikalien für die Fixierung des Korngerüstes	107
9.6.2 Digitalisierung der Sedimentstruktur	107
9.6.3 Angaben zum verwendeten Tomographen	109
9.6.4 Angaben zur Bildanalyse und Auswertung	109

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Korngrößen- und Porengrößenklassen	6
Abb. 2: Kapillarer Aufstieg	10
Abb. 3: Hydraulisches Potential	12
Abb. 4: Einteilung und Verhältnis von Äquivalent-Porengrößen zu Potential und Bindungseigenschaften des Wassers	14
Abb. 5: Versuchsaufbau zur Bestimmung der pF-Kurve	22
Abb. 6: Tankversuchsanlage	23
Abb. 7: Schematischer Aufbau der Tankversuchsanlage für Sprühnebelversuche	24
Abb. 8: Verteilung der Meßsonden im Versuchstank	25
Abb. 9: Schematischer Aufbau des Meßrechners	26
Abb. 10: Struktur des Meßprogrammes	28
Abb. 11: Aufbau der Tensiometeranlage	30
Abb. 12: Schema der Tensiometeranlage	31
Abb. 13: Aufbau der Temperaturmessung	33
Abb. 14: Aufbau der LF-Messung	34
Abb. 15: Proben der Versuchsreihe V4	36
Abb. 16: Siebdurchgangskurven der verwendeten Materialien	36
Abb. 17: Bewässerungsfront im Tankversuch	41
Abb. 18: Saugspannungsmessung zur Desorptionskurvenbestimmung von Material B	43
Abb. 19: Desorptionskurve aus Messungen von Material B	43
Abb. 20: Polynomregression der Desorptionskurve von Material B	44
Abb. 21: Meßdaten des Tankversuches der Versuchsreihe V1-1 mit Sediment A	46
Abb. 22: Vergleich der Wassergehalte von Sediment B mit der Desorptionskurve	47
Abb. 23: Saugspannung der punktuellen Beregnung von Sediment B	48
Abb. 24a: Wassergehaltsverteilung von V3-1 bei 40 h	49
Abb. 24b: Wassergehaltsverteilung von V3-1 bei 64 h	49
Abb. 25: Wassergehaltsdifferenz von V3-1 zwischen 40 h und 64 h	50
Abb. 26 a, b: Wassergehalts- und Gradientenverteilung von V3-2 bei 100 h	50
Abb. 27: Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-1	51
Abb. 28: Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-1 in einer horizontalen Fläche	52
Abb. 29: 2D-Ansicht der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-1 in einer horizontalen Fläche bei 120 h	52
Abb. 30: 2D-Ansicht der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-1 in einer horizontalen Fläche bei 140 h	53
Abb. 31: Winkelabhängige Anstiegszeitdifferenz von V3-2	53
Abb. 32: Winkelabhängige Anstiegszeitdifferenz von V3-3	54
Abb. 36: Methodik der optischen Analyse	56

Abb. 37 a, b: Direkte Digitalisierung von Sedimentschliffen mit Flachbettscanner	58
Abb. 38 a, b: Vergleich von direktem Scan und Foto	58
Abb. 39: Die axiale Berechnung (Vertikalschnitt) eines CT-Bildes im „4D-mode“ von Probe B.....	60
Abb. 40: Die gedrehte Berechnung (Vertikalschnitt) eines CT-Bildes im „4D-mode“ von Probe B.....	61
Abb. 41: Darstellung der CT-Rohdaten von Glaskugeln	61
Abb. 42: Axiale Berechnung (Vertikalschnitt) eines CT-Bildes im „4D-mode“ von Probe H	62
Abb. 43: Coronale Berechnung (Horizontalschnitt) eines CT-Bildes im „4D-mode“ von Probe H	62
Abb. 44: Axiale Berechnung (Vertikalschnitt) eines CT-Bildes im „4D-mode“ von Probe G	63
Abb. 45: Drehung des berechneten Quaders aus Abbildung 66 von Probe G.....	63
Abb. 46: Tomographische Auswertung der Porenkanäle von Probe H.....	64
Abb. 47: Tomographische Auswertung der Porenkanäle von Probe G.....	64
Abb. 48: Räumliche Struktur von Probe H.....	65
Abb. 49: Räumliche Struktur von Probe G.....	65
Abb. 50: Bildanalyse-Arbeitsplatz LECO 2003	66
Abb. 51 a, b: Bildanalyse von Flächen.....	67
Abb. 52 a, b: Bildanalyse von Grenzen.....	68
Abb. 53 a, b: Bildanalyse der Porenraumstruktur	68
Abb. 54: Porenraumverteilung	69
Abb. 55: Modell der wirksamen Kräfte im Bodenwasser	70
Abb. 56: Porenraummodell von Material B	71
Abb. 57: Porenraummodell von Material G	71
Abb. 58 a, b: Saugspannungskurve des Modells.....	72
Abb. 59 a, b: Durchlässigkeitsbeiwert des Modells	73
Abb. A1: Kalibrierung des Differenzdruckaufnehmers SETRA 204D	87
Abb. A2: Zusammengesetzte Funktion der Kalibrierung des Differenzdruckaufnehmers SETRA 204D ..	87
Abb. A3: Kalibrierung des Temperaturmeßkanales T1	88
Abb. A4: Kalibrierung des LF-Meßkanales mit der Sonde LF1 zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit	88
Abb. A5: Kalibrierung einer Masterflex-Schlauchpumpe Modell 7521-35 mit Pumpkopf Modell 07013- 20	89
Abb. A6: Kalibrierung der Masterflex-Schlauchpumpe Modell 7521-35 mit Pumpkopf Modell 07015- 20	89
Abb. A7: Kalibrierung der induktiven Durchflussmessung	90
Abb. A8: Messung der Saugspannung und Bestimmung des Wassergehaltes von Material B.....	91
Abb. A9: Messung der Saugspannung und Bestimmung des Wassergehaltes von Material C.....	91
Abb. A10: Messung der Saugspannung und Bestimmung des Wassergehaltes von Material D.....	91
Abb. A11: Messung der Saugspannung und Bestimmung des Wassergehaltes von Material E	92
Abb. A12: Hysterese des volumetrischen Wassergehaltes als Funktion des Matrixpotentials	92
Abb. A13: Gemittelte Beregnungsraten (punktuelle Beregnung) und Temperaturverlauf im Sediment bei	

Versuchreihe V3-1 a.....	93
Abb. A14: Relevante Ausschnitte der Tensiometermessungen bei Versuchreihe V3-1 a.....	93
Abb. A15: Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-1 a.....	93
Abb. A16: Gemittelte Berechnungsraten (flächige Sprühnebelberegnung) und Temperaturverlauf von Sediment- und Raumtemperatur bei Versuchreihe V3-1 b	94
Abb. A17: Abflußmessung bei Versuchreihe V3-1 b	94
Abb. A18: Relevante Ausschnitte der Tensiometermessungen bei Versuchreihe V3-1 b	94
Abb. A19: Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-1 b	95
Abb. A20: Gemittelte Berechnungsraten (flächige Sprühnebelberegnung) und Temperaturverlauf von Sediment- und Raumtemperatur bei Versuchreihe V3-2 a.....	95
Abb. A21: Abflußmessung bei Versuchreihe V3-2 a.....	95
Abb. A22: Relevante Ausschnitte der Tensiometermessungen bei Versuchreihe V3-2 a.....	96
Abb. A23: Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-2 a.....	96
Abb. A24: Geglättete Meßdaten der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-2 a.....	96
Abb. A25: Gemittelte Berechnungsraten (punktuelle Beregnung) und Temperaturverlauf von Sediment- und Raumtemperatur bei Versuchreihe V3-2 b.....	97
Abb. A26: Abflußmessung bei Versuchreihe V3-2 b	97
Abb. A27: Tensiometermessungen bei Versuchreihe V3-2 b	97
Abb. A28: Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-2 b	98
Abb. A29: Geglättete Meßdaten der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-2 b	98
Abb. A30: Gemittelte Berechnungsraten (flächige Sprühnebelberegnung) und Temperaturverlauf von Sediment- und Raumtemperatur bei Versuchreihe V3-3 a.....	98
Abb. A31: Abflußmessung bei Versuchreihe V3-3 a.....	99
Abb. A32: Relevante Ausschnitte der Tensiometermessungen bei Versuchreihe V3-3 a.....	99
Abb. A33: Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-3 a.....	99
Abb. A34: Gemittelte Berechnungsraten (punktuelle Beregnung) und Temperaturverlauf von Sediment- und Raumtemperatur bei Versuchreihe V3-3 b.....	100
Abb. A35: Abflußmessung bei Versuchreihe V3-3 b	100
Abb. A36: Tensiometermessungen bei Versuchreihe V3-3 b	100
Abb. A37: Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-3 b	101
Abb. A38: Gemittelte Berechnungsraten (flächige Sprühnebelberegnung) und Temperaturverlauf von Sediment- und Raumtemperatur bei Versuchreihe V3-4 a.....	101
Abb. A39: Abflußmessung bei Versuchreihe V3-4 a.....	101
Abb. A40: Relevante Ausschnitte der Tensiometermessungen bei Versuchreihe V3-4 a.....	102
Abb. A41: Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-4 a.....	102
Abb. A42: Wassergehaltsberechnung bei Versuchsreihe V3-1 a.....	103
Abb. A43: Wassergehaltsdifferenz und hydraulische Gradienten bei Versuchsreihe V3-1 a nach 40 h ..	103
Abb. A44: Wassergehaltsberechnung bei Versuchsreihe V3-2 b.....	103
Abb. A45: Wassergehaltsdifferenz und hydraulische Gradienten bei Versuchsreihe V3-2 b nach 100 h	104
Abb. A46: Wassergehaltsberechnung bei Versuchsreihe V3-3 a.....	104

Abb. A47: Wassergehaltsdifferenz und hydraulische Gradienten bei Versuchsreihe V3-3 a nach 200 h.	104
Abb. A48: Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-1 a	105
Abb. A49: Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-1 b	105
Abb. A50: Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-2 a	105
Abb. A51: Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-2 b	106
Abb. A52: Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-3 a	106
Abb. A53: Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-3 b	106
Abb. A54: Vollständige Reihe der Digitalisierung mittels Fotos und durch direkte Scans der Proben B, F, G, H und K	108
Abb. A55: Vollständige Reihe der bildanalytischen Auswertung der Proben B, F, G, H und K	110
Abb. A56: Bildanalytische Auswertung der Porenraumdurchmesser bei Material G	111
Abb. A57: Bildanalytische Auswertung der Porenraumdurchmesser bei Material F	111
Abb. A58: Bildanalytische Auswertung der Porenraumdurchmesser bei Material B	111
Abb. A59: Bildanalytische Auswertung der Porenraumdurchmesser bei Material H	112
Abb. A60: Bildanalytische Auswertung der Porenraumdurchmesser bei Material K	112

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Einstufung der Lagerungsdichte nach DIN 1054.....	4
Tab. 2: Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften von reinem Wasser	7
Tab. 3: Übersicht der verwendeten Materialien und Versuchszuordnung	35
Tab. 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung.....	37
Tab. 5: Auswertung der Korngrößenverteilung	37
Tab. 6: Auswertung der Dichteverhältnisse	38
Tab. 7: Berechnung der Durchlässigkeit	39
Tab. 8: Übersicht der Tankversuche.....	42
Tab. 9: Durchführung der Tankversuche	45
Tab. 10: Fixierte Materialproben für bildanalytische Auswertungen.....	55
Tab. 11: Tomographisch gemessene Sedimentproben	60
Tab. 12: Ergebnisse der Bildanalyse	70
Tab. 13: Berechnung der Porenvolumenanteile aus der Korngrößenverteilung	74
Tab. A1: Für Messungen und Auswertungen verwendete Software	83
Tab. A2: Zusammenfassung der Bestimmung der verwendeten Materialien.....	84
Tab. A3: Verwendete Anlagenkomponenten der Versuchsaufbauten.....	85
Tab. A4: Eigenschaften des GTS- Polyesterharzes zur Fixierung der Proben.....	107
Tab. A5: Angaben zum verwendeten Computer-Tomographen	109
Tab. A6: Technische Angaben und Bezeichnungen zum Bildanalysegerät LECO 2003 der Fa. LECO ..	109

Verzeichnis der Symbole, Abkürzungen und Einheiten

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$\varnothing_{\bar{A}}$	[mm]	Äquivalentdurchmesser
α	[°]	Winkel
$\alpha_{F,S}$	[°]	Randwinkel, Benetzungswinkel (Flüssigkeit-Feststoff)
α_z	[°]	Winkel zur Z-Achse
β_w	[m ² /N]	Kompressibilität des Wassers
γ	[N/m ³]	spezifisches Gewicht
γ_w	[N/m ³]	spezifisches Gewicht des Wassers
γ_{w10}	[N/m ³]	spezifisches Gewicht des Wassers für T=10°C
ΔA	[-]	Oberflächenvergrößerung
Δh	[m]	piezometrischer Höhenunterschied
Δl	[m]	horizontale Distanz im Erdschwerefeld
θ	[-]	volumetrischer Wassergehalt
θ_{rel}	[-]	Sättigungsgrad
θ_{res}	[-]	residualer Wassergehalt
θ_{sat}	[-]	Sättigungswassergehalt
κ_{sat}	[μS/cm]	elektrische Leitfähigkeit der gesättigten Zone
κ_T	[S/m]	elektrische Leitfähigkeit
κ_{20}	[S/m]	elektrische Leitfähigkeit für T=20°C
κ_{uns}	[μS/cm]	elektrische Leitfähigkeit der ungesättigten Zone
μ	[Pa·s]	dynamische Viskosität
μ_w	[Pa·s]	dynamische Viskosität des Wassers
μ_{w10}	[Pa·s]	dynamische Viskosität des Wassers für T=10°C
ν_w	[m ² /s]	kinematische Viskosität des Wassers
ν_{w10}	[m ² /s]	kinematische Viskosität des Wassers für T=10°C
ρ_D	[g/cm ³]	Trockendichte
ρ_{Dmax}	[g/cm ³]	Dichte der dichtesten Lagerung
ρ_{Dmin}	[g/cm ³]	Dichte der lockersten Lagerung
ρ_F	[g/cm ³]	Dichte des Bodenwassers
ρ_S	[g/cm ³]	Korndichte
ρ_T	[Ω·m]	spezifischer Widerstand
ρ_w	[g/cm ³]	Dichte des Wassers
$\sigma_{F,S}$	[J/m ²]	Grenzflächenspannung (Flüssigkeit-Feststoff)
$\sigma_{G,S}$	[J/m ²]	Grenzflächenspannung (Gas-Feststoff)
σ_w	[J/m ²]	Oberflächenspannung
φ_B	[°, ', '']	Breitengrad
ψ	[Pa]	Potential
ψ_{Ω}	[Pa]	Auflastpotential
ψ_g	[Pa]	Gaspotential
ψ_H	[Pa]	hydraulisches Potential
ψ_h	[Pa]	piezometrisches Potential
ψ_m	[Pa]	Matrixpotential
$\psi_{m,h}$	[Pa]	Matrixpotential oder piezometrisches Potential
ψ_o	[Pa]	osmotisches Potential
ψ_p	[Pa]	Druckpotential
ψ_z	[Pa]	Gravitationspotential
ω	[-]	gravimetrischer Wassergehalt
a	[-]	Anzahl von Partikeln

A	[m ²]	Fläche
A _E	[m ²]	Querschnittsfläche des elektrischen Leiters
A _P	[cm ²]	Partikel-Querschnittsfläche
D	[-]	Verdichtung
d	[mm]	Korndurchmesser
d ₁₀	[mm]	10%-Wert der KGV-Summenkurve
d ₂₅ , d ₇₅	[mm]	Quartilen der KGV-Summenkurve
d ₅₀	[mm]	Median der KGV-Summenkurve
d ₆₀	[mm]	60%-Wert der KGV-Summenkurve
d _c	[mm]	Kapillardurchmesser
f	[-]	Volumenanteil Feststoff
F _K	[N]	Kohäsionskraft
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
G	[S]	elektrischer Leitwert
GWO		Grundwasseroberfläche
G _Z	[N]	Gravitationskraft
h _C	[cmWS]	kapillare Steighöhe
H _{üNN}	[m]	Höhe über normal Null
I	[-]	hydraulischer Gradient
k	[m ²]	Permeabilität
k _f	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
KGV		Korngrößenverteilung
k _u	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert der ungesättigten Zone
L _a	[g/cm ³]	Lagerungsdichte
l	[m]	Strecke
l _E	[m]	Länge des elektrischen Leiters
m	[g]	Masse
m _C	[g]	Masse der Tonfraktion
m _{C,rel}	[-]	Massenanteil der Tonfraktion
m _F	[g]	Bodenwassermasse
m _S	[g]	Trockenmasse
m _{U,rel}	[-]	Massenanteil der Schlufffraktion
m _w	[g]	Verdampfung der Wassermasse
n	[-]	Porosität
n _{max}	[-]	Porosität der lockersten Lagerung
n _{min}	[-]	Porosität der dichtesten Lagerung
pF	[-]	pF-Wert
PWP		permanenter Welkepunkt
Q	[m ³ /s]	Wasserströmung
q	[m/s]	Wasserflußdichte
R	[Ω]	elektrischer Widerstand
R _∅	[-]	mittlerer Rundungsgrad
r _C	[mm]	Kapillarradius
s	[m]	Weg, Strecke
S _o	[-]	Sortierungskoeffizient
T	[°C]	Temperatur
U	[-]	Ungleichförmigkeitsgrad
U _P	[m]	Partikel-Umfang
V	[m ³]	Volumen
V _B	[cm ³]	Bodenvolumen
V _{Bmax}	[cm ³]	Bodenvolumen der lockersten Lagerung

V_{Bmin}	$[\text{cm}^3]$	Bodenvolumen der dichtesten Lagerung
V_{F}	$[\text{cm}^3]$	Bodenwasservolumen
V_{G}	$[\text{cm}^3]$	Bodenluftvolumen
V_{S}	$[\text{cm}^3]$	Feststoffvolumen
W_{Z}	[J]	gravimetrische Arbeit
x	[m]	Strecke auf der X-Achse
y	[m]	Strecke auf der Y-Achse
z	[m]	Strecke auf der Z-Achse

Danksagungen

Für die vorliegende Arbeit war eine ganze Reihe von Einzelstudien unbedingte Voraussetzung, die ohne eine funktionierende Arbeitsgruppe unmöglich gewesen wäre. Die Anregungen und finanzielle Unterstützung dieses Projektes verdanke ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Stefan Wohnlich, dem ich an dieser Stelle nochmals meinen herzlichsten Dank ausspreche unter anderem auch für den wissenschaftlichen Freiraum.

Zu großem Dank verpflichtet bin ich ebenso dem Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der LMU-München unter Leitung von Prof. Dr. Hubert Miller für meine Anstellung in Zeiten rarer Stellen für Nachwuchswissenschaftler.

Besonders hervorheben möchte ich den persönlichen Einsatz der mir anvertrauten Diplomanden und Gaststudenten, die mich bei der Durchführung von Teilprojekten unterstützt haben:

Dipl.-Geol. Bernhard Böhm im Bereich Mikrobiologie, Dipl.-Geol. Dietmar Jung bei der Bildanalyse, Dipl.-Geol. Martin Edenharter und Dipl.-Geol. Thomas Rosenberg für Strömungsversuche sowie Min. Ing. Pavel Dvoracek, Dipl.-Geophys. Thomas Chabr und Dipl.-Geol. Petr Jakes für Vorstudien.

Weiterhin danke ich unserer Arbeitsgruppe, für die ich hier stellvertretend Dr. Ernst Bauer und Dr. Thomas Bahr erwähnen möchte, die in themenverwandten Bereichen forschten.

Die Bereitstellung des Computertomographen verdanke ich Dr. Ulrike Szeimies am Klinikum Innenstadt der LMU-München, computertechnische Hilfe Dr. Thomas Kuckelkorn am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie der TU-München, die fachliche und technische Unterstützung im Bereich Mikrobiologie Dipl.-Biol. Margarethe Junkermann am Institut für Mikrobiologie der TU-München und die Bereitstellung von Versuchsanlagen Dr. Dietrich Jung und Dipl. Ing. Werner Stadler von der Sektion Physik der LMU-München. Weiterhin danke ich für ihre persönliche Unterstützung: Prof. Dr. Manfred Renger vom Institut für Ökologie und Biologie der TU-Berlin, Dipl.-Phys., Dipl. Inform. Thomas Trefz vom Institut für Informatik der TU-München, Dipl. E.Tech. Jürgen Deuse, Dr. Rüdiger Zischak vom Institut für Hydrogeologie der Uni Karlsruhe, Caspar Morsbach, Markus Beyer, Dr. Tobias Schrag sowie Dipl. Phys. Ralph Flechsig vom Max-Planck-Institut München.

Zuletzt ein herzliches Dankeschön an meine Eltern Dr. Kore und Ilse Kuckelkorn für die Unterstützung meiner Hochschulausbildung.

Jens Michael Kuckelkorn

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung

Die Berechnung und Vorhersage von Wasserbewegungen in der wasserungesättigten Bodenzone und beim Feuchtetransport in Baustoffen stellt sich trotz intensiver Forschung als Problem dar. Einerseits erschwert die Komplexität der nicht vollständig bekannten Eingangsparameter die Erstellung und Anwendung einer Modellierungs-Software, andererseits beschränkt sich die praktikable Meßbarkeit nur auf wenige schlichte Eingangsgrößen, die allenfalls ein grobes numerisches Modell ausreichend versorgen können. Erschwerend kommt hinzu, daß Böden und die darin befindliche Wasserbewegung eine schwer zu bestimmende räumliche Heterogenität aufweisen. Weiterhin unterliegt die Übertragbarkeit von Laborversuchen auf eine Geländesituation einer Korrektur von zahlreichen system- und milieubedingten (teils nicht beachteten) Variablen. Daher war es Ziel dieser Dissertation diese Ausgangssituation in verschiedenen Bereichen zu verbessern:

- Die Meßbarkeit von heterogenen Wasserbewegungen im wasserungesättigten Sedimentkörper
- Die Berücksichtigung von möglichen Störeinflüssen
- Die Bewertung und Gewichtung der meßbaren Boden- und Strömungsparameter
- Eine Neukonzeption der Eingangsgrößen für die Berechnung der hydraulischen Eigenschaften und der Wasserbewegung
- Methoden für die Erfassung neuer Eingangsgrößen

Die Verbesserungspotentiale lagen vor allem in der Mehrdimensionalität der Bestimmungsmethoden sowie in der Bestimmung und rechnerischen Weiterverarbeitung der dreidimensionalen Porenraumstruktur anstelle von Ersatzparametern, die z. B. über Korngrößenverteilungen ermittelt werden.

1.2 Arbeitsprogramm

Für die Durchführung wurde der umfangreiche Themenblock in zwei Bereiche unterteilt und im Umfang limitiert. Einzelne Teilaufgaben sollten im Rahmen von Diplomarbeiten abgearbeitet werden. Der erste Bereich umfaßt die Messung von hydraulischen Zuständen und dem Wassermassentransport in wasserungesättigten Sedimentkörpern durch Laborversuche mit folgenden Schwerpunkten:

- Die Erstellung und Optimierung einer Meßtechnik sowie von hydraulischen Versuchsaufbauten (Tank- und Säulenversuche) für durchströmte Sedimentkörper
- Die Ermittlung und Gewichtung von Sediment-, Hydraulik- und Strömungsparametern
- Die Detektion von heterogenen Fließeigenschaften in verschiedenen Sedimenten und deren Vergleich
- Die Untersuchung und Beseitigung der besonderen Fehlerquellen im Labor

Der zweite Bereich beinhaltet die Berechnung von hydraulischen Zuständen durch Vermessung der Porenraumstruktur. Ihm zugeordnet wurden:

- Untersuchungen von Korngerüst und Porenraum
- Die Einrichtung und Optimierung neuer Bestimmungsmethoden, vor allem unter Anwendung optischer und tomographischer Methoden
- Die Erfassung der heterogenen Sediment- und Porenraumstruktur
- Die Neukonzeption der Eingangsparameter für Strömungsberechnungen
- Die Messung und Berechnung von Eingangsparametern aus Strukturanalysen
- Ein Modell zur Berechnung der hydraulischen Eigenschaften

Um einen Untersuchungsrahmen festzulegen wurden folgende Einschränkungen festgelegt:

- Alle Versuche sollten im Labor und ohne großen finanziellen Aufwand durchführbar sein.
- Alle Methoden sollten an mehreren Beispielsedimenten durchgeführt werden.
- Besondere Eigenschaften von Bodenluft und Bodenwasser gegenüber den Labormilieus sollten - wenn zulässig - vernachlässigt werden.

1.3 Vorarbeiten

Die Konzeption einer Tankversuchsanlage wurde mit T. BAHR (1997) und W. WENINGER (1995) erstellt.

Im Rahmen von Studienaufenthalten wurde die Anwendung von Mikrotensiomern von P. DVORAČEK (1995) sowie die Optimierung der Leitfähigkeitsmessung von T. CHABR (1996) untersucht.

In engem Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit stehen die Diplomarbeiten von M. EDENHARTER (1997), der Leitfähigkeitsmessungen durchführte, von T. ROSENBERG (1998) mit Saugspannungsmessungen und von B. BÖHM (1997) mit hydraulischen Messungen bei mikrobiologischer Kontamination. Weiterhin wurde eine Automation der Bildanalyse von Sedimentproben sowie die Optimierung der Probenaufbereitung von D. JUNG (1997) untersucht.

Von E. BAUER (2001) wurden parallel im Rahmen einer Dissertation Kapillarsperrenversuche mit teilweise gleichen Sedimenten durchgeführt.

Das Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart (IWS) betreibt die Versuchseinrichtung VEGAS, die Versuche zu Strömung und Transport in porösen Medien auch in sehr großen Versuchsanordnungen durchführt. Dabei wurden Lösungstransporte mehrdimensional gemessen und ausgewertet.

Zu den Benetzungseigenschaften und Bindungskräften an Kornoberflächen konnte auf BUSCH et al. (1993), KEMPER & ROLLINS (in HARTGE & HORN, 1996) und KUNTZE (1994) zurückgegriffen werden, zur mathematischen Beschreibung von Saugspannungskurven auf die Näherungen von VAN GENUCHTEN (1980) und MUALEM et al. (1991). Eine Näherung zur elektrischen Leitfähigkeit in Abhängigkeit des volumetrischen Wassergehaltes wurde von MUALEM & FRIEDMANN (1991) ermittelt.

Weiterhin gibt es zur Hydraulik der ungesättigten Bodenzone zahlreiche Publikationen aus dem Fachgebiet Bodenkunde, stellvertretend seien hier die Lehrbücher von SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2002), HARTGE, K. H. & HORN, R. (1996) sowie KUNTZE, H., ROESCHMANN, G. & SCHWERDTFEGER, G. (1994) genannt. Ebenso aus dem Fachgebiet Hydrogeologie die Werke von LANGGUTH, H. R. & VOIGT, R. (2004), DIRKSEN, C. (1991) sowie BUSCH, K. F., LUCKNER, L. & TIEMER, K. (1993).

Prof. Dr. M. RENGER (1971) vom Institut für Ökologie der TU-Berlin hat sich schon früher mit der empirischen Ermittlung der Porengrößenverteilung aus der Körnung befasst.

Zur Erfassung von Porenraumstrukturen für die vorliegende Arbeit wurden in Zusammenarbeit mit Dr. med. U. Szeimies am Klinikum Innenstadt der LMU München röntgentomographische Aufnahmen prozessiert.

Im Bereich Tomographie von ungestörten Materialproben konnten gute Ergebnisse am Tomographic Imaging and Porous Media Laboratory in Calgary bei dynamischen Messungen des Lösungstransportes mit einer SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) erzielt werden (J. PERRET et al., 2000). Am Lehrstuhl für Hydrogeologie, Hydrochemie und Umweltanalytik der TU München konnten ebenfalls Fließwege des Stofftransportes mittels der Kernspintomographie ermittelt werden (T. BAUMANN et al., 2000a,b,c).

2. Theoretische Grundlagen

Ein Boden oder Sediment setzt sich aus einer Feststoffmatrix sowie dem mit Bodenwasser und Bodenluft gefüllten Porenraum zusammen. Zur Klassifikation werden daher die volumetrischen Anteile oder die Massenanteile dieser Komponenten und ihre chemische Zusammensetzung bestimmt. Die folgenden Grundlagen behandeln die für den Wassertransport relevanten physikalischen Eigenschaften von Lockergesteinssedimenten und Böden, sie gelten aber auch für Festgesteine, wenn diese einen kontinuierlich verbundenen Porenraum besitzen.

2.1 Feststoffmatrix

2.1.1 Lagerungsdichte

Das Feststoffvolumen V_S und sein Volumenanteil f wird aus der Trockenmasse m_S des Bodenvolumens V_B und der durchschnittlichen Feststoffdichte ρ_S ermittelt:

$$(1) \quad V_S = \frac{m_S}{\rho_S} \quad [\text{cm}^3]$$

$$(2) \quad f = \frac{m_S}{\rho_S \cdot V_B} \quad [-]$$

Ist die Feststoffdichte nicht bekannt, kann nur die Trockendichte ρ_D des Bodens bestimmt werden:

$$(3) \quad \rho_D = \frac{m_S}{V_B} \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

Wird bei nichtbindigen Böden nach DIN 18126 die lockerste ($\rho_{D\min}$) und dichteste ($\rho_{D\max}$) Lagerung gemessen, kann daraus die Verdichtung D normiert werden:

$$(4) \quad D = \frac{\rho_D - \rho_{D\max}}{\rho_{D\min} - \rho_{D\max}} \quad [-]$$

Sowohl Trockendichte als auch Verdichtung werden als Lagerungsdichte bezeichnet. Sie kann ohne Kenntnis der Korndichte ρ_S bestimmt werden.

2.1.2 Korngrößenverteilung und Kornform

Eine der wichtigsten Kenngrößen der Feststoffmatrix ist ihre Korngrößenverteilung, da aus ihr viele Bodenparameter berechnet werden können. Nach DIN 4022-1 werden die logarithmisch skalierten Korndurchmesser d gegen die Massenanteile der Fraktionen (in %) in Form von Summenkurven und Häufigkeitsverteilungen aufgetragen.

Aus der Summenkurve lassen sich der Median (d_{50}), die Quartilen (d_{25} , d_{75}) sowie weitere Kenngrößen bestimmen.

Ein häufig verwendeter Parameter ist die Ungleichförmigkeit U :

$$(5) \quad U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad [-]$$

Nach DIN 1054 wird ein Sediment mit $U < 5$ als gleichförmig, mit $5 < U < 15$ als ungleichförmig und $U > 15$ als sehr ungleichförmig eingestuft. Die Beurteilung der Lagerungsdichte (Verdichtung) wird folgendermaßen klassifiziert:

Tab. 1: Einstufung der Lagerungsdichte nach DIN 1054.

Lagerungsdichte bei $U < 5$	Lagerungsdichte bei $U > 5$	Einstufung
$D < 0.15$	$D < 0.15$	sehr locker
$0.15 < D < 0.30$	$0.15 < D < 0.45$	locker
$0.30 < D < 0.50$	$0.45 < D < 0.65$	mitteldicht
$0.50 < D$	$0.65 < D$	dicht

Die Variation bzw. Heterogenität von Lagerungsdichte und Korngrößenverteilung beeinflusst die Vorhersagegenauigkeit der Bodeneigenschaften.

Die Kornform und ihre Variabilität stellen eine meßbare Einflußgröße für die Grenzflächeneigenschaften der Feststoffmatrix dar. Bei vielen Bestimmungsmethoden wird jedoch die Kornform nicht berücksichtigt und der Äquivalentdurchmesser einer gedachten Kugelform verwendet. Als Kornform-Parameter für gleichförmige Sedimente eignet sich der mittlere Rundungsgrad R_{\varnothing} :

$$(6) \quad R_{\varnothing} = \frac{\sum_{i=1}^a \frac{4 \cdot \pi \cdot A_{P_i}}{U_{P_i}^2}}{a} \quad [-]$$

Dieser Ersatzparameter errechnet sich aus dem arithmetischen Mittel der zweidimensionalen Bestimmung einer Anzahl a von Partikeln, bei denen in einer Schnittebene die Querschnittsfläche A_P und der Umfang U_P bestimmt werden. Für die Kugelform ergibt die Gleichung $R_{\varnothing} = 1$, für alle anderen Geometrien kleinere Werte. Ist es nicht möglich eine statistische Verteilung von Schnittebenen zu verwenden, kann die Ebene der größten Radiendifferenz herangezogen werden.

Für ungleichförmige Sedimente sollte mindestens der Rundungsgrad jeder Korngrößenklasse bestimmt werden, da die einzelnen Kornklassen jeweils einem unterschiedlichen Transportmechanismus unterliegen. So erfahren Kiese in Abhängigkeit der Länge des Transportweges aufgrund ihrer hohen Partikelmasse hohe Abrundungsgrade, während als Schwebfracht transportierte Tone besonders plattige Formen besitzen.

2.2 Porenraum

2.2.1 Porosität

Für die hydraulischen Vorgänge sind weniger die Feststoffeigenschaften als Volumen und Struktur des Porenraumes entscheidend.

Mit Porosität (n) bezeichnet man den volumetrischen Anteil von Bodenwasser (V_F) und Bodenluft (V_G) am Gesamtvolumen (V_B) des Bodens:

$$(7) \quad n = \frac{V_F + V_G}{V_B} \quad [-]$$

Sie kann auch indirekt aus dem Feststoffvolumen V_S (1) oder seinem Volumenanteil f (2) bestimmt werden, da der Porenraum das Negativabbild der Feststoffmatrix darstellt:

$$(8) \quad n = 1 - f \quad [-]$$

$$(9) \quad n = 1 - \frac{V_S}{V_B} \quad [-]$$

Nach Gleichung (3) zeigt sich, daß eine zeitliche Veränderung der Lagerungsdichte als einzige Variable verbleibt, wenn eine konstante Feststoffmasse mit unveränderlicher Ausdehnung angenommen wird:

$$(10) \quad n = 1 - \frac{\rho_D}{\rho_S} \quad [-]$$

Nach DIN 18126 wird die Porosität der lockersten und dichtesten Lagerung bestimmt:

$$(11) \quad n_{\max} = 1 - \frac{m_S}{\rho_S \cdot V_{B\max}} \quad [-]$$

$$(12) \quad n_{\min} = 1 - \frac{m_S}{\rho_S \cdot V_{B\min}} \quad [-]$$

Hierzu ist jedoch die Kenntnis der Korndichte erforderlich. Nach DIN 19683-13 kann dann die Lagerungsdichte (bzw. Verdichtung) aus Porositätsbestimmungen berechnet werden:

$$(13) \quad D(n) = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}} \quad [-]$$

2.2.2 Porengrößenverteilung

Analog zur Korngrößenverteilung und ihrer Einteilung in Korngrößenklassen ist es möglich auch den Porenraum in Porenklassen zu unterteilen. Nur selten besitzen Gesteine (wie etwa gashaltige vulkanische Gläser) die mathematisch leichter greifbare Eigenschaft abgeschlossene Einzelporen auszubilden. Im Sediment besteht der Porenraum aus kontinuierlich zusammenhängenden Hohlräumen mit unterschiedlichen Querschnittsflächen. Als Näherung wird einzelnen Hohlraumvolumina oder Durchtrittsflächen ein Äquivalentdurchmesser $\varnothing_{\text{Ä}}$ zugeordnet (siehe Abb.1).

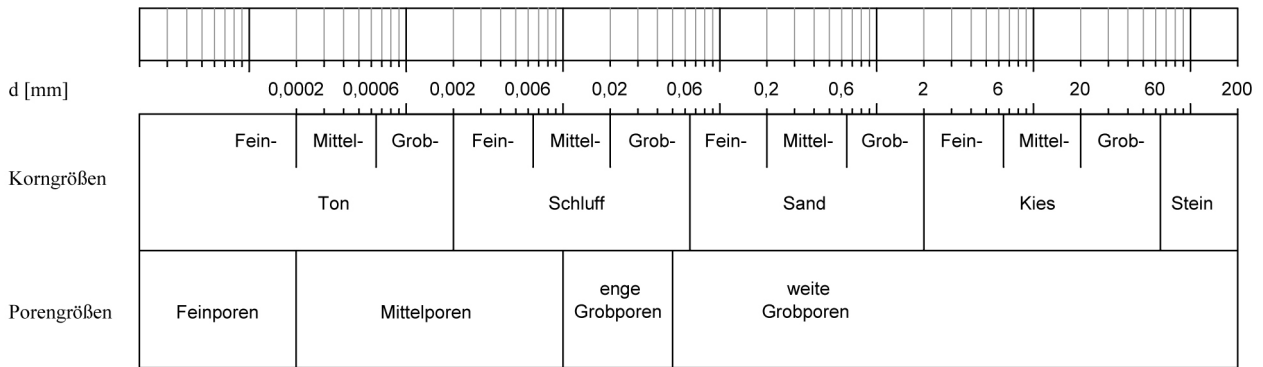


Abb. 1: Korngrößen- und Porengrößenklassen. Korngrößenklassen nach DIN 4022-1, Porengrößenklassen aus SCHEFFER et al. (2002).

Die Summenkurve der Porenklassen ergibt eine Porengrößenverteilung analog zur Korngrößensummenkurve.

2.3 Hydraulische Eigenschaften

2.3.1 Eigenschaften des Wassers

Vergleiche zwischen Laborversuchen und zu Geländemessungen können nur dann genau werden, wenn die häufig in den Berechnungsverfahren reduzierten Größen überprüft beziehungsweise eingerechnet werden.

Eine wichtige Eigenschaft von Wasser ist die Temperaturabhängigkeit ihrer dynamischen Viskosität (μ_w). So steigt diese von $T = 20^\circ\text{C}$ zu $T = 10^\circ\text{C}$ schon um 30% (etwa $-3 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s K}^{-1}$) an. Nachdem sich die kinematische Viskosität (ν_w) aus

$$(14) \quad \nu_w = \frac{\mu_w}{\rho_w} \quad \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

berechnet, geht hier noch eine geringe Veränderung der Dichte (ρ_w) ein, die jedoch im Bodenwasser auch von der Lösungsfracht abhängt.

Die Dichte geht ebenso in das spezifische Gewicht (γ_w)

$$(15) \quad \gamma_w = \rho_w \cdot g \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right]$$

ein, wobei die Erdbeschleunigung (g) nicht konstant und vor allem vom Breitengrad (φ_B) abhängig ist (Näherung aus SCHÜLKE, 2001, $H_{üNN}$ in m):

$$(16) \quad g = 9.80665 - 0.026 \cdot \cos(2\varphi_B) - 3 \cdot 10^{-6} H_{üNN} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

Als gute Näherung für Deutschland gilt $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

Tab. 1: Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften von reinem Wasser (nach KUHLING, 2004, LANGUTH & VOIGT, 2004).

Temperatur T ($^\circ\text{C}$)	Dichte ρ_w (10^3 kg/m^3)	Dyn. Viskosität μ_w ($10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)	Kin. Viskosität ν_w ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)	Kompressibilität β_w ($10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$)	Oberfl.-Spannung σ_w (10^{-2} J/m^2)
0	0.999840	1.7938	1.7941	5.098	7.56
5	0.999964	1.5888	1.5890	4.925	7.49
10	0.999700	1.3097	1.3101	4.789	7.422
20	0.998206	1.0087	1.0105	4.591	7.275
30	0.995650	0.8004	0.8039	4.475	7.118
50	0.98804	0.5492	0.5558	4.417	6.791

2.3.2 Wassergehalt

Der Wassergehalt ω einer Bodenprobe wird am einfachsten über dessen Massenanteil bestimmt:

$$(17) \quad \omega = \frac{m_F}{m_S} \quad [-]$$

Für Berechnungen ist jedoch der volumetrische Bodenwassergehalt θ relevant:

$$(18) \quad \theta = \frac{V_F}{V_B} \quad [-]$$

Die Umrechnung kann (näherungsweise, bei Verdampfung der Wassermasse m_w , enthält die Trockendichte ρ_D auch die Lösungsfracht des Bodenwassers, $m_w \neq m_F$, $\rho_w \neq \rho_F$) über Trockendichte des Bodens

$$(19) \quad \theta = \omega \cdot \frac{\rho_D}{\rho_F} \quad [-]$$

oder über Korndichte und Feststoff-Volumenanteil f erfolgen:

$$(20) \quad \theta = \omega \cdot f \cdot \frac{\rho_S}{\rho_F} \quad [-]$$

2.3.3 Sättigungsgrad

Als Sättigungsgrad θ_{rel} bezeichnet man den relativen volumetrischen Wassergehalt zum Porenvolumen:

$$(21) \quad \theta_{rel} = \frac{\theta}{n} \quad [-]$$

Bei einer vollständigen Sättigung eines Bodenvolumens spricht man von der gesättigten Bodenzone. Ist ein hydrostatischer Druck vorhanden handelt es sich um Grundwasser, andernfalls um Kapillarwasser. Diese Zone wird auch als geschlossener Kapillarraum bezeichnet.

Im Gegensatz dazu wird der oberhalb befindliche Bereich, der nicht vollständig mit Wasser gefüllt ist, nach DIN 4049-3 als ungesättigte Bodenzone bezeichnet. Der Anteil, der Kapillarkräften unterliegt, wird offener Kapillarraum genannt.

2.3.4 Kapillarer Aufstieg

Außer der Gravitation wirken weitere Kräfte auf das Bodenwasser: Wasser besitzt nach Tabelle 2 an der Grenzfläche zu Gasen eine temperaturabhängige Oberflächenspannung σ_w (Aqua dest.), die aus der Kohäsion der Wassermoleküle untereinander resultiert. Sie ist definiert als erforderliche Arbeit ($F_K \cdot s$) pro Oberflächenvergrößerung ΔA .

$$(22) \quad \bar{\sigma}_w = \frac{\Delta(\bar{F}_K \cdot s)}{\Delta A} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right]$$

Diese Kräfte F_K setzen tangential an der Wasseroberfläche an und verkleinern diese zu einer Minimalfläche. Luftblasen und Wassertropfen streben daher immer eine Kugelform an, solange nicht weitere Kräfte zu anders geformten Minimalflächen führen.

Die diesbezüglich wichtigste Kraft im Sedimentkörper ist die Grenzflächenspannung $\sigma_{F,S}$ zwischen Wasser und Feststoff. Im dreiphasigen System kommt noch die Grenzflächenspannung $\sigma_{G,S}$ zwischen Feststoff und Bodenluft hinzu (siehe Abb. 2). An der Kornoberfläche wird folgender Gleichgewichtszustand angestrebt (nach HARTGE & HORN 1996):

$$(23) \quad \left| \bar{\sigma}_{F,S} \right| - \left| \bar{\sigma}_{G,S} \right| + \left| \bar{\sigma}_w \right| \cdot \cos \alpha_{F,S} = 0 \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2} \right]$$

Dies geschieht durch Minimierung der Grenzfläche mit der höchsten Spannung: der Feststoff-Bodenluft-Grenzfläche. Das System Luft/Wasser/Quarz hat gute Benetzungseigenschaften und einen geringen Randwinkel (Benetzungswinkel) $\alpha_{F,S} \approx 0^\circ$ (HARTGE & HORN 1996).

Daraus nähert sich beim kapillaren Aufstieg in einem Glasröhrchen mit dem Radius r_C aus dem Gleichgewicht

$$(24) \quad \sigma_w \cdot 2\pi r_C \cdot \cos \alpha_{F,S} = h_C \cdot \pi r_C^2 \cdot \gamma_w \quad [\text{N}]$$

die kapillare Steighöhe h_C , die somit hauptsächlich von Porenkanalradien abhängt:

$$(25) \quad h_C = \frac{2\sigma_w}{\gamma_w \cdot r_C} ; \quad \cos \alpha_{F,S} = 1 \quad [\text{cm}]$$

Bei $T = 20^\circ \text{C}$ für Laborbedingungen gilt hinsichtlich des Kapillardurchmessers d_C :

$$(26) \quad h_C = \frac{0.2972}{d_C} ; \quad \cos \alpha = 1, T = 20^\circ \text{C} \quad [\text{cm}]$$

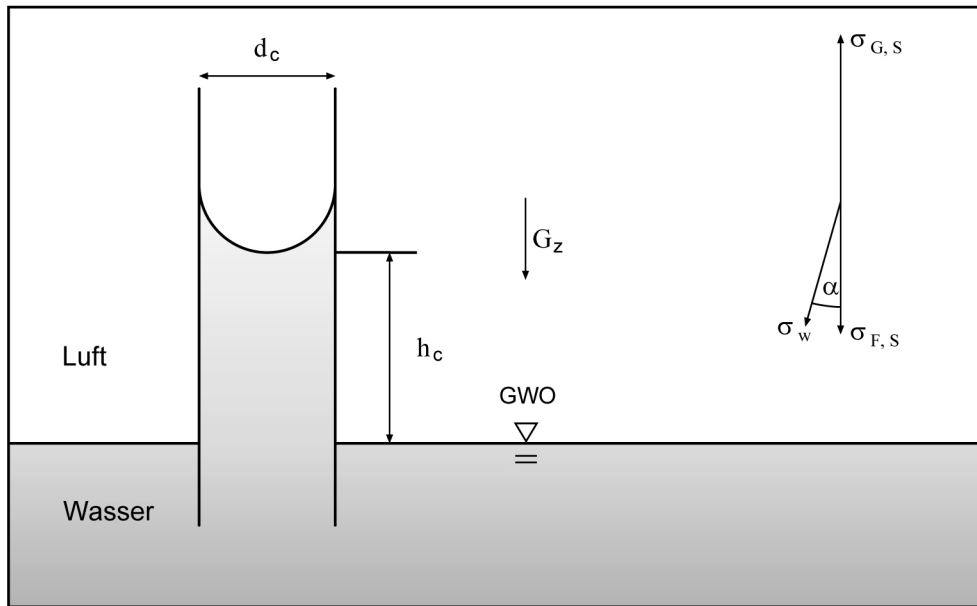


Abb. 2: Kapillarer Aufstieg. Nach Gleichung (26) verhalten sich Kapillardurchmesser d_c und Kapillarhöhe h_c umgekehrt proportional zueinander.

2.3.5 Potentialtheorie

Die Potentialtheorie beschreibt in Abhängigkeit des Ortes alle Kräfte, die auf das Bodenwasser wirken, genauer, das energetische Potential. Vernachlässigbar sind hier jedoch unter anderem die kinetische Energie (durch Bewegung und Temperatur) sowie elektrokinetische Kräfte (durch Bewegung der Ionen), da beide einen sehr geringen Einfluß haben.

Liegt in einem Kraftfeld wie der Gravitation $G_z = m \cdot g$ eine konservative Kraft an, so ist in einem kartesischen Koordinatensystem die verrichtete Arbeit W_z bzw. Energie einer auf der endlichen Strecke l bewegten Masse m :

$$(27) \quad W_z(l) = -m \cdot g(z) \cdot \cos \alpha_z \cdot l \quad [\text{J}]$$

Die Energie ist die Stammfunktion der Kraft G_z , α_z beschreibt hier den Winkel der Bewegung zur z-Achse. Wird die Masse gegen das Kraftfeld bewegt, so wird das Vorzeichen positiv. Wird zur Reduktion als Bezugsgröße m eingeführt, spricht man von potentieller Energie oder Potential ψ . Als Bezugsgröße können jedoch auch das Volumen ($V = l^3$)

$$(28) \quad \frac{W_z}{V} = \frac{m \cdot g}{l^2} \quad [\text{hPa}]$$

oder das Gewicht

$$(29) \quad \frac{W_z}{G_z} = l \quad [\text{cm}]$$

eingesetzt werden. Für Druckpotentiale gilt nach Gleichung (16) näherungsweise die Umrechnung 1 cmWS (4 °C) = 0.981 hPa.

Überlagern sich mehrere Potentialfelder, so werden sie addiert:

$$(30) \quad \psi(x,y,z) = \sum_{n=1}^n \psi_n(x,y,z) \quad [\text{hPa}]$$

Das Gesamtpotential ψ des Bodens wird generell durch die Summe der Druckpotentiale ψ_p , das Gravitationspotential ψ_z und das osmotische Potential ψ_o beschrieben (MULLINS 2000):

$$(31) \quad \psi = \psi_p + \psi_z + \psi_o \quad [\text{hPa}]$$

Das Gravitationspotential ψ_z beschreibt die Lage im Erdschwerefeld, das osmotische Potential ψ_o den osmotischen Druck zwischen verschiedenen Lösungskonzentrationen im Bodenwasser.

Das Druckpotential ψ_p wird weiterhin unterteilt in das Matrixpotential ψ_m , das piezometrische Potential ψ_h , das Gaspotential ψ_g und das Auflastpotential ψ_Ω :

$$(32) \quad \psi = \psi_m + \psi_h + \psi_g + \psi_\Omega + \psi_z + \psi_o \quad [\text{hPa}]$$

Während das piezometrische Potential dem durch das Eigengewicht des Grundwassers bzw. Stauwassers verursachten Wasserdruck entspricht, definiert sich das Auflastpotential als ein über die Feststoffmatrix auf das Grundwasser aufgebracht Gesteinsdruck. Ebenso wirkt das Gaspotential der Bodenluft auf Wasseroberflächen, in der Regel handelt es sich jedoch um die Auflast der Atmosphäre. Versuchsbedingt kann jedoch z.B. ein lokaler Gasüberdruck erzeugt werden.

Das Matrixpotential beschreibt die Arbeit, die von der Adsorption und Adhäsion des Wassers an die Feststoffmatrix und der Kohäsion der Wassermoleküle untereinander verrichtet wird. So muß die verrichtete Hubarbeit bei einem kapillaren Aufstieg wieder aufgewendet werden um dem Boden das Wasser zu entziehen. Das Matrixpotential ist daher negativ zum Gravitationspotential definiert, treffend durch den Begriff Saugspannung ausgedrückt. Allgemein beinhaltet das Matrixpotential als Stammfunktion die Summe aller Kräfte, die Wasser gegen die Schwerkraft im Boden halten.

Dort, wo das piezometrische Potential $\psi_h = 0$ beziehungsweise das Matrixpotential $\psi_m = 0$ ist, wird die Grundwasseroberfläche definiert, darunter wirkt nicht mehr das Matrixpotential, sondern das piezometrische Potential. Da sich beide gegenseitig ausschließen, können sie zu einer Funktion $\psi_{m,h}$ zusammengesetzt werden.

In Verbindung mit dem Gravitationspotential definiert man folgendes Teilpotential als hydraulisches Potential ψ_H :

$$(33) \quad \psi_H = \psi_p + \psi_z \quad [\text{hPa}]$$

Als Vereinfachung unter atmosphärischen Bedingungen und ohne Auflast:

$$(34) \quad \psi_H = \psi_{m,h} + \psi_z \quad [\text{hPa}]$$

Es entspricht dem, was mit einem Differenzdruckaufnehmer von einem Bezugshorizont aus in einem wassergefüllten Keramiktensiometer gegen die Atmosphäre gemessen wird.

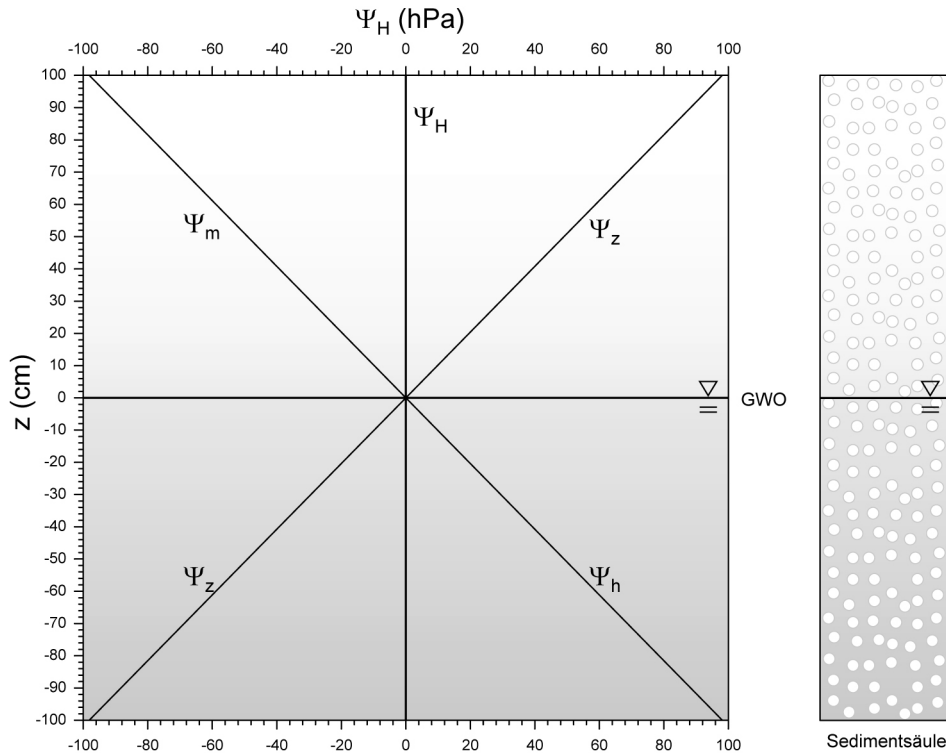


Abb. 3: Hydraulisches Potential ψ_H im Gleichgewichtszustand. Dargestellt sind die wirksamen Teilpotentiale nach Gleichung (34). Das hydraulische Potential wird oberhalb des piezometrischen Nullpunktes (Grundwasser Oberfläche GWO) aus Matrixpotential ψ_m und Gravitationspotential ψ_z gebildet, unterhalb aus dem piezometrischen Potential ψ_h und dem Gravitationspotential.

Genaugenommen gilt die resultierende Umrechnung $100 \text{ hPa} = 101.937 \text{ cmWS}$ nur für reines Wasser bei Normaldruck (1013.25 hPa), 4°C Wassertemperatur sowie der Näherung $g = 9.81$. Bei 20°C erhöht sich nach *Tab. 2* der Wert durch die temperaturbedingte Dichteverminderung auf 102.117 cmWS . Berücksichtigt man genaue Gravitation (lt. Gleichung (16)) und Umgebungsdruck (hier: 954.6 hPa) bezogen auf München (48.1°N , 500 m) sowie eine Druckminderung von 100 hPa , bewirkt dies (u. a. aufgrund der temperaturabhängigen Kompressibilität des Wassers) nur eine geringe Veränderung auf $100 \text{ hPa} = 102.139 \text{ cmWS}$.

2.3.6 Potentialgradienten

Der Potentialgradient stellt die erste Ableitung des Potentials dar. Das hydraulische Potential läßt sich somit als Integral der Summe seiner partiellen Ableitungen beschreiben:

$$(35) \quad \psi_H(x, y, z) = \int_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \left(\frac{\partial \psi_{m,h}}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi_{m,h}}{\partial y} dy + \frac{\partial \psi_{m,h}}{\partial z} dz + \frac{\partial \psi_z}{\partial z} dz \right) \quad [\text{hPa}]$$

Der Gradient für die horizontale Bewegung wird durch

$$(36) \quad \text{grad} \psi_H(x, y) = \frac{\partial \psi_{m,h}}{\partial x} + \frac{\partial \psi_{m,h}}{\partial y} ; \quad z = \textit{konstant} \quad [-]$$

ausgedrückt, für die vertikale Bewegung lautet er (nach HARTGE & HORN 1996):

$$(37) \quad \text{grad} \psi_H(z) = \frac{\partial \psi_{m,h}}{\partial z} + 1 ; \quad x, y = \textit{konstant} \quad [-]$$

2.3.7 pF-Kurve

Der dekadische Logarithmus des negativen Potentials der freien Energie (KUNTZE et al. 1994) in cmWS wird auch als *pF*-Wert bezeichnet (SCHOFIELD 1935).

$$(38) \quad pF = \lg(-\psi_m) ; \quad \psi_m \text{ in cmWS} \quad [-]$$

Die Darstellung Saugspannung zu Wassergehalt pF/θ wird als *pF*-Kurve bezeichnet. Die Definition des *pF*-Wertes ist international eingeführt, manche Autoren benutzen jedoch die physikalisch exaktere Einheit hPa statt cmWS.

An der elektronegativ geladenen Oberfläche von Quarz bzw. Silikaten werden Wassermoleküle durch Coulomb'sche Kräfte, van-der-Waals-Kräfte und Wasserstoffbrückenbindungen adsorbiert. Mit dem Abstand zur Grenzfläche nehmen diese jedoch exponentiell ab. In unmittelbarer Nähe beträgt die Bindungsenergie der ersten Molekülschicht etwa -630 MPa, der zweiten bereits -250 MPa (KEMPER & ROLLINS aus HARTGE & HORN, 1996). Der Bereich -40 MPa bis -1 GPa bzw. *pF* 5.6 bis 7 besteht aus wenigen Molekülschichten und wird als Schwarmwasser bezeichnet. Erweitert bis -5 MPa wird es nach DIN 4049-3 hygroskopisches Wasser genannt. Bei diesem weisen die physikalischen Eigenschaften des Wassers einen Zustand so hoher Viskosität und Dichte auf, daß sie zu einer Unbeweglichkeit führen, die die Strömungsvorgänge vernachlässigbar gering werden läßt. Um einen Boden vollständig zu entwässern, muß ein Druck von 1 GPa aufgebracht werden, beziehungsweise auf eine Temperatur von 105 °C erhitzt werden.

Im Bereich von -5 MPa bis -0.8 MPa findet unter dem Begriff Adsorptionswasser (DIN 4049-3) der Übergang vom unbeweglichen zum mobilen Wasser mit den vorher beschriebenen Eigenschaften unter Normalbedingungen statt. So liegt hier auch der Grenzwert der Pflanzenverfügbarkeit: der permanente Welkepunkt (PWP, *pF* 4.2, -1.5 MPa). Das durch Adhäsionskräfte (BUSCH et al. 1993, wobei der Begriff Adhäsionswasser verwendet wird) angelagerte Adsorptionswasser liegt auch im gesättigten Fall an den Korngrenzen als Bereich höherer Viskosität vor und kann vor allem parallel zur Kornoberfläche bewegt werden. Die tatsächliche Filmdicke des Adsorptionswassers nimmt mit zunehmendem Ionengehalt ab.

Mit Porenwinkelwasser (DIN 4049-3) wird der Bereich von -0.8 bis -0.1 MPa bezeichnet. Dieser Druckbereich kann einerseits nicht von einer Kapillarwassersäule kompensiert werden, andererseits kommt hier bereits gegenüber der Adsorption und Adhäsion die Oberflächenspannung des Wassers zur Geltung. Zugeordnete Porengrößen enthalten also einen hohen Anteil an Adsorptionswasser, wirken aber bei höheren Bodenwassergehalten wie eine Kapillare. Im zugeordneten Wassergehaltsbereich halten sie grundsätzlich das Wasser gegen die Schwerkraft. Alle vorangegangenen Potentialbereiche bis -0.1 MPa werden unter dem Oberbegriff Haftwasser im engeren Sinne zusammengefaßt. Die Grenze des maximal gegen die Schwerkraft verbleibenden Wassers wird Feldkapazität genannt und liegt in niedrigeren Saugspannungsbereichen (-300 bis -60 hPa). Sie entspricht der allgemeinen Definition von Haftwasser (DIN 4049-3).

pF	ψ_m (hPa)	d_c (μm)	Bezeichnung	Kraft	Poreneinteilung
7.0	$-1000 \cdot 10^4$	0.0003			
6.8	$-630 \cdot 10^4$	0.00048	1. Schicht	Adsorption	Feinporen
6.4	$-250 \cdot 10^4$	0.0012	2. Schicht		
6.18	$-150 \cdot 10^4$	0.002	Schwarm- wasser		
6.0	$-100 \cdot 10^4$	0.003			
5.6	$-40 \cdot 10^4$	0.0075	hygroskopisches Wasser		
5.48	$-30 \cdot 10^4$	0.01			
5.0	$-10 \cdot 10^4$	0.03	Adsorptionswasser		
4.7	-50000	0.06			
4.2	-15850	0.19			
4.0	-10000	0.3	Porenwinkelwasser		
3.9	-8000	0.38			
3.48	-3000	1	Kapillarwasser	Kohäsion	
3.0	-1000	3			
2.48	-300	10			
2.18	-150	20			
2.0	-100	30			
1.78	-60	50			
1.48	-30	100	enge Groporen		
1.0	-10	300			
0.48	-3	1000			
0.0	-1	3000	weite Groporen		

Abb. 4: Einteilung und Verhältnis von Äquivalent-Porengrößen zu Potential und Bindungseigenschaften des Wassers. pF -Wert nach Gleichung (38), die Werte des Matrixpotentials ψ_m sind aufgerundet (siehe auch 2.3.5). Der Kapillardurchmesser d_c wurde nach Gleichung (26) für Aqua dest. berechnet. Der fließende Übergang der Bindungskräfte ist volumenmäßig zu betrachten, da schwächere Bindungsformen immer Anteile aller stärker gebundenen Schichten enthalten. Einteilung der Porengrößen nach SCHEFFER et al. (2002), Bezeichnung der verschiedenen gebundenen Wasserschichten nach DIN 4049-3, Abgrenzung der Adhäsion nach BUSCH et al. (1993), hygroskopischer Bereich nach KUNTZE (1994), Molekularschichten aus KEMPER & ROLLINS in: HARTGE & HORN (1996).

Zwischen -1000 und 0 hPa liegt der Bereich des Kapillarwassers. Es unterliegt den Gesetzen des kapillaren Aufstiegs und erfordert für Saugspannungen, die dauerhaft niedriger als etwa -100 hPa sind, das Vorhandensein einer Grundwasseroberfläche. Zusammenhängendes Kapillarwasser in einem Porenkontinuum besitzt die Strömungseigenschaften des Grundwassers, jedoch mit geringerer Querschnittsfläche.

Die Abhängigkeit des Matrixpotentials vom volumetrischen Wassergehalt läßt sich als Funktion $\psi_m(\theta)$ darstellen, deren graphische Darstellung nach DIN 4049-3 als Saugspannungskurve definiert ist. Diese Funktion ist jedoch abhängig vom dynamischen Zustand des Bodenwassers. Bei einer Zunahme des Wassergehaltes werden niedrigere Saugspannungen für gleiche Wassergehalte gemessen als bei einer folgenden Entwässerung. Die Grenzfunktionen der Saugspannungskurven werden als Sorptions- und Desorptionskurve bezeichnet. Bei einem Wechsel des Strömungszustandes zwischen Be- und Entwässerung folgt das Matrixpotential einer Hysteresen-Kurvenschar.

Die Ursachen der Matrixpotentialveränderung sind in dem Mechanismus der Adhäsions- und Kohäsionskräfte sowie in der Geometrie des Porenraums zu suchen, sie sind jedoch nicht vollständig geklärt:

- Nach BUSCH et al. (1993: 50) ist der Benetzungswinkel $\alpha_{F,S}$ an der vordringenden Benetzungsfront größer als an der abziehenden Front des Bodenwassers.
- Ein weiterer Grund für die Veränderung der Kraftereinwirkung bezogen auf ein konstantes Wasservolumen resultiert aus der Schwankungsbreite der Porenkanaldurchmesser. Während bei der Bewässerung alle Poren an der Bewässerungsfront nach und nach aufgefüllt werden, entleeren sich bei der Entwässerung überproportional die größeren Poren. Bei der Bewässerung ist somit teilweise der hydraulische Kontakt zu engen Poren und deren starke Kapillarwirkung noch nicht hergestellt, somit stellt sich mit relativ geringerem Wasservolumen ein hydraulisches Gleichgewicht ein.
- Weiterhin werden bei der bevorzugten Entwässerung der größeren Poren weniger gekrümmte Wasseroberflächen statistisch benachteiligt.
- Während der Bewässerungsphase können auch höhere prozentuale Anteile von eingeschlossenen Luftblasen zu geringeren Massenanteilen des Wassers gegenüber der Entwässerungsphase führen, was sich zwar nicht auf das Matrixpotential, jedoch auf den gemessenen Wassergehalt auswirkt.

Aus gemessenen Desorptionskurven lassen sich Diagramme für den volumetrischen Wassergehalt als Funktion der an einem Tensiometer anliegenden Saugspannung erstellen. Für einen kleinen Abschnitt läßt sich diese Funktion als Polynom oder Exponentialfunktion in Form einer Regression mathematisch beschreiben. Um über einen großen Bereich von der Sättigung bis zum permanenten Welkepunkt zu verfügen, eignen sich besonders numerische Näherungen wie die verbreitete Gleichung von VAN GENUCHTEN (1980), die, aufbauend auf einem Ansatz von MUALEM et al. (1991), den Kurvenabschnitt folgendermaßen beschreibt:

$$(39) \quad \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot h)^n} \right]^m \quad [-]$$

Aus dem Kurvenabschnitt $\theta_{sat} - \theta_{res}$ wird innerhalb der Funktionsgrenzen mit dem Sättigungswassergehalt θ_{sat} (Maximum) und dem residualen Wassergehalt θ_{res} (Minimum) der Zusammenhang zwischen Wassergehalt θ und der Druckhöhe h , die dem Matrixpotential ψ_m entspricht, numerisch hergestellt. Die numerischen Parameter α , m , n müssen entsprechend der gemessenen Saugspannungskurve eingestellt werden. (Beispielwerte für ein gedachtes Sediment unter Berücksichtigung der Gleichung $m = 1-1/n$: $\theta_{sat} = 0.5$, $\theta_{res} = 0.1$, $\alpha = 0.005$, $m = 2.0$, $n = 0.5$)

Nach Umformung erhält man die Umkehrfunktion $\theta(\psi_m)$, die zur Berechnung des volumetrischen Wassergehaltes aus Saugspannungsmessungen erforderlich ist:

$$(40) \quad \theta = \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{\left[1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n\right]^m} + \theta_{res} \quad [-]$$

2.3.8 Hydraulische Leitfähigkeit

Im gesättigten Fall (Grundwasser) ist der gesamte Porenraum mit Bodenwasser gefüllt, wobei eine Strömung durch den hydraulischen Gradienten

$$(41) \quad I = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad [-]$$

mit dem piezometrischen Höhenunterschied Δh über der horizontalen Distanz Δl im Erdschwerefeld ausgelöst wird. Nach dem Gesetz von DARCY (aus HÖLTING 1995) berechnet sich die Durchlässigkeit eines Sedimentkörpers aus der durch eine Querschnittsfläche A hindurchfließende Wasserströmung Q [m^3/s] und dem anliegenden hydraulischen Gradienten:

$$(42) \quad k_f = \frac{Q}{A \cdot I} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f enthält nicht nur die spezifischen Eigenschaften des Sedimentkörpers, sondern auch die des Grundwassers. Daher wird für Sedimente auch die allgemeine spezifische Permeabilität k angegeben, bei der die strömende Flüssigkeit unter Berücksichtigung der dynamischen Viskosität μ und des spezifischen Gewichtes γ eingeht:

$$(43) \quad k = \frac{\mu}{\gamma} \cdot \frac{Q}{A \cdot I} \quad [\text{m}^2]$$

Der Term Q/A wird nach HÖLTING (1995) auch als Wasserflußdichte q bezeichnet:

$$(44) \quad q = \frac{Q}{A} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Da Wasser im Labor nach 2.3.1 in veränderlichen Zuständen auftreten kann, erfordert dies eine Umrechnung aus der Definition des Durchlässigkeitsbeiwertes bei Grundwasser mit $T = 10^\circ\text{C}$

$$(45) \quad k_F = k \cdot \frac{\gamma_{w10}}{\mu_{w10}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

in eine für Laborversuche durch Gleichung (14) und (15) sowie Einsetzung von Gleichung (44), vereinfachte Form:

$$(46) \quad k_F = \frac{q}{I} \cdot \frac{\nu_w}{\nu_{w10}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Hierbei entspricht ν_w der tatsächlichen kinematischen Viskosität des Wassers und ν_{w10} derselben bei 10°C.

In der ungesättigten Zone ist der Durchlässigkeitsbeiwert k_u abhängig vom Wassergehalt, da der durchflossene Strömungsquerschnitt dem Porenraum nur noch anteilmäßig, entsprechend dem Sättigungsgrad, entspricht. Die Funktion ist nichtlinear, da bei geringen Wassergehalten neben verlängerten Wegstrecken die unter 2.3.7 beschriebenen Bindungskräfte deutlich zur Geltung kommen. Außerdem weist er einen geringen Hystereseeffekt analog zum Matrixpotential auf. Setzt man in Gleichung (46) die hydraulischen Gradienten aus den Gleichungen (36) und (37) ein, bekommt man für die vertikale Durchlässigkeit

$$(47) \quad k_u(\theta, z) = - \frac{q}{\text{grad}\psi_H(z)} \cdot \frac{\nu_w}{\nu_{w10}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

und für den horizontalen Fall:

$$(48) \quad k_u(\theta, x, y) = \frac{q}{\text{grad}\psi_H(x, y)} \cdot \frac{\nu_w}{\nu_{w10}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Durch Bestimmung der Parameter aus Gleichung (40) ist es nach VAN GENUCHTEN (1980) möglich, die Funktion des Durchlässigkeitsbeiwertes aus dem Wassergehalt zu berechnen (hier ohne Temperaturkorrektur):

$$(49) \quad k_u(\theta) = \theta^{\frac{1}{2}} \cdot \left[1 - \left(1 - \theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Wenn nicht der Wassergehalt, sondern das Matrixpotential bekannt ist, muß nicht nach Gleichung (40) umgerechnet werden:

$$(50) \quad k_u(\psi_m) = \frac{1 - (\alpha \cdot \psi_m)^{n-1} \cdot [1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n]^{-m}}{[1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

2.4 Elektrische Leitfähigkeit

Die Ionenfracht im Bodenwasser läßt sich als Summenparameter über die elektrische Leitfähigkeit bestimmen. Die Höhe der elektrischen Leitfähigkeit ist hauptsächlich abhängig von der Ionenkonzentration, der Ionenart (Wertigkeit, Größe) sowie der Temperatur. Um Aussagen über die Ionenkonzentration zu treffen, muss die Temperatur der Lösung sowie die Zusammensetzung der gelösten Stoffe bekannt sein.

Die Definition des elektrischen Leitwertes G resultiert aus dem elektrischen Widerstand R der Elektrolytlösung,

$$(51) \quad G = \frac{1}{R} \quad [\text{S}]$$

wobei dieser von der Fläche der gegenüberliegenden Elektroden A_E (Querschnitt des Leiters), deren Abstand l_E (Länge des Leiters) sowie dem temperaturabhängigen spezifischen Widerstand ρ_T des Bodenwassers abhängt (nach KUCHLING 2004):

$$(52) \quad R = \frac{\rho_T \cdot l_E}{A_E} \quad [\Omega]$$

Die elektrische Leitfähigkeit (auch: spezifische elektrische Leitfähigkeit) κ_T ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes:

$$(53) \quad \kappa_T = \frac{1}{\rho_T} \quad \left[\frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} \right]$$

In Anwendung auf eine Sonde zur Leitfähigkeitsmessung stellt

$$(54) \quad \kappa_T = \frac{l_E}{R \cdot A_E} \quad \left[\frac{\text{S}}{\text{m}} \right] \quad \text{bzw.} \quad \left[\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}} \right]$$

eine Näherung dar. Durch Kalibrierung der Messung können auch andere Leitergeometrien eingesetzt werden.

Durch die unter 2.3.1 beschriebene Temperaturabhängigkeit der Viskosität von Wasser erhöht sich je nach Ionenart die elektrische Leitfähigkeit um ein bis drei Prozent pro Kelvin. Für eine definierte Salzlösung lassen sich daher Meßwerte bei schwankender Temperatur auf eine Bezugstemperatur umrechnen (κ_{20} für $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Für Leitfähigkeitsmessungen im Sediment ist zu berücksichtigen, daß nur ein Teil des Gesamtvolumens aus Elektrolyt besteht. Bei gesättigten Verhältnissen entspricht der volumetrische Wassergehalt θ_{sat} der Porosität n .

Die elektrische Leitfähigkeit kann nach MUALEM & FRIEDMAN (1991) im gesättigten Fall (κ_{sat}) mit

$$(55) \quad \kappa_{sat}(\theta, T) = \kappa_T \cdot (\theta_{sat})^{1,5} \quad \left[\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}} \right]$$

im ungesättigten Fall (κ_{uns}) durch

$$(56) \quad \kappa_{uns}(\theta, T) = \kappa_T \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_{sat}} \right)^{2,5} \quad \left[\frac{\mu\text{S}}{\text{cm}} \right]$$

genähert werden. Im ungesättigten Fall ändert sich der Leiterquerschnitt mit dem Wassergehalt und ist von den Eigenschaften der jeweiligen Wasserfilmdicke abhängig. Der Term θ/θ_{sat} entspricht dem Sättigungsgrad θ_{rel} .

3. Methodik der hydraulischen Versuche

In sechs Versuchsreihen wurden insgesamt neun Sedimente und sedimentähnliche Materialien im Labor auf Korngrößenverteilung und Porenraum untersucht. Bei fünf Sedimenten wurden Tank- und Säulenversuche zur Messung von hydraulischen Zuständen und dem Wassermassentransport durchgeführt, wobei durch mehrdimensionale Sondenanlegung auch Heterogenitäten erfaßt wurden. Im vorliegenden Kapitel werden die eingesetzten Verfahren und Versuchsaufbauten beschrieben.

3.1 Sedimentbestimmung

Zur Bestimmung von Korngrößenverteilung nach DIN 4022-1 und Benennung nach DIN 18169 sowie der Bestimmung von Korndichte, Porenvolumen, Wassergehalt und Lagerungsdichte wurden bei jeder Versuchsreihe Proben genommen und untersucht.

3.1.1 Siebung

Für alle Proben wurde nach Trocknung und Wägung eine Naßsiebung mit Quadratlochplatten (Lochweite von 32 mm bis 4 mm) nach DIN ISO 3310-2 und Drahtsiebböden (Maschenweite von 2 mm bis 0,063 mm) nach DIN ISO 3310-1 mit einem Probenrüttler ausgeführt. Die Siebrückstände wurden nach vollständiger Trocknung eingewogen und prozentual in Rückstands- sowie Durchgangsanteil umgerechnet.

Die aufgefangene Schluff- und Tonfraktion wurde ebenfalls getrocknet und gewogen, danach mit dem folgenden Sedimentationsverfahren bestimmt. Die Proben wurden nach DIN 4022-1 und DIN 18196 klassifiziert.

3.1.2 Sedimentationsverfahren

Als Sedimentationsverfahren wurde das Aräometerverfahren nach CASAGRANDE (1934) verwendet und nach DIN 18123 ausgeführt. Zur Probenaufbereitung wurden 20 g des Feinkornanteiles mit 0,5 l Natriumphosphatlösung (Konzentration: 4,5 g/l) drei Stunden in einen Probenschüttler gegeben. Zur Aräometer-Messung wurde die Suspension in einem Meßzylinder mit Natriumphosphatlösung auf 1 l aufgefüllt.

Vergleichende Messungen mit Laserpartikelsizern (Fa. Coulter, Fa. Fritsch) bei gleicher Probenaufbereitung zeigten eine Verschiebung der Summenkurve zu kleineren Fraktionen hin. Eine kurze Ultraschallbehandlung der Probe zur Auflösung von Kornaggregaten verstärkte diese Tendenz. Der Fehler des Aräometerverfahrens wird einerseits auf die Kornform und Aggregate, die nicht einzeln absinkenden Äquivalentkugeln entsprechen, zurückgeführt, andererseits werden kleinere Fraktionen von den schnell absinkenden Anteilen mitgerissen.

3.1.3 Porenraum

Das Gesamtporenvolumen der verwendeten Sedimente wurde mit einem Luftpyknometer nach DIN 18121-2 bestimmt. Bei nahezu vollständiger Füllung des Druckbehälters betrug der Meßfehler über 1 % vom Gesamtvolumen, daher wurden mehrere Messungen gemittelt. Mit einer Digitalwaage wurde nach Gleichung (1) dann die Korndichte bestimmt.

Bei Sedimenten für Tank- und Säulenversuche wurde die Lagerungsdichte (4) nach DIN 18126 aus der lockersten und dichtesten Lagerung berechnet. Ebenfalls wurden gravimetrische Wassergehalte mit einer Digitalwaage (Anzeigenauigkeit 0,01 g) durch Messung vor und nach Ofentrocknung gewonnen und in volumetrische Wassergehalte umgerechnet.

3.2 Versuchsanlagen

Die verwendeten Anlagen wurden für jede Versuchsreihe neu konzipiert und aufgebaut. Durch Vorversuche konnte die Funktionalität der meßtechnischen und hydraulischen Komponenten optimiert werden. Eindimensionale Fragestellungen wurden in Säulenversuchen umgesetzt, mehrdimensionale Untersuchungen zur Heterogenität der Strömung in Tankversuchen.

3.2.1 Säulenversuche

Für hydraulische Säulenversuche standen Plexiglasbehälter mit Durchmessern von 19 und 30 cm zur Verfügung sowie verschiedene Duranglaskolonnen (Fa. Schott) mit 30 cm Durchmesser.

Die Plexiglassäulen (Einbauhöhe 65 cm) wurden zur Kalibrierung der Meßerfassungsanlage sowie zur Bestimmung der Wassergehaltsverteilung und pF-Kurve von Sedimenten eingesetzt. Die Duranglaskolonnen (Gesamthöhe 150 cm) wurden für hydraulische Bestimmungen und Untersuchung der Einflüsse von biologischen Kontaminationen verwendet.

Abbildung 5 zeigt den Versuchsaufbau für die Bestimmung der pF-Kurve. Der Behälter besitzt seitliche Bohrungen für 12 Tensiometer und ist hydraulisch mit einem Ausgleichsbehälter verbunden. Im Ausgleichsbehälter wird über eine Schlauchpumpe und einen Ablauf ein konstantes Druckniveau eingestellt.

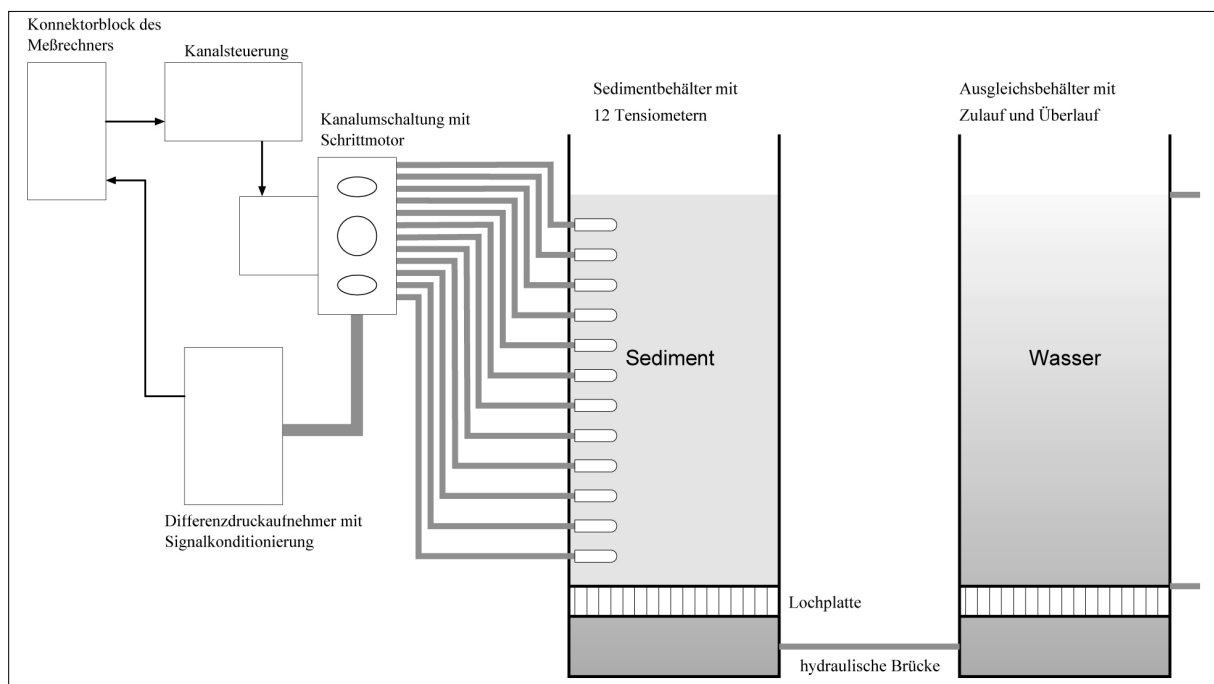


Abb. 5: Versuchsaufbau zur Bestimmung der pF-Kurve. Mit dem Ausgleichsbehälter wird ein konstantes hydraulisches Niveau eingestellt. Die Meßerfassungsanlage steuert die Kanalumschaltung um zirkulär 12 Tensiometer nacheinander über den Differenzdruckaufnehmer zu erfassen. (Nicht abgebildet: Temperaturmessung für Sediment, Wasser und Luft, Schlauchpumpe für den Zulauf des Ausgleichsbehälters.)

Für Desorptionmessungen wird der Wasserspiegel zunächst bis zur Sedimentoberkante angehoben und dann auf die Sedimentunterkante abgesenkt. Von der Meßerfassungsanlage werden die Tensiometer nacheinander abgerufen. Mit Pt100-Temperatursonden wird die Temperatur im Sediment gemessen. Wenn sich die Saugspannung stabilisiert hat, wird das Sediment ausgebaut und alle 5 cm eine Probe zur Bestimmung des Wassergehaltes (siehe auch Kap. 2.3.2) durch Ofentrocknung genommen.

3.2.2 Tankversuche

Zur mehrdimensionalen Messung von hydraulischen Zuständen und dem Wassermassentransport wurde ein Plexiglastank (Innenmaße: Länge 50 cm, Breite 50 cm, Höhe 100 cm) mit einer Einbauhöhe von bis

zu 60 cm verwendet, der in Zusammenarbeit mit BÄHR (1997) und WENINGER (1995) gebaut wurde. Der gesamte Versuchsaufbau bestand aus einer Beregnungsanlage oberhalb und einer Abflußmessanlage unterhalb des Sedimentkörpers sowie Sonden zur Messung von Temperatur, Saugspannung und elektrischer Leitfähigkeit. Alle Meß- und Regelvorgänge wurden von einer zentralen PC-Meßerfassungsanlage ausgeführt.

Durch den Aufbau in einer Stahlkonstruktion besitzt der Plexiglastank 82,5 cm Bodenfreiheit, die für die Abflußmessung mit einer Digitalwaage ausreichen. Die vier Bodenabflüsse wurden durch ein Kunststoffvlies gegen Sedimentpartikel gesichert und in einen zentralen Ablaufbehälter geleitet. Auf den Tank wurden verschiedene Beregnungsanlagen montiert, die mit einer Abdeckung gegen Verdunstung versehen wurden. Die Innenwandung wurde transparent mit Quarzsand beklebt (Silikon), um Randumläufe zu verhindern und Bewässerungsfronten oder Fingerbildung dennoch sichtbar zu machen. Für den Einsatz von Sprühnebel (aus 60 cm Höhe) wurde an der Tankwandung eine Auffangrinne mit eigenem Ablauf installiert, der quantifiziert oder in den Wasservorratsbehälter der Beregnungsanlage rückgeführt wurde.

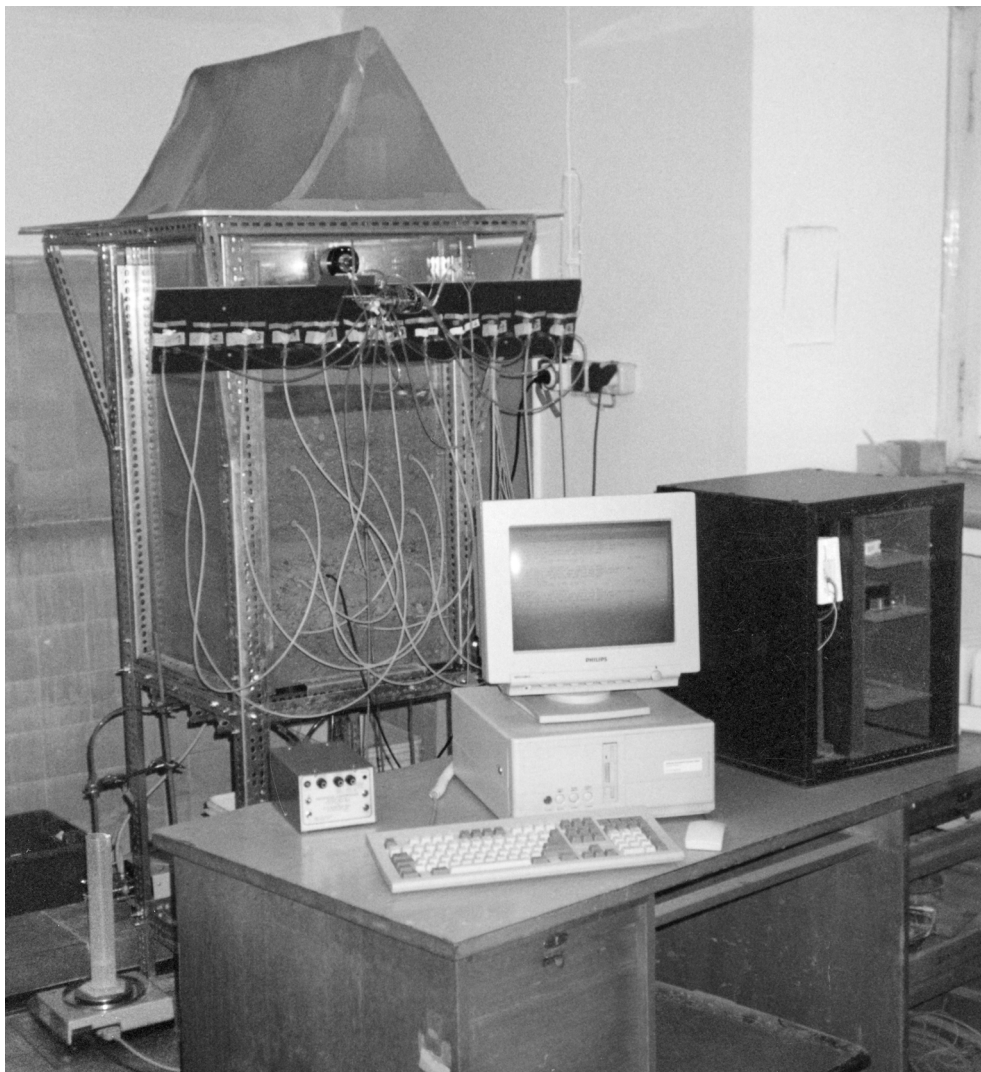


Abb. 6: Tankversuchsanlage. Auf dem Tisch im Vordergrund ist die PC-Meßerfassungsanlage zu sehen. Dahinter befindet sich der Versuchstank mit dem eingebauten Sediment. Auf dem Tank befindet sich die abgedeckte Beregnungsanlage, vor dem Tank die Tensiometeranlage (helle Schläuche) und die Temperaturfühler (dunkle Kabel). Links unten steht eine Digitalwaage mit Meßzylinder zur Abflußmessung.

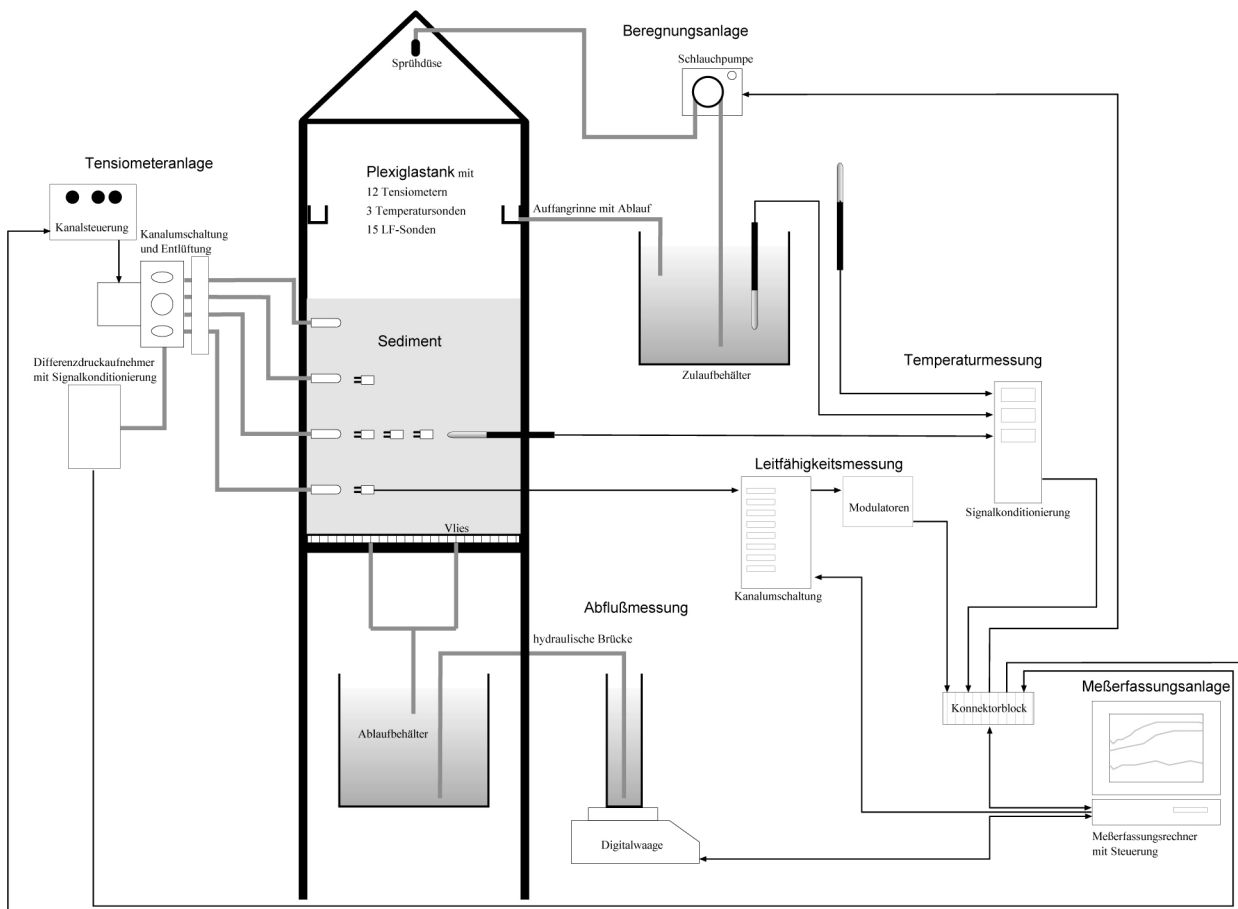


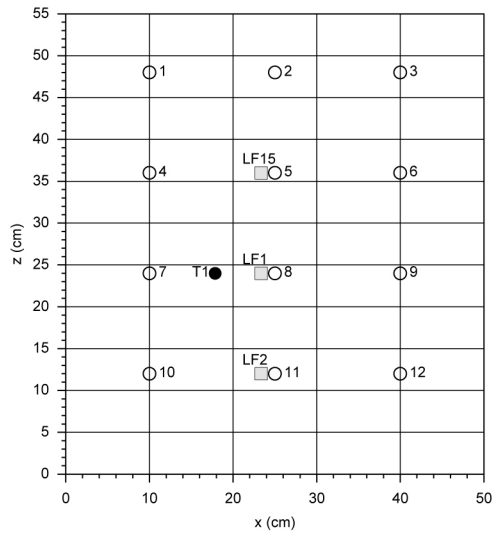
Abb. 7: Schematischer Aufbau der Tankversuchsanlage für Sprühnebelversuche. Mit einer steuerbaren Schlauchpumpe und einer Sprühdüse wird dem Sedimentkörper homogenes Wasser zugeführt. Von der Tankwand abtropfendes Wasser wird durch eine Auffangrinne in den Zulaufbehälter zurückgeführt. Im Sediment befinden sich Tensio-, Temperatur- und LF-Sonden, deren Signal von einer PC-Meßfassungsanlage aufgezeichnet werden. Bei Wassermengen über 2 l wurde mit einer hydraulischen Brücke nur ein prozentualer Anteil des Abflusses mit einer Digitalwaage gemessen.

Der Einbau des Sedimentes erfolgte in verdichteten Schichten (2 cm) und ergab bei einer Einbauhöhe von 55 cm ein Volumen von 137,5 l. Für die Beregnungsanlage wurde ein Vorratsbehälter mit gemessenen Wassermengen und Ionenkonzentrationen sowie eine kalibrierte, rechnergesteuerte Schlauchpumpe verwendet. In einem ebenso großen Ablaufbehälter wurde das Wasser wieder gesammelt. Die Abflußrate konnte mit induktiven Durchflußmessern, Drucksonden oder vorzugsweise Digitalwaagen ermittelt werden.

Auf der Frontseite ist der Tank mit 16 Bohrungen versehen, in die in vier Ebenen 12 Tensiometer (Rasterabstand: vertikal 12 cm, horizontal 10 cm) und mehrere Bodentemperatursonden eingesetzt werden konnten. Außerhalb des Tankes wurde die Luft- und Wassertemperatur gemessen (siehe Abb. 8).

In das Sediment wurden weiterhin 15 LF-Sonden zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit eingebaut, davon 13 gleichmäßig verteilt in der zweiten Tensio-ebene (24 cm vom Tankboden), drei bildeten ein vertikales Profil. Eine Temperatursonde wurde zur Temperaturkompensation ebenfalls in der zweiten Ebene positioniert. Wasserfronten mit veränderter Ionenkonzentration konnten somit zeitlich, räumlich und quantitativ beobachtet werden.

a)



b)

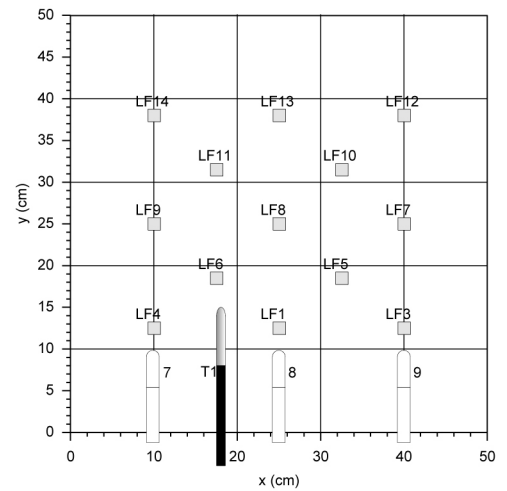


Abb. 8: Verteilung der Meßsonden im Versuchstank. a) Vertikale Verteilung von 12 Tensiometern, einer Bodentemperatursonde und 3 der LF-Sonden. b) Horizontale Verteilung von 13 LF-Sonden in der Ebene 24 cm über dem Tankboden, ebenfalls zu sehen sind 3 Tensiometer und die Bodentemperatursonde zur Temperaturkompensation.

3.3 Meßtechnik

Die durchgeführten Tank- und Säulenversuche erforderten kontinuierliche Meß- und Steuerprozesse, somit war eine vollautomatische Meß- und Regeltechnik unabdingbar. Die gesamten Meßerfassungsanlagen wurden modular aus Bauteilen verschiedener Hersteller (siehe auch Kap. 9.3.1) aufgebaut und stellen somit eine Eigenentwicklung dar. Das technische Gesamtkonzept, die Systemkomponenten und die Meßerfassungssoftware konnten daher für die einzelnen Versuchsreihen optimiert werden.

Das zentrale Bauteil der fünf verwendeten Anlagen ist jeweils ein mit verschiedenen Meßkarten (siehe auch Kap. 3.3.1) bestückter Rechner, der mit einer für den jeweiligen Versuch geschriebenen Meßerfassungssoftware die angeschlossenen Systeme steuert sowie Meßdaten erfaßt, umrechnet und abspeichert. Rechner, Monitor und Meßtechnik wurden jeweils in ein bewegliches 19“-Rack eingebaut.

3.3.1 Meßerfassungsrechner

Zur Meßerfassung wurden Computer eingesetzt, die vorwiegend mit 486/50-Prozessoren bestückt waren. Die Arbeitsgeschwindigkeit war für hydraulische Messungen, die zum Teil über Wochen und Monate liefen, vollkommen ausreichend. Die Grundausstattung umfaßte bis zu vier serielle Schnittstellen, an denen die RS232-Schnittstellen externer Geräte sowie eine Maus angeschlossen wurden. Die umfangreichste Schnittstellenfunktion übernahm eine programmierbare Multifunktionskarte. Zum Einsatz kamen zwei ähnliche Modelle:

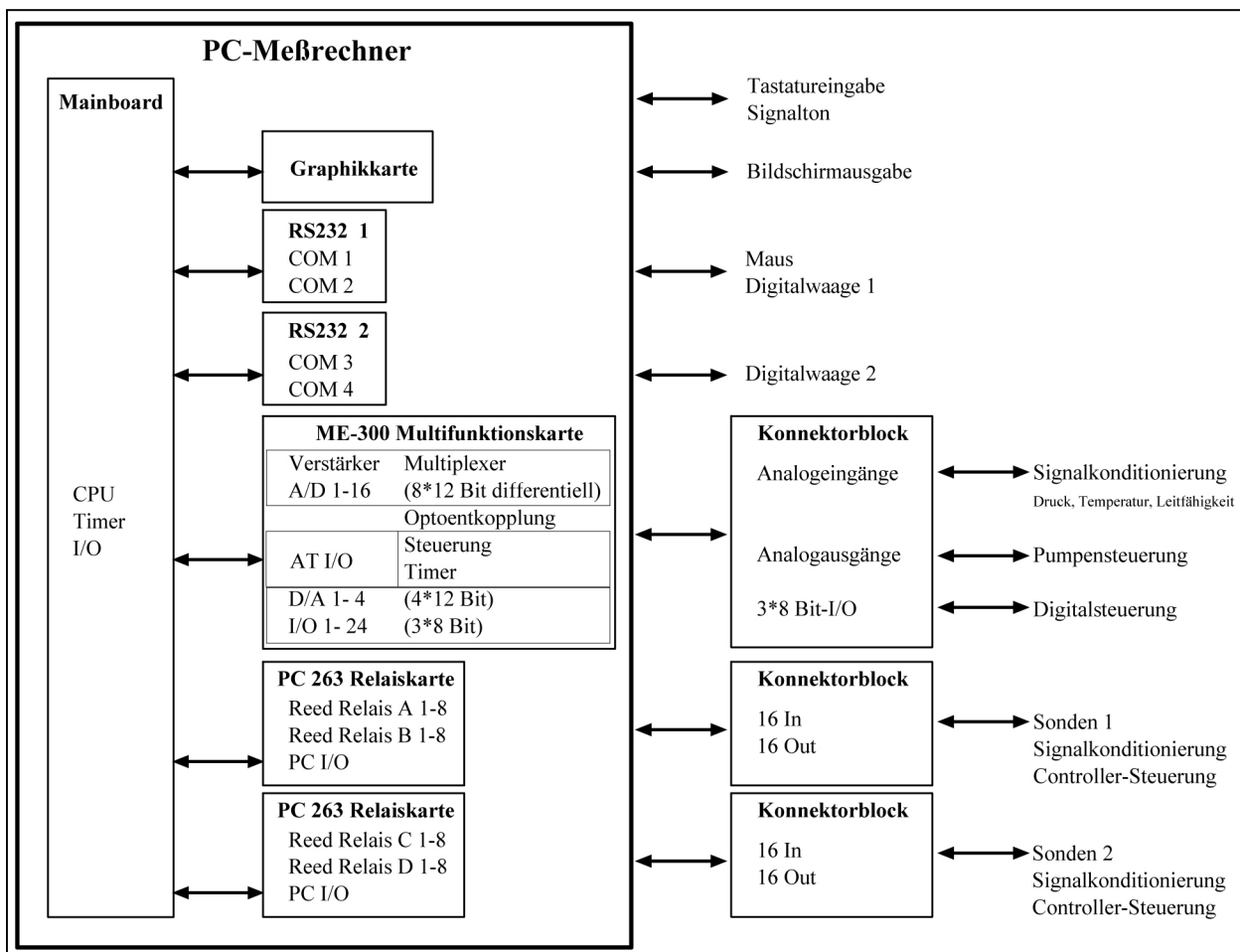


Abb. 9: Schematischer Aufbau des Meßrechners. Die Zeiterfassung erfolgt über den internen Timer, die periodische Messung der signalkonditionierten Sonden über A/D-Wandlung durch eine Multifunktionskarte. Die Steuerung wird durch D/A-Wandler und Digitalschnittstellen der Meßkarte realisiert, digitale Lesevorgänge durch die RS232-Schnittstellen. Für Schaltvorgänge und Impulssteuerung werden Relaiskarten eingesetzt.

- Die Multifunktionskarte ME 30-2 (Fa. Meilhaus Electronic) besitzt sechzehn 12-Bit A/D-Wandler, die zur Vermeidung von Störsignalen als acht differentielle Spannungseingänge dienen. Diese konnten hardwareseitig eingestellt werden, und waren daher alle bidirektional auf ± 1 V eingestellt. Weiterhin waren vier analoge D/A-Ports (2-12-Bit, 2-8-Bit) zur Steuerung externer Geräte vorhanden. Zur Steuerung von digitalen Bauteilen waren drei 8-Bit-Digitalports vorhanden.
- Die Multifunktionskarte ME 300 (Fa. Meilhaus Electronic) unterscheidet sich hauptsächlich darin, daß die Einstellungen der A/D-Wandler programmierbar (0.1 V, 1 V, 10 V, auch bidirektional) sind, was nicht nur eine höhere Flexibilität zwischen den einzelnen Kanälen beziehungsweise Systemen ermöglicht, sondern auch eine automatisierte Meßbereichumschaltung. Gegenüber der ME 30-2 digitalisieren die A/D- Wandler anders, sie erzeugen eine unstetige Funktion, die für weitere Berechnungen durch ein Unterprogramm in eine lineare Funktion transformiert werden kann.

Weiterhin wurden Reed-Relais-Karten (PC263, Amplicon Liveline Ltd., UK, Vertrieb: Fa. Meilhaus Electronic) mit sechzehn programmierbaren Relais zur Schaltung von Signal-, Meß- und Steuerkreisen verwendet. Die externen Anschlüsse der Multifunktions- und Relaiskarten erfolgten durch Konnektorböcke, die über Multicorekabel mit dem Meßrechner verbundenen waren. Die Meßsysteme (z.B. Temperatur, Druck) enthielten jeweils Sonden mit einem Meßstromkreis (primärer Meßkreis), der über eine Signalkonditionierung zu einem, für die Multifunktionskarte digitalisierbaren, Signalstromkreis (sekundärer Meßkreis) aufbereitet wurde. Umgekehrt kann ein Steuersignal von einer Signalkonditionierung für ein externes Gerät gewandelt werden.

3.3.2 Software

Die Erstellung eines zuverlässigen vollautomatischen Meßprogramms ersetzt eine manuelle Dauerbetreuung des Versuches. Im Gegensatz zu einem Datenlogger können verschiedenste Produkte kostengünstig eingebunden und synchrone Steuerungen eingerichtet sowie Meßdaten verknüpft und geforderte physikalische Größen direkt berechnet werden.

Für die Erstellung der Meßerfassungssoftware wurden die Programmierertools LabWindows für DOS 5 beziehungsweise LabWindows CVI (National Instruments) für Windows 3.11 (Microsoft) verwendet. Während die erstere Variante einen dem Q-Basic ähnlichen Code verwendet, ist die CVI-Version auch ANSI-C kompatibel. Neben Compiler und Debugger stehen zahlreiche Libraryfunktionen und Kartentreiber zur Verfügung. Darüber hinaus enthält die CVI-Version ein Programm, mit dem Q-Basic-Files weitgehend in ANSI-C überführt werden können. Umfangreiche Steuer- und Grafikelemente erlauben das einfache Programmieren einer Bedienoberfläche.

Das Meßprogramm wurde ähnlich wie die Hardware modular aufgebaut. Das Hauptprogramm regelt hauptsächlich die zeitliche Abfolge der Unterprogramme und Funktionen. Über Interruptsteuerung und Grafikelemente kann es durch Tastatur oder Maus angesteuert werden. So kann während des Versuches jederzeit das Programm kurz angehalten werden, um z.B. Daten auf Diskette zu kopieren.

Folgende Unterprogramme und Funktionen werden generell verwendet:

- die absolute Zeiterfassung mit Datum und Uhrzeit sowie die relative Zeit seit Versuchsbeginn
- Initialisierung und Steuerung der Multifunktions- und Relaiskarten
- Verwendung der RS232-Schnittstellen
- Bereitstellung von Filenamen und automatische Speicherung von Arrays auf der Festplatte

Unterprogramme zur Meßdatenerfassung oder Steuerung:

- Einlesen der A/D-Wandler und der Relativzeit
- Linearisierung der Wandlerfunktion
- Integration über viele Einzelmessungen
- Umrechnung mit Kalibrierungsvorgaben
- Erzeugen eines Arrays (ASCII-File) mit Rohdaten (in Digits), berechneten Daten, Meßzeitpunkt
- Steuerung externer Bauteile über D/A-Wandler und Digitalports mit vorgegebenen Datensätzen

Die Integration von Meßwerten verbessert deren Genauigkeit, wenn der Signalkreis statistisch um einen Mittelwert streut. Zur Kontrolle wurden stets Rohdaten der Einzelmessungen abgespeichert.

Die Auswertung von Kalibrierungsdaten erfolgte mittels Regression mit dem Programm Xact (Fa. Scilab) und wurde dann in die entsprechenden Unterprogramme übertragen. Mit demselben Programm konnten auch die Meßdaten-Files ausgewertet und in Grafiken umgesetzt werden.

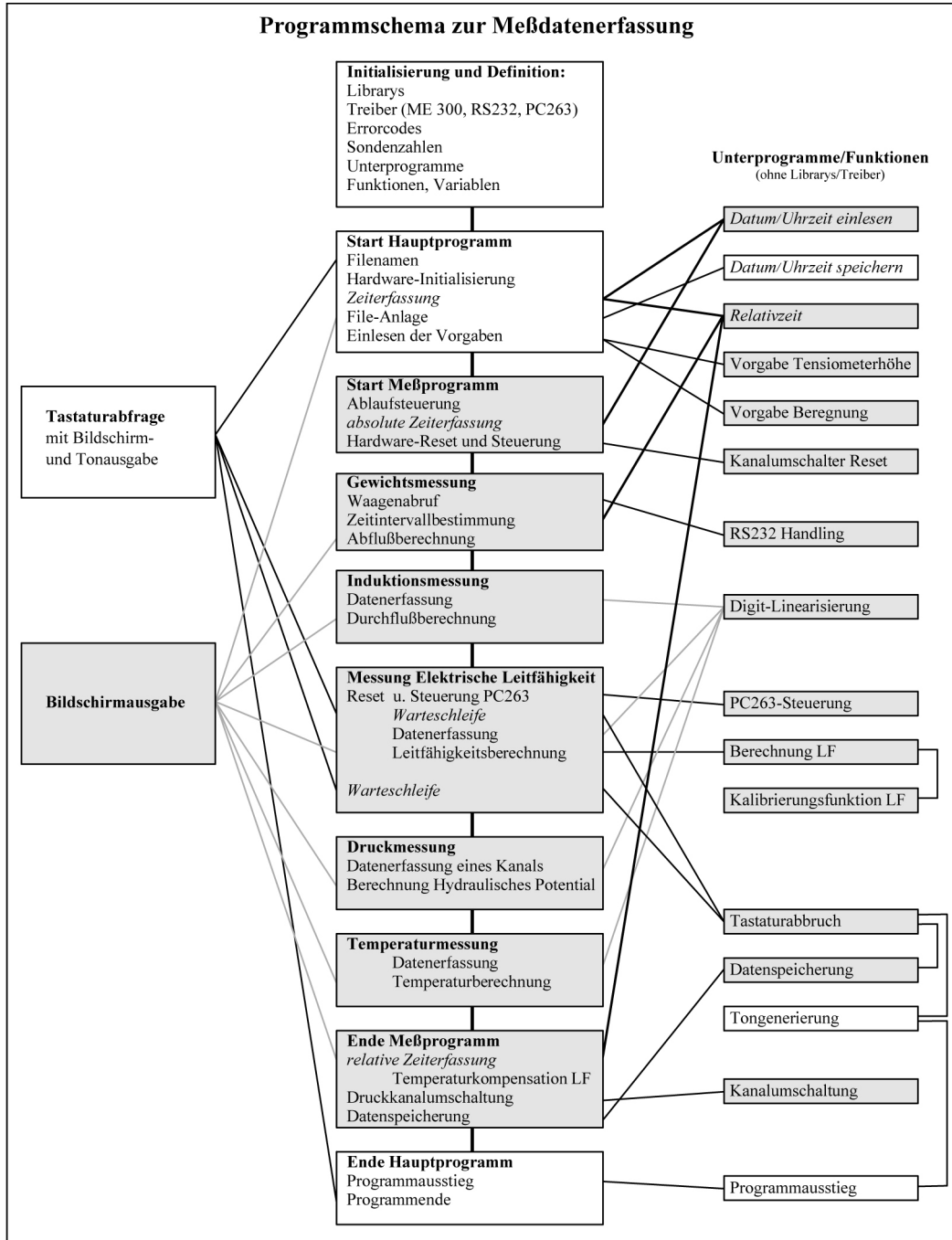


Abb. 10: Struktur des Meßprogrammes. Dargestellt ist die zeitliche Abfolge von Haupt- (weiß) und Meßprogramm (grau) und die Zugriffe auf die modular angelegten Unterprogramme (rechte Seite). Nach jedem Durchlauf eines Meßzyklus werden die Meßdaten und die in physikalische Einheiten umgerechneten Werte auf der Festplatte gespeichert. Alle relevanten Werte werden auf dem Bildschirm sofort nach der Messung angezeigt.

3.3.3 Berechnungssysteme

Zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften eines Sedimentes ist eine genaue Kenntnis der über eine Berechnungsanlage eingegebenen Wassermenge erforderlich. Dabei spielen nicht nur die Gesamtmenge und die Förderrate, sondern auch die Verteilung eine Rolle.

Die Gesamtmenge wurde dadurch bestimmt, daß eine genau bemessene Menge in einen Vorratsbehälter eingegeben und kontrolliert wurde.

Die Fördermenge wurde mit steuerbaren Präzisionsschlauchpumpen (Masterflex Mod. 7521-35 sowie Mod. L/S 7554-52, Vertrieb: Novodirekt) bewerkstelligt, die ein oder mehrere Pumpköpfe (Quick-Load, Masterflex Mod. ST-07014-20, 07013-20, 07015-20) mit haltbaren Norpreneschläuchen (Novodirekt) antreiben konnten.

Die Pumpensteuerung konnte manuell oder softwaregesteuert über einen D/A-Wandler mit einer 4-20 mA Signalkonditionierung auf einem zentralen Modulträgerboard (Acrowag APB01, Vertrieb: Fa. Synotech) verstellt werden. Vor Versuchsbeginn wurde die Schlauchpumpe warmgelaufen und kalibriert, indem die geförderte Wassermenge bei verschiedenen Geschwindigkeiten mit einer Präzisionswaage gemessen wurde (siehe auch Kap. 3.3.4). Zwischen 10 % und 90 % der Pumpleistung folgte diese einer linearen Funktion.

Die Aufbringung des geförderten Wassers auf die Sedimentoberfläche, die eigentliche Berechnung, stellte das größte technische Problem dar. Daher wurde, nach schlechten Erfahrungen mit Scannern, auf mechanisch bewegte Bauteile verzichtet. Zum Einsatz kamen rein hydraulische Systeme:

- Für punktförmige Berechnungen wurde der Pumpenkopf-Geberschlauch mit einer Edelstahlkanüle versehen und über dem Sediment fixiert. Wurde eine schrittmotorgesteuerte hydraulische Kanalumschaltung (Switch wafer W1260/1P-24T, Scanivalve Corp., Vertrieb: Fa. Althen) mit einer Schrittsteuerung (Solenoid-Controller CTCR 10P/S2-S6, Scanivalve Corp., Vertrieb: Fa. Althen) zwei Pumpenköpfen nachgeschaltet, konnten achtundvierzig solcher Berechnungspunkte erzeugt werden.
- Für Säulenversuche (\varnothing 30 cm) wurden zur flächendeckenden Berechnung perforierte Schläuche von beiden Enden beladen. Alternativ wurde eine aufwendigere Technik, bestehend aus einem flachen Druckbehälter mit etwa neunhundert feinen Kanülen, entwickelt.
- Für größere Flächen wurde ein feiner Sprühnebel mit einer Nebeldüse (Fa. Gardena) in einem überdachten Behälter erzeugt.

Um die Gleichmäßigkeit der flächigen Berechnung zu optimieren, wurden Testläufe mit flächendeckend aufgestellten Kunststoffdosen gleicher Abmessungen durchgeführt. Die Massendifferenz nach der Berechnung wurde mit einer digitalen Präzisionswaage (Sartorius excellence, 2000 g) bestimmt.

3.3.4 Abflußmessung

Für die Wasserbilanz und die hydraulische Dynamik war es erforderlich geringe Abflußmengen kontinuierlich zu messen. Je nach Anforderung wurden verschiedene Methoden verwendet:

- Die präziseste Methode bestand aus einem Meßzylinder auf einer kalibrierten Digitalwaage (Sartorius excellence, 2000 g) mit einer Genauigkeit von 0,01 g. Die Waage konnte vom Meßprogramm über eine RS232-Schnittstelle gesteuert und eingelesen werden. Mit den Differenzen von Masse und Zeit konnte neben der akkumulierten Menge auch der Abfluß in ml/min berechnet werden.
- Wenn mehrere parallele Abflüsse gleichzeitig bestimmt werden sollten, wurden parallel zur Waagenmethode Meßzylinder aufgestellt und nach Bedarf manuell oder mit anderen Methoden (s.u.) abgelesen.
- Vereinzelt wurden auch induktive Durchflußmesser (Modell DM 06, Fa. Pero) eingesetzt, die jedoch mit deionisiertem Wasser nicht funktionieren. Die Signalkonditionierung war integriert und erzeugte im Bereich ± 7 ml/min ein Signal von ± 1 V für den Signalkreis am differentiellen 12-Bit-Eingang der Meßkarte. Die Kalibrierung erfolgte über das Waagensystem und ergab keine linearen Funktionen. Mit dem Programm Xact (Scilab) wurden passende Polynomregressionen berechnet, die eine Datenausgabe in ml/min ermöglichten.

- Bei höheren Abflußmengen (über 2 l/d) wurden größere Abflußbehälter mit senkrechten Wänden eingesetzt, an die eine Drucksonde direkt oder über die Tensiometeranlage (siehe auch Kap. 3.3.5) angeschlossen wurde. Über die Druckhöhenänderung und die damit verbundene Volumenänderung konnte mittels Zeiterfassung die Abflußrate in ml/min bestimmt werden.
- Alternativ konnte ein Waagensystem (s.o.) mit einem hydraulisch zum Abflußbehälter verbundenen Meßzylinder (hydraulische Schlauchbrücke ohne mechanischen Kontakt zum Meßzylinder) eine Teilmenge bestimmen, die von dem Meßerfassungsprogramm über das Querschnittsverhältnis der Behältnisse (Querschnittsfläche Abflußbehälter/Querschnittsfläche Meßbehälter) in den Gesamtabfluß umgerechnet werden konnte. Der relative Meßfehler der Einzelmessung von 0.01 ml/min multipliziert sich mit dem selben Faktor.
- Eine weitere Methode bestand darin, den Abfluß über eine mechanisch frei auf der Waage stehenden Brücke zu leiten, was bei dynamischem Abflußverhalten nicht praktikabel ist. Ein Vorteil ist, daß große Abflüsse relativ genau erfaßt werden.

3.3.5 Saugspannungsmessung

Um eine vertikale zweidimensionale Verteilung der Wassergehalte und damit deren Heterogenität darzustellen, wurde mittels Mikrotensiometern die Saugspannung im Sediment gemessen.

Ein Mikrotensiometer besteht aus einer kleinen Keramikkerze (\varnothing 5 mm, Länge 50 mm, Porengröße $1\mu\text{m}$, Fa. KPM), die über ein abgeschlossenes hydraulisches System mit einer Drucksonde verbunden wird.

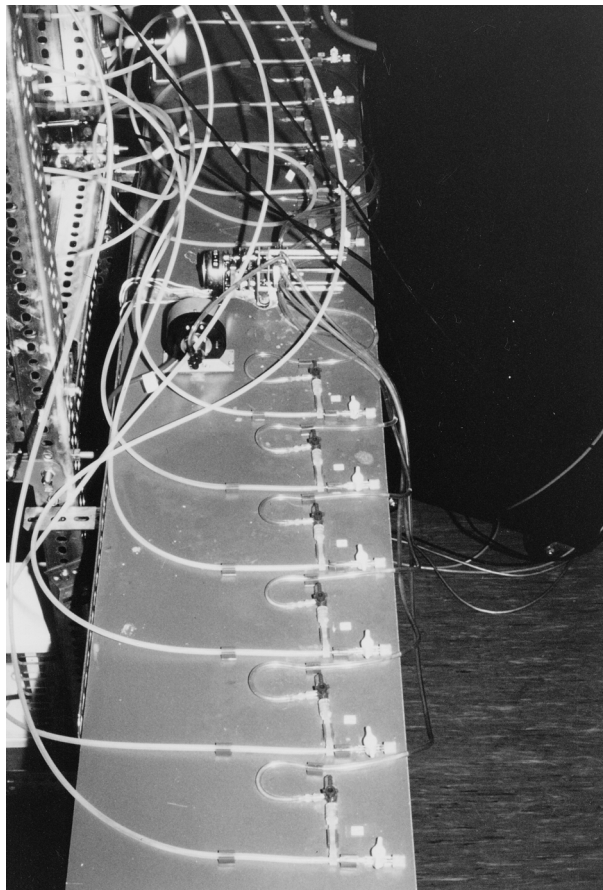


Abb. 11: Aufbau der Tensiometeranlage. In der Mitte der 12 Befüllungs- und Entlüftungsvorrichtungen befinden sich Drucksonde (schwarz) und Kanalschaltung.

Das abgeschlossene System aus Schläuchen und Sperrventilen (PVC, PE) wurde teilweise mit einem Innenschlauch versehen und über diesen vollständig mit entlüftetem und durch eine Keramikfilteranlage deionisiertem Wasser gefüllt.

Der Druck in der Keramikkerze des im Sediment horizontal eingebetteten Tensiometers wird durch die Potentialtheorie beschrieben (siehe auch Kap. 2.3.5), wobei versuchsbedingt Auflast- und osmotisches Potential vernachlässigbar waren.

Gemessen wurde mit Edelstahl-Differenzdruckaufnehmern sehr hoher Linearität, die in der Nähe der Tensiometer positioniert wurden. Da der Versuchsbehälter sowie eine Seite der Druckaufnehmermembran mit dem umgebenden atmosphärischen Druck belastet wurden, kann das Gaspotential ebenfalls eliminiert werden.

Der Wasserdruck im ansonsten abgeschlossenen Tensiometersystem gleicht sich bei ungesättigten Verhältnissen asymptotisch durch geringen Wasseraustausch über die Keramikkerze an die Saugspannung des umgebenden Sedimentes an. Der Druck in der Keramikkerze entspricht dem umgebenden Matrixpotential ψ_m . Vorversuche ergaben, daß bei konstanter Saugspannung der Meßwert bereits nach einer Minute stabil blieb. Im gesättigten Fall stellt sich der Druck in wenigen Sekunden auf das umgebende piezometrische Potential ψ_h ein. Mit der Drucksonde wird jedoch somit das hydraulische Potential ψ_H in seiner vereinfachten Form nach Gleichung (34) gemessen (siehe auch Kap. 2.3.5), wobei sich das enthaltene Gravitationspotential ψ_z nur bei gleicher Höhenlage von Kerze und Druckaufnehmer eliminieren läßt.

Das war jedoch nicht der Fall, da aus Qualitäts- und Kostengründen je ein guter Druckaufnehmer über eine vorgeschaltete hydraulische Kanalumschaltung nacheinander an bis zu zwölf Tensiometersonden unterschiedlicher Einbauhöhe angeschlossen wurde.

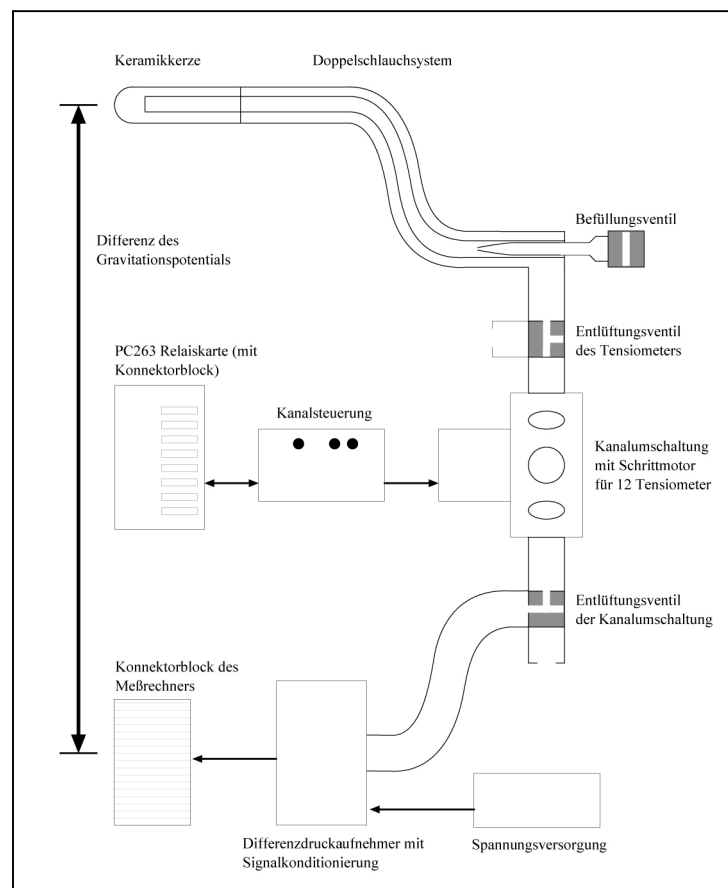


Abb. 12: Schema der Tensiometeranlage. Durch das Befüllungsventil und die Entlüftungsventile kann das Tensiometer mittels einer Spritze frei von Luftblasen gefüllt werden. Die Kanalumschaltung wechselt zwischen 12 Tensiometern. Das gravimetrische Potential zwischen Keramikkerze und Drucksonde muss bei der Kalibrierung berücksichtigt werden.

Das hydraulische System bestand somit aus zwölf Tensiometersystemen an einer schrittmotorgesteuerten Kanalumschaltung (Switch wafer W1260/1P-12T, Scanivalve Corp.), deren Ausgang über einen kurzen PE-Schlauch mit einem Differenzdruckaufnehmer (Setra 204D) mit integrierter Signalkonditionierung verbunden wurde. Alternativ wurde auch eine Miniaturdrucksonde (XTC) mit externer Signalkonditionierung eingesetzt, da diese direkt in einen Schlauch und auf den Kanalumschalter gesetzt werden konnte. Bei Schaltvorgängen war hierbei das Druckschwankungen unterliegende Wasservolumen zwischen Umschalter und Drucksonde sehr gering und somit Druckausgleich sowie mögliche Taktrate schneller.

Das elektronische System bestand aus Meßkreis, Signalkonditionierung und einem differentiellen Signalkreis (Setra 204D: $\pm 689,4$ hPa, $\pm 2,5$ V). Die 12-Bit-A/D-Wandlung mit ± 1 V entsprach ± 275 hPa. Weiterhin war eine synchrone Steuerung der Kanalumschaltung notwendig. Dazu wurde der Schrittmotor an eine Schrittsteuerung angeschlossen (Solenoid-Controller CTCR 10P/S2-S6, Scanivalve Corp.). Diese Steuereinheit kann manuell oder über zwei Steuerkreise (für „step“ und „home run“) betrieben werden. Dies wurde folgendermaßen realisiert:

- Für jeden Steuerkreis wurde jeweils ein Bit eines ME 30-2 I/O-Ports mit einer Transistorschaltung verstärkt. Für das „step“- Signal wurde Bit 0 für 0,1 s auf 1 gesetzt, entsprechend bei „home run“ Bit 1 für 0,5 s auf 1.
- Bei Anlagen, die mit Reed-Relais-Karten (siehe auch Kap. 3.3.1) ausgestattet waren, konnten die Steuerkreise mit jeweils einem Relais kurz gegen die Masse der Steuereinheit geschlossen werden.

So konnte ein optimierter Ablauf von Messen, Umschalten und Warten gewährleistet werden. Kalibriert wurde mit Wassersäulen über den gesamten zu erwartenden Meßbereich (z.B. ± 150 cmWS). Dabei erwiesen sich die Drucksonden als sehr genau, im linearen Bereich genauer als 0,1 hPa, jedoch mußten je nach Tensiometer-Einbauhöhe Korrekturen (0 bis 2 hPa) eingerechnet werden. Der absolute System-Meßfehler entspricht im ungesättigten Bereich mit 0,8 hPa (bei -80 hPa) nicht mehr der Qualität der Drucksonde, welche lediglich in der Nähe des Nullpunktes ein Umschwingen der Edelmembran zeigt. Deshalb wurde die Kalibrierung in Form von drei linearen Funktionsbereichen (siehe Anhang Abb. A2) für den Druckaufnehmer sowie einer Tabelle für gravimetrische Einbauhöhen und Korrekturwerten in das Meßprogramm eingegeben. Die Daten konnten somit in cmWS oder hPa umgerechnet werden.

Weiterhin mußten die Tensiometer überwacht werden und gegebenenfalls während des Versuches nachbefüllt werden.

3.3.6 Temperaturmessung

Da die Eigenschaften von Wasser (siehe auch Kap. 2.3.1) und der elektrischen Leitfähigkeit von Lösungen (siehe auch Kap. 2.4) temperaturabhängig sind, ist die ständige Überwachung der Temperaturverhältnisse unbedingt notwendig. Für die unterschiedlichen Meßpunkte konnten unterschiedliche Sonden eingesetzt werden: Im Sediment wurden Sonden mit möglichst geringem Volumen eingesetzt (\varnothing 3 mm, Länge 30 mm und 200 mm), für Lufttemperatur und Messungen in Wasserbehältern wurden auch größere Sonden (\varnothing 5 mm, Länge 300 mm) eingesetzt.

Für die Anforderungen an die Temperaturmessung wurden drei Konzepte realisiert, die einheitlich mit wasserdichten und korrosionsfesten Pt100 Sonden unterschiedlicher Größe (Fa. TMG, Fa. Linseis) bestückt wurden. Die Sonden konnten wahlweise über einen 2-Leiter- oder 4-Leiter-Meßkreis mit einem RTD-Signalkonditionierungs-Modul verbunden werden, das über einen Spannungssignalkreis differentiell mit den 12-Bit-A/D-Wandlern der Meßkarte verbunden war. Dadurch konnten Sonden unterschiedlichster Größe ohne Aufwand und weitgehend störungsfrei eingesetzt werden:

- Das einfachste Konzept setzt sich aus einer beliebigen 2-Leiter-geschalteten Pt100 Sonde und einem einzelnen RTD-Modul (Fa. TMG) mit eigener 24V-Versorgung zusammen. Der Signalkreis wird über ein 0-10 V Spannungssignal für den Meßbereich 0 - 100 °C aufgebaut. Dadurch läßt sich eine Meßanlage sehr kostengünstig nachträglich erweitern und die relative Positionierung der Sonden unterliegt keinem Kabellängenproblem. Die Meßgenauigkeit liegt bei 0,1 °C.
- Das hochwertigere Konzept besteht aus 4-Leiter-Meßkreisen, die jeweils über ein mit Optokopplern bestücktem RTD-Modul (Acrowag A5B34) zu einem galvanisch entkoppelten 0 – 5 V Signalkreis konditioniert werden. Weiterhin sind diese Module als Einsteckmodule auf einem zentralen Modulträgerboard (Acrowag APB01) mit einer einzigen hochstabilen Spannungsversorgung

ausgestattet. Dieses System ist praktikabel, wenn vier bis sechzehn hochwertige Module, auch unterschiedlicher Bauart (z.B. für Steuerkreise), gleichzeitig verwendet werden. Der umfangreiche Meßbereich von etwa -50 bis $+200$ °C wurde nicht vollständig benötigt, daher mußten die 12 Bit der A/D-Wandlung möglichst den zu messenden Bereich abbilden. In Verbindung mit der Meßkarte ME 30-2, die hardwareseitig auf $+1$ V eingestellt war, wurden Spannungsteiler vorgeschaltet, so daß nur der Bereich -45 bis $+55$ °C differentiell abgegriffen wurde. Während auch bei diesem System die absolute Langzeitmeßgenauigkeit sowie die Lufttemperaturmessung bei $0,1$ °C lagen, konnte jedoch die relative Änderung von Wassertemperaturen (z.B. Tagesverläufe) mit einer Genauigkeit von $0,02$ °C erfaßt werden.

- Ein drittes Konzept basiert auf einer einzigen Signalkonditionierung, an die bis zu sechzehn Pt100-Sonden nacheinander über programmierbare Relais (siehe auch Kap. 3.3.1) in den Meßkreis geschaltet werden. Trotz des Kostenvorteils wurde diese Anlage nur zu speziellen Fragestellungen eingesetzt, da weder schnelle kontinuierliche Meßreihen noch zeitgleiche Temperaturverteilungen erzeugt werden. Da die Temperaturveränderung im Boden jedoch in der Regel langsam verläuft, reichen wenige Meßwerte (z.B. fünf Meßwerte pro Stunde je Sonde) aus. Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der Belegung von nur 2 A/D-Wandlern der Meßkarte.

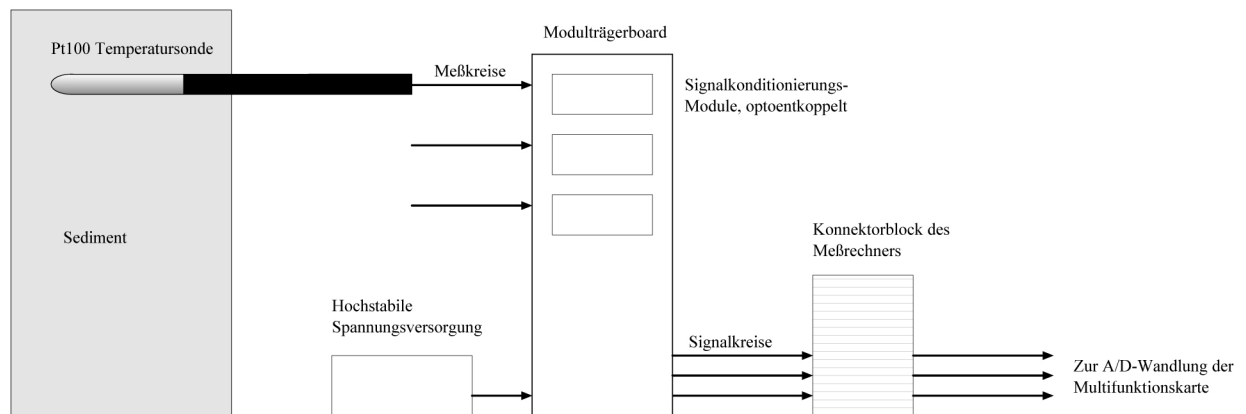


Abb. 13: Aufbau der Temperaturmessung. Jede Pt100-Temperatursonde ist mit einer eigenen optoentkoppelten Signalkonditionierung ausgestattet und besetzt jeweils einen A/D-Wandler der Multifunktionskarte.

Die Erstkalibrierung der jeweiligen Meßsonden erfolgte über sechs Präzisions-Quecksilberthermometer, die jeweils auf 44 cm Länge einen Bereich von 10 °C mit einer Genauigkeit von $0,01$ °C anzeigten. In einem wärmeisolierten Thermobehälter wurden unter Zuhilfenahme eines Induktionsrührers konstante Temperaturen erzeugt. Diese wurden gleichzeitig mit dem Präzisionsthermometer (in °C) und der Meßanlage (in Digits) bestimmt. Die Korrelation konnte mit dem Auswertungsprogramm Xact anhand einer linearen Regression zur Datenausgabe in °C in das Meßprogramm eingegeben werden.

Während der Versuchsdurchführung wurden ebenfalls Quecksilberthermometer zur Nachkontrolle beziehungsweise Nachkalibrierung eingesetzt.

Die Meßgenauigkeit lag, bezogen auf relativem Nullpunkt und Relativmessung, unterhalb von $0,04$ °C. Die Langzeitstabilität war jedoch durch Raumtemperaturschwankungen und Kontaktwiderstände eingeschränkt und mußte gegebenenfalls nachkalibriert werden. Unabhängig davon war eine Abweichung der Linearität der Sonden nicht nachweisbar.

3.3.7 Elektrische Leitfähigkeit

Um nicht nur hydraulische Veränderungen aufzuzeichnen, sondern auch Massebewegungen, wurde alternierend mit deionisiertem Wasser und NaCl-Lösung bewässert. Zur Messung der heterogenen Verteilung von Ionen wurde ein System zur Erfassung der elektrischen Leitfähigkeit konzipiert.

An einen Wechselspannungsmodulator/Demodulator (Fa. Pero) wurden nacheinander über Reed-Relais-Karten (siehe auch Kap. 3.3.1) bis zu sechzehn kleine Leitfähigkeits-Sonden (LF-Sonden, Fa. Pero) mit Edelstahlstiften (Abstand 1 cm) geschaltet. Dieser Meßkreis zeigte bereits wenige Sekunden nach dem Schaltvorgang ein stabiles Signal, es konnte also innerhalb weniger Minuten ein kompletter Umlauf gemessen werden.

Der Signalkreis wurde mit 0 - 10 V für einen hardwareseitig einstellbaren Leitfähigkeitsbereich (z.B. 20 - 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) konditioniert und vollständig mit 12 Bit digitalisiert. Für die Temperaturkompensation wurden Pt100-Sonden (siehe auch Kap. 3.3.6) verwendet.

Die Kalibrierung erfolgte unter Einsatz von verschiedenen NaCl-Lösungen unter Zuhilfenahme von Quecksilberthermometern und eines kalibrierten Leitfähigkeitsmeßgerätes (LF535, Fa. WTW). Zunächst wurde bei konstanter Temperatur (19 °C) für jede Sonde eine doppelt logarithmische Funktion bestimmt. Als nächstes wurden Lösungen bei verschiedenen Temperaturen gemessen. Dann wurde im Meßprogramm die Temperaturkompensation für NaCl mittels einer weiteren Funktion (+2,5 % für +1 °C) eingebunden, die Werte konnten dann in $\mu\text{S}/\text{cm}$ abgespeichert werden.

Nach längeren Versuchsreihen wurde die Anlage nachkalibriert. Bei hohen Leitfähigkeiten ergaben sich Abweichungen des Absolutwertes bis zu 8 %. Für sehr geringe Leitfähigkeiten (0 - 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$) wurden Abweichungen von etwa 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ festgestellt. Da vor allem relative Werte in logarithmischer Skala und zeitliche Abläufe im Vordergrund standen, konnten diese Meßfehler toleriert werden.

Eine Sonderform stellte die Installation einer Durchflußzelle dar. In einem kleinen Plastikbehälter mit Zu- und Ablauf wurden eine LF-Sonde und eine Pt100-Sonde eingebaut und der Abflußmessung vorgeschaltet. Hier war es jederzeit möglich, die Meßgenauigkeit direkt zu überprüfen und gegebenenfalls nachzukalibrieren.

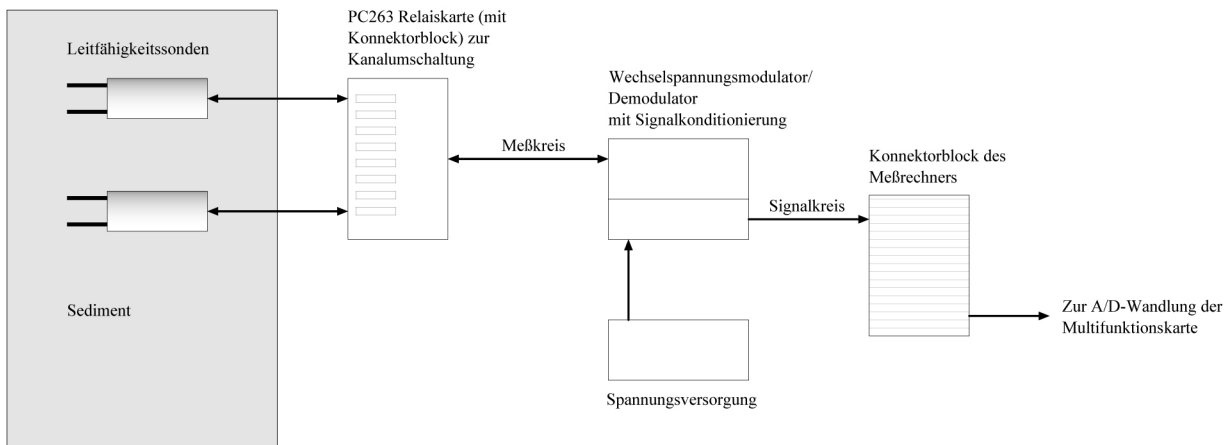


Abb. 14: Aufbau der LF-Messung. Bis zu 16 LF-Sonden können nacheinander über die vorhandenen 32 Relais auf den Meßkreis geschaltet werden. Dadurch werden nur ein Modulator und ein A/D-Wandler benötigt.

4. Verwendete Materialien

Bei den durchgeführten Laborversuchen waren besondere Ansprüche an die verwendeten Materialien gestellt:

- Da jedes Material mehrfach verwendet wurde, sollte es variationsfrei in ausreichender Menge zur Verfügung stehen.
- Um Heterogenitäten von hydraulischen Zuständen und dem Wassermassentransport zu untersuchen, sollte das Sediment selbst eine homogene Kornmatrix besitzen.
- Die Auswahl der Materialien sollte möglichst verschiedenartige Körngrößenverteilungen berücksichtigen.

4.1 Auswahl der Materialien

In sechs Versuchsreihen wurden insgesamt neun verschiedene Materialien (siehe Tab. 3) verwendet. Es handelt sich ausnahmslos um homogenisierte und im Labor verdichtete Materialien. Der Einbau in Probenzylinder, Säulen und Tanks erfolgte stets nach dem gleichen Verfahren: Das Sediment wurde in dünnen Lagen aufgebracht und etwa alle 2 bis 3 cm Füllhöhe mit einem Eisenstempel verdichtet.

Tab. 3: Übersicht der verwendeten Materialien und Versuchszuordnung. Im Text verwendete Kennung und Bezeichnung, die Zahl hinter Industriesiebungen entspricht der Maschenweite bei der Gewinnung. Haupt- und Nebenbestandteile: Qz = Quarz, Fs = Feldspäte, Ca = Karbonate, Kr = Kristalline Gerölle, Sk = Schichtsilikate. Zuordnung der Materialien zu den Versuchsreihen V1 bis V6.

Materialien								
Kennung	Bezeichnung	Bestandteile	Versuchsreihe					
Sediment			V1	V2	V3	V4	V5	V6
A	Sand/Schluff	Qz, Fs, Ca, Sk	V1	V2-1				V6-1
B	Industriequarzsand 0.1	Qz, Fs, Sk		V2-2	V3-1	V4-3	V5-3	V6-2
C	Industriequarzsand 0.6	Qz, Fs			V3-2			
D	Sandiger Kies	Ca, Kr, Qz, Fs			V3-3			
E	Kiesig schluffiger Sand	Qz, Ca, Fs, Sk			V3-4			
F	Industriequarzsand 1.0	Qz, Fs					V5-2	
G	Industriequarzkies 2.0	Qz, Fs				V4-2	V5-1	
H	Grobsandiger Kies	Ca, Kr				V4-1	V5-4	
K	Glaskugeln 1mm	Qz				V4-4	V5-5	

Es kamen vier Gruppen von Materialien zum Einsatz:

- Vorgesiebte Industriequarzsande und Kiese mit den Siebrückstandsquerschnitten von 0.1, 0.6, 1.0, 2.0 mm (Kennung: B, C, F, G). Diese Sedimente besitzen jeweils eine einheitliche Kornmatrix mit guter Sortierung und implementierten daher nicht schon vorweg sichtbare Inhomogenitäten.
- Naturbelassene Kiese aus Kiesgruben mit breiterer Kornverteilung (Kennung D, H). Diese Schotterablagerungen bestehen aus gerundeten Fragmenten alpiner Formationen, vorwiegend Karbonatgesteine, untergeordnet Kristallin. Diese Sedimente mußten vor jedem Versuchseinbau durch mehrfaches Umwälzen homogenisiert werden.
- Sehr schlecht sortierte (nach FÜCHTBAUER 1988) naturbelassene Sedimente mit Schluff-, Sand- und Kiesanteilen (Kennung A, E). Diese Sedimente wurden ebenfalls homogenisiert und hatten leicht bindige Eigenschaften. Sie wurden für vergleichende hydraulische Versuche eingesetzt.

- Als künstliches Sediment wurden Glaskugeln ($d = 1 \text{ mm}$) verwendet, die dem mathematischen Modell des Äquivalentkorndurchmessers entsprechen (Kennung: K).

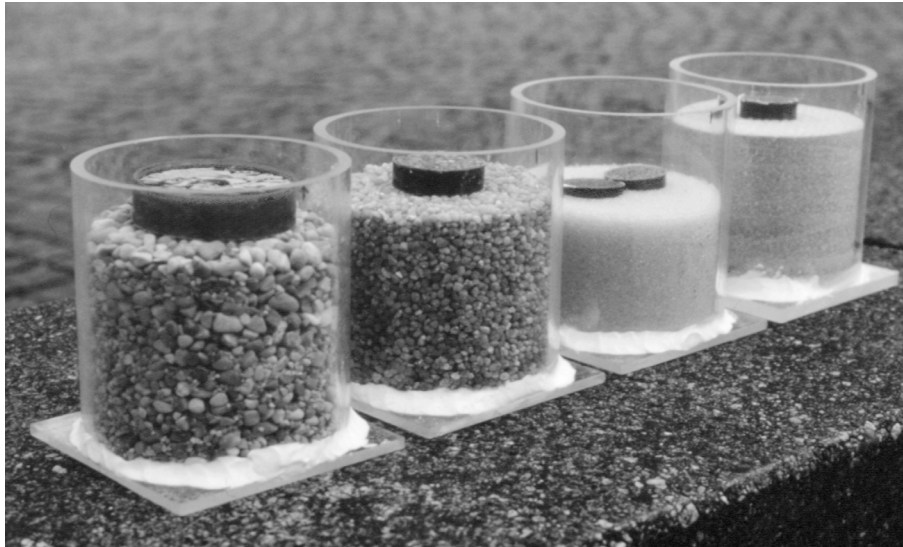


Abb. 15: Proben der Versuchsreihe V4. Von links nach rechts: Grobsandiger Kies (H), Industriequarzkies (G), Glaskugeln (K), Industriequarzsand (B). Auf den verdichteten Proben liegen mit Kunstharz fixierte Proben des gleichen Sedimentes zu vergleichenden Messungen (siehe auch Kap. 6).

4.2 Bodenparameter

Von allen Sedimenten wurden vor jeder Versuchsreihe die Korngrößenverteilungen (siehe Abb. 16), wie in Kap. 3.1.1 beschrieben, bestimmt und benannt. Zur Kontrolle wurde die Siebung beziehungsweise Aräometermessung mindestens einmal wiederholt. Aus der Summenkurve wurden Quartilen und Percentilen entnommen und nach Gleichung (5) der Ungleichförmigkeitsgrad berechnet (Tab. 5):

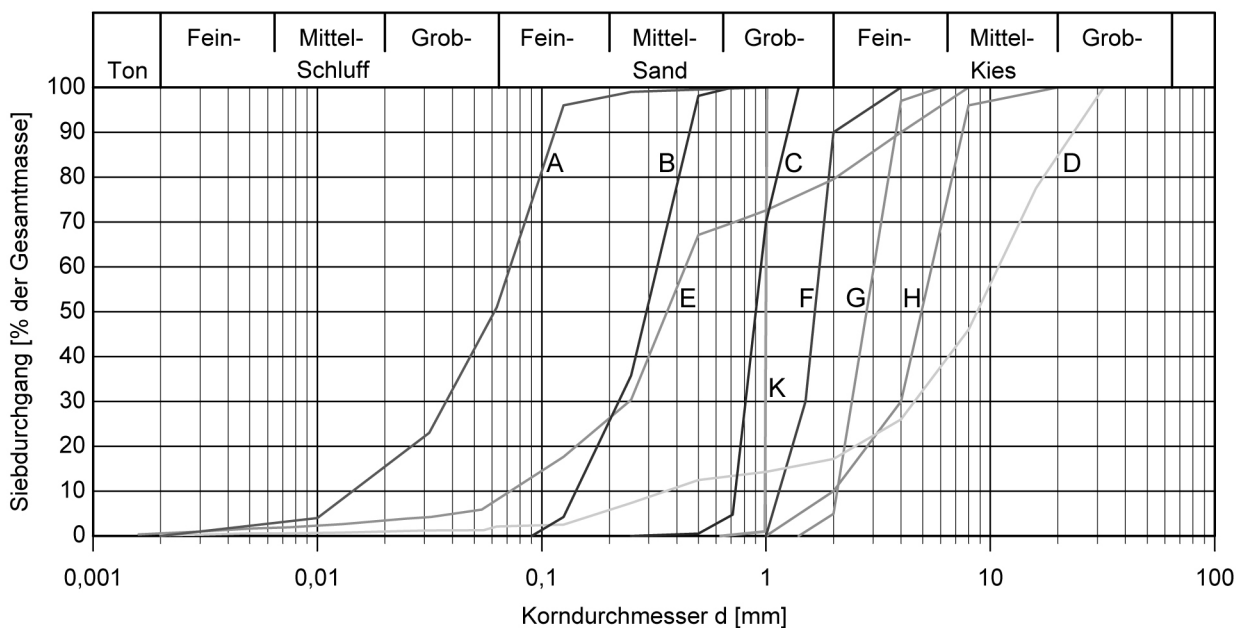


Abb. 16: Siebdurchgangskurven der verwendeten Materialien. Einteilung der Korndurchmesser nach DIN 4022-1, Kennung A-K siehe Tab. 3. Die Kurven entsprechen jeweils den Mittelwerten einer Versuchsreihe.

Die schlecht sortierten Sedimente (A, E) wurden als ungleichförmig, Probe D als sehr ungleichförmig eingestuft. Die übrigen (B, C, F, G) wurden als gleichförmig bestimmt. Bei Probe K (Glaskugeln) erübrigt sich die Einstufung der sehr guten Sortierung, da lediglich ein sehr geringer Teil der Kugeln durch mechanische Beanspruchung beschädigt war und somit keine Abweichungen vom Durchmesser ($d = 1\text{mm}$) festgestellt werden konnte. Keine der Proben enthielt einen nennenswerten Tonanteil, er lag stets unter 1%.

Tab. 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung. Im Text verwendete Kennung und Bezeichnung, die Zahl hinter Industriesiebungen entspricht der Maschenweite bei der Gewinnung. Percentilen aus der Korngrößenverteilung nach DIN 4022-1. Kornklasseneinteilung nach DIN 4023 und Kornkennziffer CUSG (PRINZ, 1997).

Bestimmung der Korngrößenverteilung							
Kennung	Bezeichnung	Percentilen				Korngrößenklassen	
		d_{10} [mm]	d_{25} [mm]	d_{60} [mm]	d_{75} [mm]	CUSG	DIN 4023
A	Sand/Schluff	0.013	0.032	0.071	0.09	0 5 5 0	U, fS, ms
B	Industriequarzsand 0.1	0.15	0.2	0.35	0.39	0 0 10 0	mS, fs
C	Industriequarzsand 0.6	0.74	0.8	0.95	1.1	0 0 10 0	gS
D	Sandiger Kies	0.35	4.0	10.5	15	0 0 2 8	G, s
E	Kiesig schluffiger Sand	0.07	0.18	0.45	1.15	0 1 7 2	S, fg, u
F	Industriequarzsand 1.0	1.25	1.3	1.80	1.8	0 0 9 1	gS, fg
G	Industriequarzkies 2.0	2.1	2.45	2.7	3.2	0 0 0 10	fG, gs
H	Grobsandiger Kies	2.0	3.2	5.9	6.1	0 0 1 9	fG, mg, gs
K	Glaskugeln 1 mm	1.0	1.0	1.0	1.0	0 0 10 0	gS

Tab. 5: Auswertung der Korngrößenverteilung. Ungleichförmigkeit U nach DIN 1054 und Sortierungskoeffizient S_0 nach FÜCHTBAUER (1988).

Auswertung der Korngrößenverteilung					
Kennung	Bezeichnung	Ungleichförmigkeit		Sortierungsgrad	
		U [-]	Beurteilung	S_0 [-]	Beurteilung
A	Sand/Schluff	5.5	ungleichförmig	1.68	mittelmäßig sortiert
B	Industriequarzsand 0.1	2.3	gleichförmig	1.40	gut sortiert
C	Industriequarzsand 0.6	1.3	gleichförmig	1.17	sehr gut sortiert
D	Sandiger Kies	30	sehr ungleichförmig	1.94	schlecht sortiert
E	Kiesig schluffiger Sand	6.4	ungleichförmig	2.53	sehr schlecht sortiert
F	Industriequarzsand 1.0	1.4	gleichförmig	1.18	sehr gut sortiert
G	Industriequarzkies 2.0	1.3	gleichförmig	1.14	sehr gut sortiert
H	Grobsandiger Kies	2.9	gleichförmig	1.38	gut sortiert
K	Glaskugeln 1 mm	1.0	gleichförmig	1	sehr gut sortiert

Weiterhin wurde der Sortierungskoeffizient S_0 nach FÜCHTBAUER (1988: 57) berechnet und beurteilt, hierbei ergab sich eine breite Streuung der verwendeten Materialien von sehr gut sortiert bis sehr schlecht sortiert.

$$(57) \quad S_0 = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \quad [-], (d \text{ in mm})$$

Beurteilung: $S_0 < 1,23$ = sehr gut sortiert, 1,23-1,44=gut sortiert, 1,44-1,74 mittelmäßig sortiert, 1,74-2,0 schlecht sortiert, $> 2,0$ sehr schlecht sortiert.

Nach Kap 3.1.3 wurde mit Bestimmung der Porosität und der Trockendichte auch nach Gleichung (10) die Feststoffdichte ermittelt. Bei dem Ausbau von Tank- und Säulenversuchen wurden Porosität und Wassergehalt durch eine vertikale Beprobung bestimmt. Für alle Versuche wurde die Verdichtung D nach Gleichung (4) berechnet (Tab. 6). Alle angegebenen Meßwerte und Ergebnisse wurden gemittelt.

Tab. 6: Auswertung der Dichteverhältnisse: Im Text verwendete Kennung und Bezeichnung, Feststoffdichte ρ_s nach DIN 18124, Trockendichte (Einbaudichte) ρ_D , Porosität n , Verdichtung D nach DIN 19683-13/18126, Beurteilung nach DIN 1054. Alle Meßwerte wurden gemittelt.

Auswertung der Dichteverhältnisse						
Kennung	Bezeichnung	Dichte [g/cm^3]		n [-]	Verdichtung	
		ρ_s	ρ_D		D [-]	Beurteilung
A	Sand/Schluff	2.43	1.38	0.37	0.41	locker
B	Industriequarzsand 0.1	2.63	1.57	0.43	0.64	dicht
C	Industriequarzsand 0.6	2.62	1.60	0.38	0.70	dicht
D	Sandiger Kies	2.79	1.96	0.20	0.41	locker
E	Kiesig schluffiger Sand	2.80	1.86	0.36	0.45	mitteldicht
F	Industriequarzsand 1.0	2.64	1.59	0.41	0.72	dicht
G	Industriequarzkies 2.0	2.67	1.57	0.42	0.56	dicht
H	Grobsandiger Kies	2.75	1.78	0.36	0.64	dicht
K	Glaskugeln 1 mm	2.67	1.52	0.43	(0.71)	(dicht)

Weiterhin wurde aus der Percentile d_{10} der k_F -Wert nach HAZEN (1893) berechnet:

$$(58) \quad k_f = 0.0116 \cdot d_{10}^2 \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right], (d_{10} \text{ in mm}, T=10^\circ\text{C})$$

Die Formel ist aber nur zulässig bis zu einer Ungleichförmigkeit $U < 5$. Der Wertebereich reichte von $2,0 \text{ E-}6$ bis $1,2 \text{ E-}2$ (siehe Tab. 7) für Temperaturen von 10°C . Bei dem künstlichen Einbau unterliegen die k_F -Werte und der Porenraumanteil gewissen Schwankungen, die dann bei ungenauen Meßablesungen (z.B. Luftpyknometer) oder mit der Versuchsdauer (z.B. durch weitere Verdichtung) zu deutlichen Abweichungen von Einzelwerten führen. Daher mussten bei jedem Einzelversuch die Sedimentparameter neu bestimmt werden.

Tab. 7: Berechnung der Durchlässigkeit: k_f -Wert nach HAZEN (1893) aus gemittelten Meßwerten, bei Sediment D und E ist wegen der hohen Ungleichförmigkeit die Formel nach HAZEN nicht zulässig. für Sediment D wurde daher ein Standrohrversuch nach DIN 18130 durchgeführt. Ungleichförmigkeit U nach DIN 1054.

Bestimmung der Durchlässigkeit					
Kennung	Bezeichnung	Ungleichförmigkeit	k_f [m/s]		
			U [-]	Hazen	DIN 18130
A	Sand/Schluff	5.5	2.0 E-6		durchlässig
B	Industriequarzsand 0.1	2.3	2.6 E-4		stark durchlässig
C	Industriequarzsand 0.6	1.3	6.4 E-3		stark durchlässig
D	Sandiger Kies	30		1.4 E-3	stark durchlässig
E	Kiesig schluffiger Sand	6.4	5.7 E-5		durchlässig
F	Industriequarzsand 1.0	1.4	1.8 E-2		stark durchlässig
G	Industriequarzkies 2.0	1.3	5.1 E-2		stark durchlässig
H	Grobsandiger Kies	2.9	4.6 E-2		stark durchlässig
K	Glaskugeln 1 mm	1.0	1.2 E-2		stark durchlässig

5 Laborversuche zur Sedimenthydraulik

5.1 Heterogenität des Porenraums

Bei der Konzeption der Laborversuche sollten Heterogenitäten der Hydraulik und Wasserströmung in dynamischen Gleichgewichten untersucht werden. Im Gelände entstehen die größten Heterogenitäten durch Materialwechsel und tektonisch bedingte Wasserwegigkeiten. Im Versuch sollte jedoch dieser Einfluß minimiert werden, daher wurden möglichst homogene Sedimentkörper mit konstanter Lagerungsdichte und Korngrößenverteilung eingebaut.

Durch die vertikale Matrix von Tensiometern wurde das hydraulische Potential von fünf Sedimenten in verschiedenen Strömungsgleichgewichten zweidimensional gemessen. Bei der Erstbewässerung konnte zusätzlich die Bewässerungsfront beobachtet werden. Bei flächigen Beregnungen stellten sich sehr unregelmäßige Frontverläufe ein, die auf feinste Strukturunterschiede im Porenraum zurückzuführen sind.

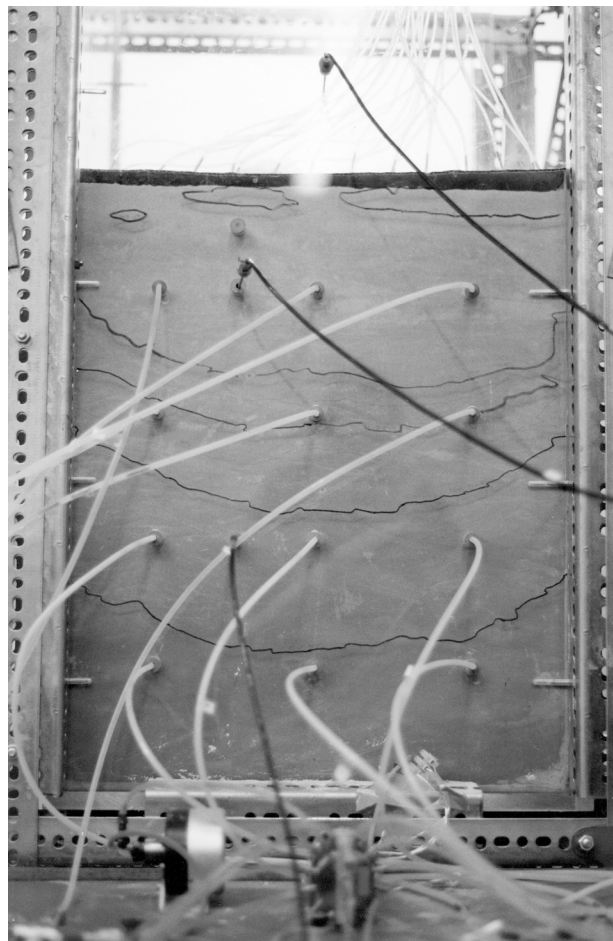


Abb. 17: Bewässerungsfront im Tankversuch. Versuchstank mit etwa 58 cm hoher Sedimentfüllung aus den Versuchsreihen V1 und V2. Zu erkennen ist der Einbau von 12 Mikrotensiometern (helle Schläuche) und drei Temperaturfühlern (dunkle Kabel) sowie eine Beregnungsanlage mit 48 punktuellen Beregnungspunkten.

Um ein Wachstum von Bakterien und Algen zu unterbinden, wurde direkte Sonneneinstrahlung vermieden und deionisiertes Wasser verwendet. In Langzeit-Vorversuchen (1 Monat) konnte eine deutliche Veränderung der Viskosität des Bodenwassers durch schleimbildende Bakterien beobachtet werden, was auf einen geschlossenen Wasserkreislauf und Ionenfracht zurückzuführen war.

Die vertikale und horizontale Massenbewegung wurde durch die Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei gleichzeitiger Eingabe des konservativen Tracers NaCl beobachtet.

5.2 Hydraulik der ungesättigten Zone

Mit hydraulischen Messungen sind Bestimmungen der Potentiale und Wassergehalte gemeint. Strömungsmessungen dagegen bestimmen die Geschwindigkeit von Massenbewegungen.

In 6 Tankversuchen mit 5 verschiedenen Sedimenten (siehe Tab. 8) wurden zur zweidimensionalen Bestimmung der Hydraulik folgende Parameter aufgezeichnet:

- Beregnung (Pumprate)
- Abfluß (Masse)
- Zeiterfassung
- Verteilung des hydraulischen Potentials
- Temperatur (Sediment, Umgebung)

Weiterhin wurde die Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit unter Verwendung des konservativen Tracers NaCl temperaturkompensiert gemessen (siehe auch Kapitel 5.3). Bei Kenntnis von Ionenkonzentration, Ionenart und Temperatur läßt sich der Wassergehalt berechnen.

Die Versuche zur Hydraulik von der Versuchsreihe V3 wurden in Zusammenarbeit mit T. ROSENBERG (1998) durchgeführt.

Tab. 8: Übersicht der Tankversuche. Die Beregnungsverluste entsprechen der Differenz in der Wasserbilanz während der Erstbewässerung und resultieren aus dem eingespeicherten Wassergehalt bei 55 cm Einbauhöhe sowie der Verdunstung. Die Gesamtdauer bezieht sich auf die Summe der Meßphasen. Die Beregnungsverluste von V3-1 konnten nicht genau ermittelt werden.

Materialien				
Kennung	Bezeichnung	Tankversuche		
		Versuchsreihen	Beregnungsverluste	Gesamtdauer
A	Sand/Schluff	V1, V2-1	196,8 l/m ²	515 h
B	Industriequarzsand 0.1	V2-2, V3-1	172,1 l/m ²	748 h
C	Industriequarzsand 0.6	V3-2	153,2 l/m ²	755 h
D	Sandiger Kies	V3-3	52,0 l/m ²	558 h
E	Kiesig schluffiger Sand	V3-4	146,4 l/m ²	500 h

5.2.1 Desorptionskurven

Zur Bestimmung der Wassergehalte aus Tensiometermessungen sind die Kenntnis des hydraulischen Zustandes (Sorption, Desorption) und die zugehörige PF-Kurve erforderlich.

Die mit Säulen bestimmten Desorptionskurven wurden mit Tensiometern (siehe Kapitel 3.2.1) gemessen, wobei sich zeigte, daß grobkörnige Sedimente nur sehr langsam ein Gleichgewicht zum Gravitationspotential ausbilden. Daher ist es unzulässig, bei diesen Sedimenten anzunehmen, daß das Matrixpotential dem Gravitationspotential betragsmäßig entspricht.

Nachdem die Säule zur Verhinderung von Gaseinschlüssen von unten aufgesättigt wurde, simulierte der Ausgleichsbehälter eine Grundwasseroberfläche an der Sedimentunterkante. Nach ein oder mehreren Tagen wurde das Sediment zügig ausgebaut und alle 5 cm der gravimetrische Wassergehalt bestimmt. Da während des Sedimentausbaus die Meßerfassung weiterlief, konnte gezeigt werden, daß die Saugspannung sich während der Ausbauphase nicht stark verändert (Abb. 18).

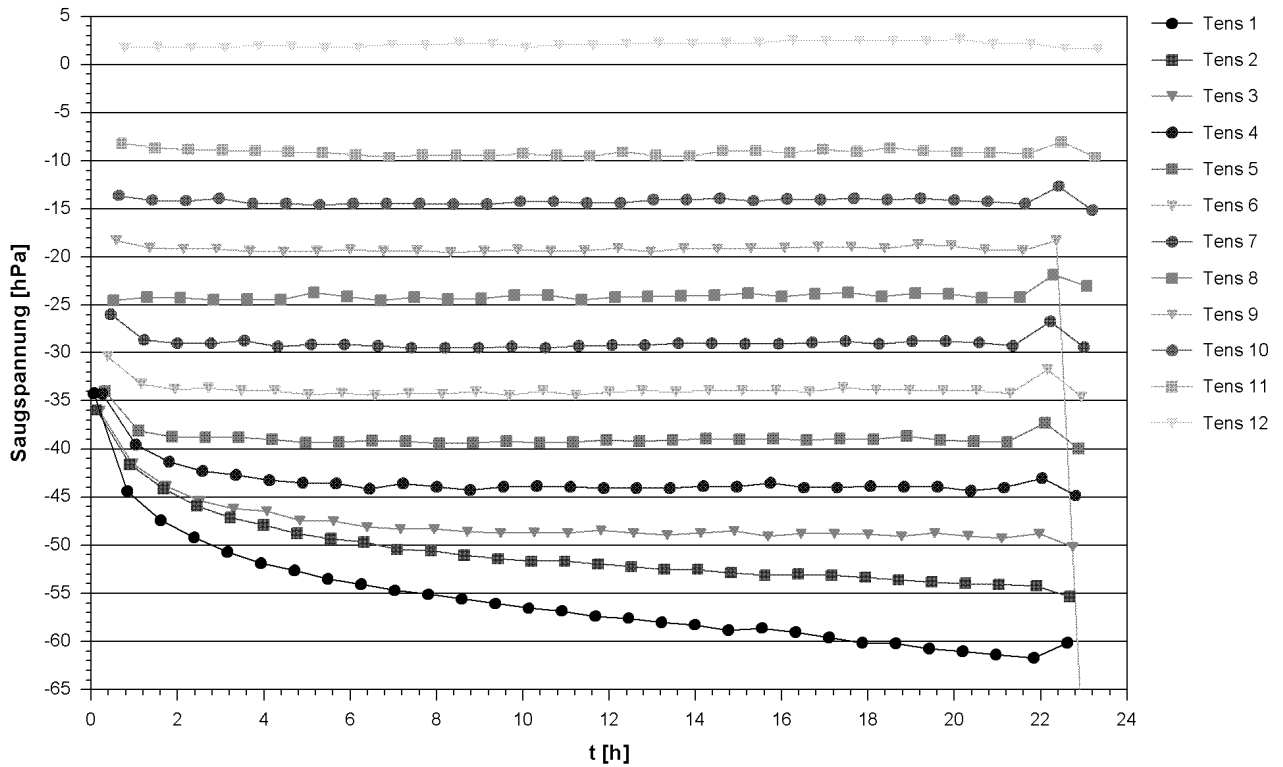


Abb. 18: Saugspannungsmessung zur Desorptionskurvenbestimmung von Material B. Nach Absenken der piezometrischen Höhe wurde die Saugspannung alle 5 cm gemessen bis sich eine möglichst große Spreizung der Werte einstellte. Dann erfolgte der Ausbau und die Wassergehaltsbestimmung.

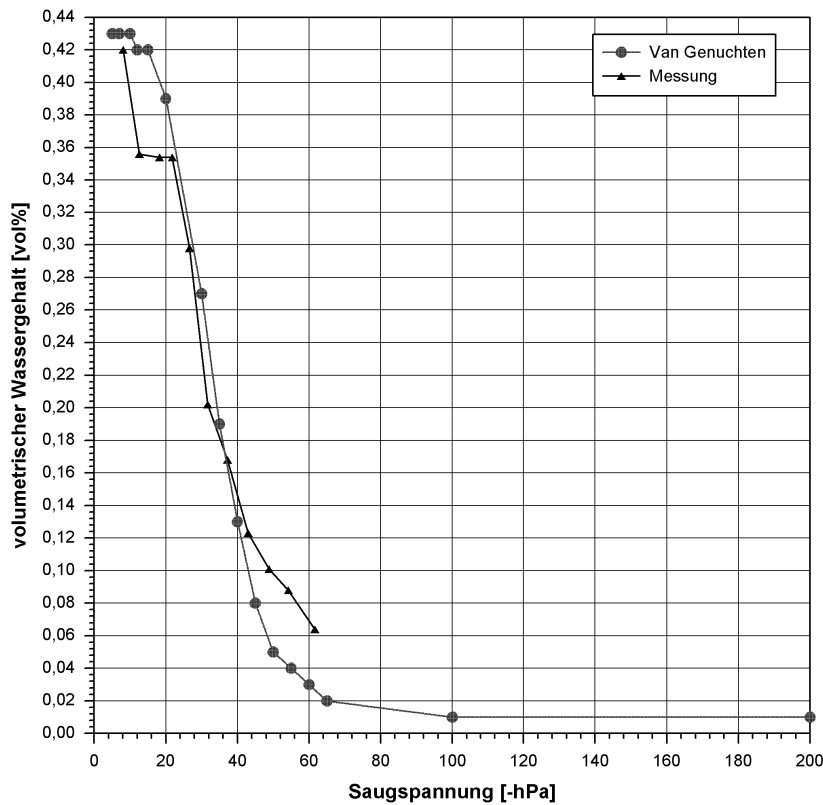


Abb. 19: Desorptionskurve aus Messungen von Material B. Vergleich der gemessenen pF-Kurve und einer numerischen Funktion nach Gleichung (40) von VAN GENUCHTEN (1980).

Bei den Desorptionsversuchen stellte es sich heraus, daß die Materialien zunächst sehr lange brauchen um sich dem Gravitationspotential anzunähern. Bei den Kiesen wurde dieser in Abb. 3 beschriebene Gleichgewichtszustand nicht erreicht. Weiterhin trat an der Oberfläche ein deutlicher Verdunstungseffekt auf (siehe Abb.18, Tensiometer 1).

Nach der Messung der Desorptionskurven aller Materialien wurden Funktionen bestimmt, die diese abbilden. Als numerische Näherung eignete sich die Funktion (40) von VAN GENUCHTEN, 1980 (siehe Abb. 19).

Da die Ergebnisse zur Umrechnung von Tensiometermessungen dienen, wurde für den relevanten Bereich des jeweiligen Sediments eine Funktion des Wassergehaltes in Abhängigkeit vom Matrixpotential definiert und durch eine Polynomregression nachgebildet (Abb. 20).

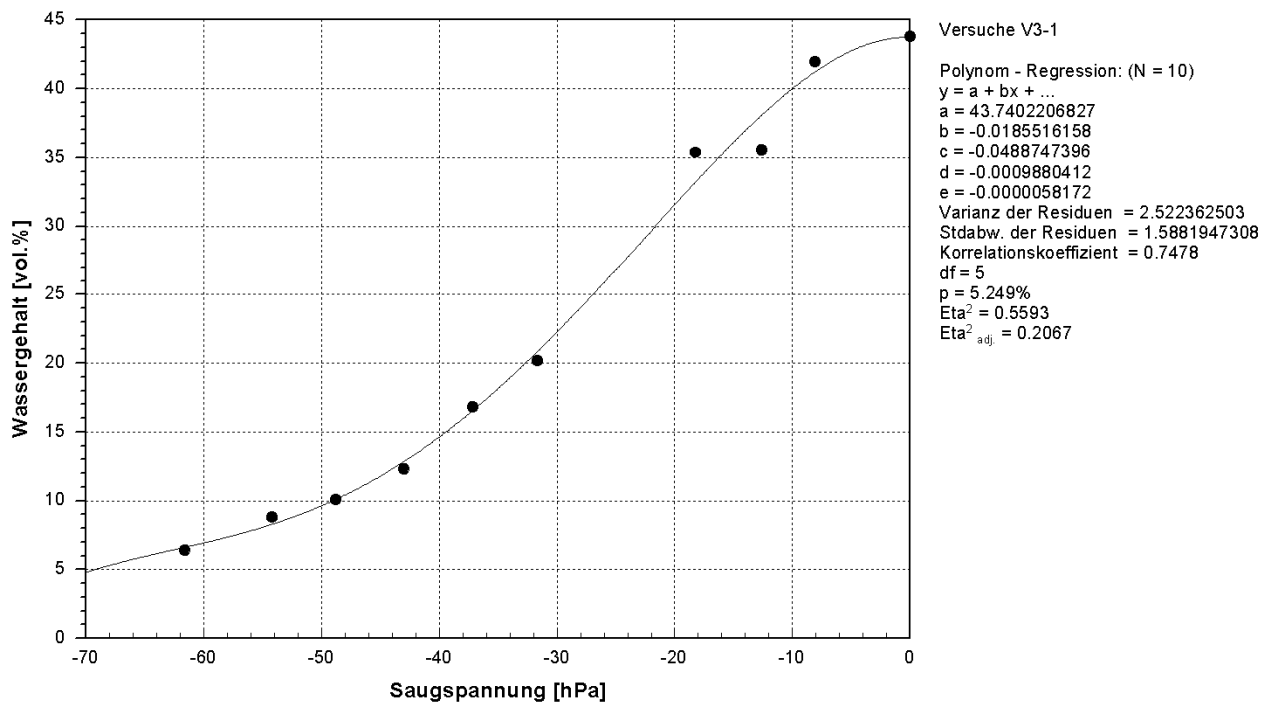


Abb. 20: Polynomregression der Desorptionskurve von Material B. Polynome bieten eine zeitsparende Alternative zur Abbildung von Desorptionskurven.

5.2.2 Tankversuche mit homogener Beregnung

Bei den Versuchsreihen V1 bis V3 wurden Tankversuche mit dem beschriebenen Versuchstank durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Beregnungsanlagen verwendet, wobei flächige Beregnungen zur Untersuchung von Heterogenitäten bei homogener Beregnung verwendet wurden. Im Gegensatz dazu dienten Versuche mit einer punktuellen Wasserzugabe der Beobachtung des hydraulischen Ausgleichs durch die Saugspannung (siehe auch Kap. 5.2.3). In Tabelle 9 sind alle Versuchsanordnungen der Tankversuche aufgelistet.

Tab. 9: Durchführung der Tankversuche. Art der Einspeicherung und Anordnung der Beregnungsanlage.

Versuchsdurchführung der Tankversuche				
Kennung	Bezeichnung	Anordnung		
		Versuchsreihen	Einspeicherung	Beregnungsart
A	Sand/Schluff	V1	Erstberegnung	48 Punkte
A	Sand/Schluff	V2-1	Erstberegnung	48 Punkte
B	Industriequarzsand 0.1	V2-2	Erstberegnung	48 Punkte
B	Industriequarzsand 0.1	V3-1 a	gering	1 Punkt
B	Industriequarzsand 0.1	V3-1 b	gering	Intervall-Sprühnebel
C	Industriequarzsand 0.6	V3-2 a	Erstberegnung	Intervall-Sprühnebel
C	Industriequarzsand 0.6	V3-2 b	gering	1 Punkt
D	Sandiger Kies	V3-3 a	Erstberegnung	Intervall-Sprühnebel
D	Sandiger Kies	V3-3 b	gering	1 Punkt
E	Kiesig schluffiger Sand	V3-4 a	Erstberegnung	Intervall-Sprühnebel

Dabei ist zwischen einem Versuch mit einer Erstberegnung und einem Versuch mit feuchtem Material zu unterscheiden. Bei der Erstberegnung erfolgt zunächst eine längere Einspeicherungsphase und ein langsames Voranschreiten der Benetzungsfront, während ein Sediment im gut durchfeuchteten Zustand sehr schnell hydraulisch reagiert und nur geringe Wassermassen ein- und ausspeichert.

Bei der Massenbilanz zwischen Beregnung und Abfluß ist nicht nur die Speicherung, sondern auch die Verdunstung relevant. Durch weitgehende Abdeckung von Wasser und Sedimentoberflächen wurde versucht, Verdunstungseffekte gering zu halten. Dennoch wurden für die Versuche der Versuchsreihen V1 und V2-1 im Mittel eine Verdunstung von 1 ml/min und für alle weiteren Versuche (wegen größerer Flächen) im Mittel 1,8 ml/min ermittelt.

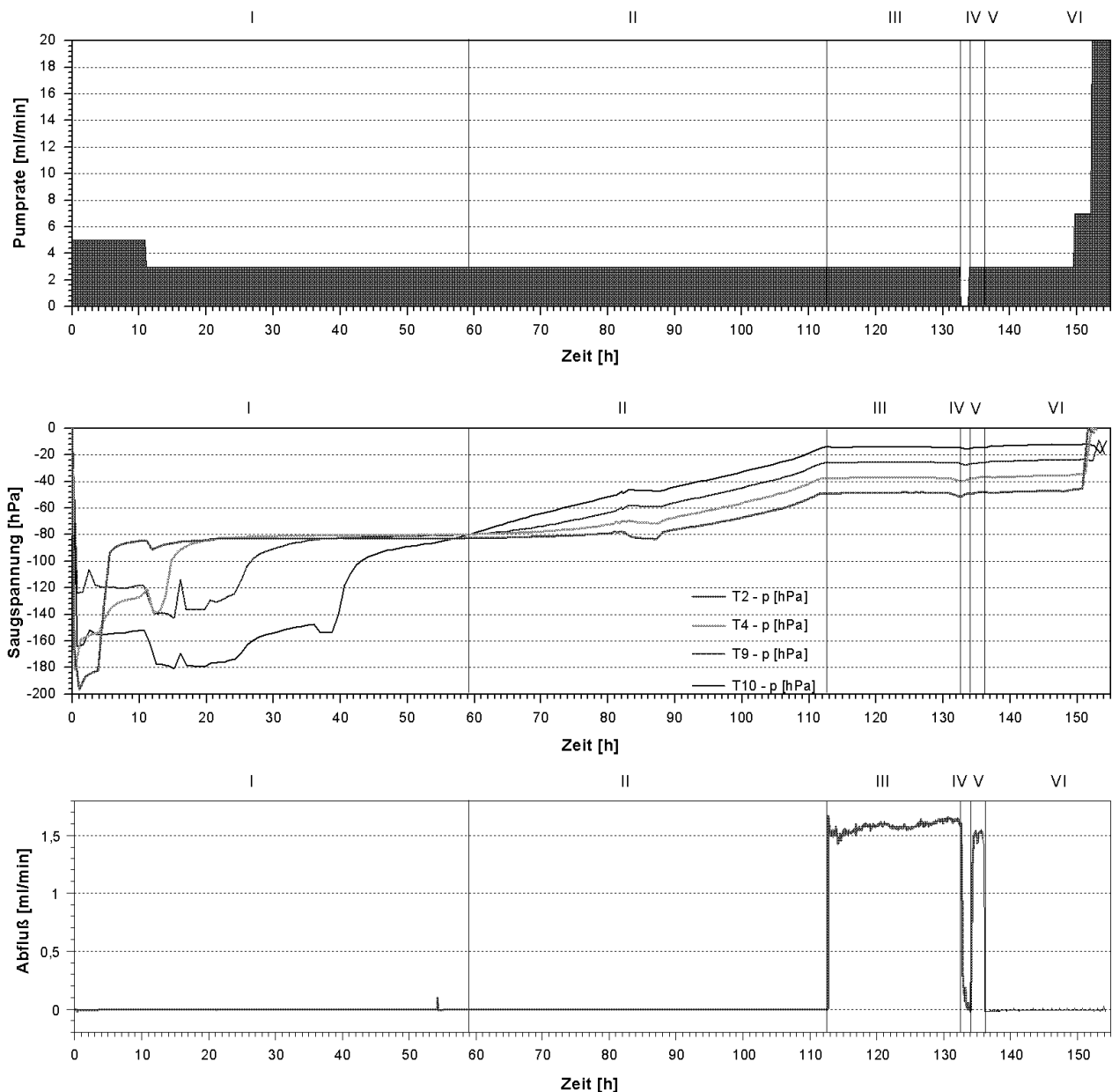


Abb. 21: Meßdaten des Tankversuches der Versuchsreihe VI-1 mit Sediment A. Phasen der Erstberegung eines schluffhaltigen Sedimentes: Fortschreiten der Bewässerungsfront (Phase I), Einspeicherung mit hydraulischem Ausgleich durch die Saugspannung und Umkehrung der Matrixpotentialgradienten (Phase II), Stabilisierung der Potentiale bei konstanter Beregnung und konstantem Abfluß (Phase III). In Phase III ist die Massendifferenz von etwa 1 ml/min zwischen Zufluß und Abfluß zu sehen.

Während einer Bewässerungsphase (Massenstrom unterhalb einer Aufstauung) finden vor allem im oberen Tankbereich deutliche Einspeicherungen statt. Die Wassergehalte liegen jedoch noch immer deutlich unter denen im unteren Tankbereich. Aus den geringeren Wassergehalten folgt, daß die Strömungsgeschwindigkeiten im oberen Bereich entsprechend höher sind als im unteren Bereich. Abbildung 22 zeigt diese Wassergehaltsunterschiede zwischen dem Strömungszustand und dem Gleichgewichtszustand.

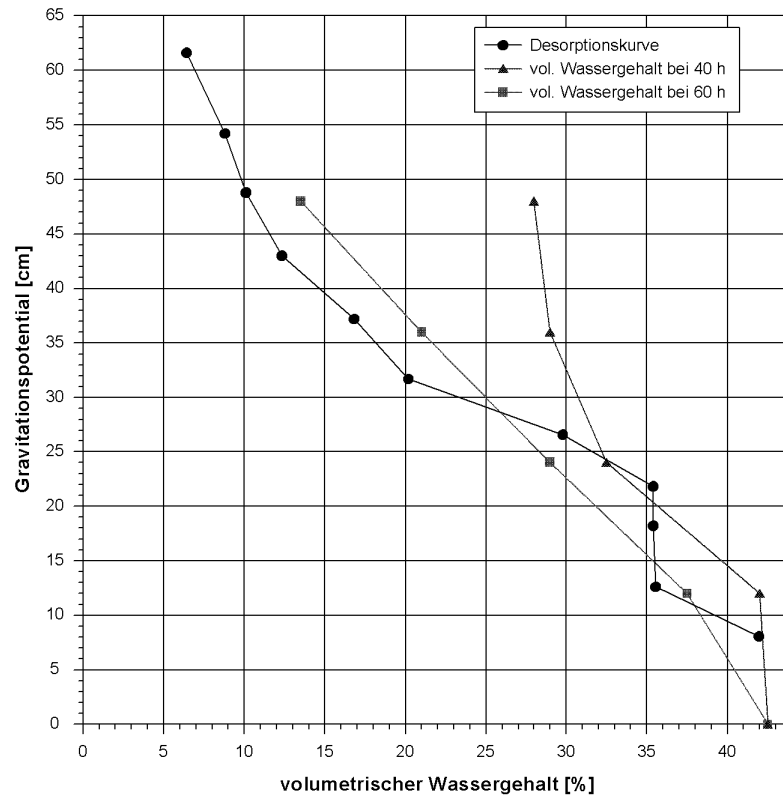


Abb. 22: Vergleich der Wassergehalte von Sediment B mit der Desorptionskurve. Der volumetrische Wassergehalt während der Beregnung (bei 40 h) zeigt deutlich erhöhte Werte, vor allem im oberen Tankbereich. In der darauf folgenden Entwässerungsphase (bei 60 h) findet eine Annäherung an die ermittelte Desorptionskurve statt.

In Relation zu Benetzungs- und Speichervorgängen (im Versuch 10-60 h) sind hydraulische Ausgleichsbewegungen im feuchten Sediment kurzzeitige Ausgleichsbewegungen (im Minutenbereich). Dabei kann man sich bei der vertikalen Massenbewegung im Tankversuch vorstellen, daß bei ausgeglichenem Potential ein hinzugefügtes Molekül in der obersten Schicht über den hydraulischen Kontakt sofort ein Molekül in der untersten Schicht verdrängt.

Weiterhin hatte die Abflußvorrichtung am Tankboden einen hydraulischen Widerstand, der hydraulisch im Bereich der Grundwasseroberfläche liegt.

5.2.3 Tankversuche mit heterogener Beregnung

Zur Charakterisierung der heterogenen Eigenschaften von Hydraulik und Massentransport wurden Versuche mit punktueller Beregnung durchgeführt. Diese ergaben, daß Sedimente mit deutlichen Schluffanteilen ein starkes Bestreben zum Potentialausgleich besitzen, während der Desorptionsphasen werden diese vollständig erreicht (Abb. 23). Ein Kies ohne Schluffanteil dagegen neigt während der Beregnung zum „fingering“, d.h. der Wassertransport findet hauptsächlich über einzelne Rinnsale durch Grobporen statt, weiterhin dauert der Potentialausgleich während der Desorption wegen zahlreicher kapillarer Abrisse im Porenraum wesentlich länger.

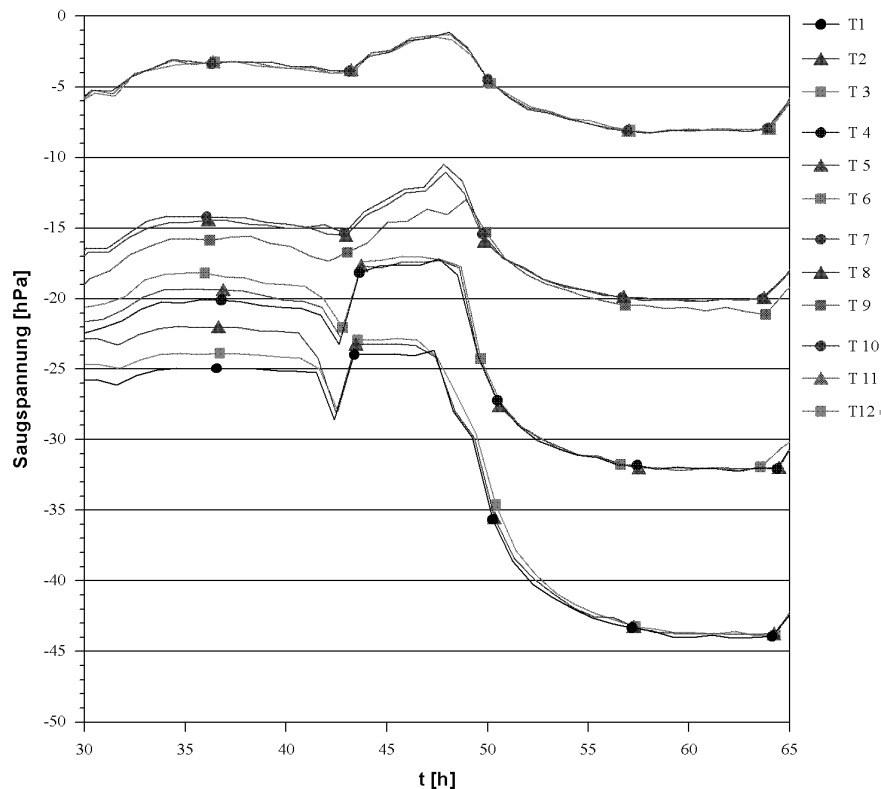


Abb. 23: Saugspannung der punktuellen Beregnung von Sediment B. Während der heterogenen Bewässerungsphase liegen die Tensiometerwerte in den einzelnen Meßebenen vor allem im oberen Tankbereich weit auseinander. In der darauf folgenden Desorptionsphase (ab 46 h) erfolgt ein vollständiger Potentialausgleich.

Über die ermittelten Polynomfunktionen konnten die Saugspannungen verschiedener hydraulischer Zustände in Wassergehalte umgerechnet werden und als zweidimensionale vertikale Verteilungen dargestellt werden. So konnten jeweils ein stationärer Strömungszustand (Abb. 24 a) und der Zustand des Potentialausgleichs gegen Ende der Desorptionsphase (Abb. 24 b) verglichen werden. Werden die Wassergehalte zweier aufeinander folgender stationärer Zustände subtrahiert, so erhält man die Ein- bzw. Ausspeicherung (Abb. 25).

Desweiteren aus den Potentialen aller punktuellen Beregnungsversuche die Potentialgradienten nach den Gleichungen (36) und (37) ermittelt (Abb. 26 b).

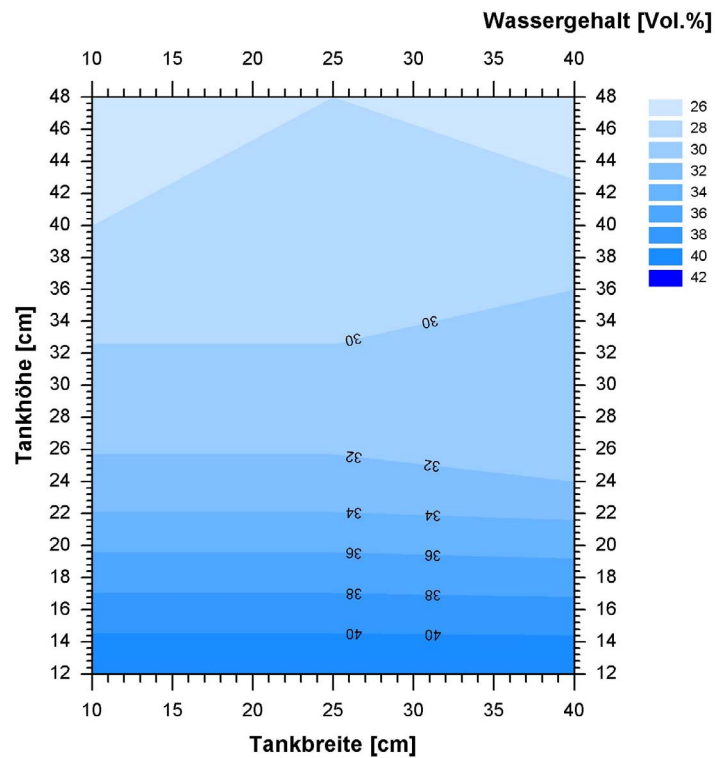


Abb. 24 a: Wassergehaltsverteilung von V3-1 bei 40 h: Vertikale Verteilung des volumetrischen Wassergehaltes von V3-1 (Sediment B) während der punktuellen Beregnungsphase bei 40 h.

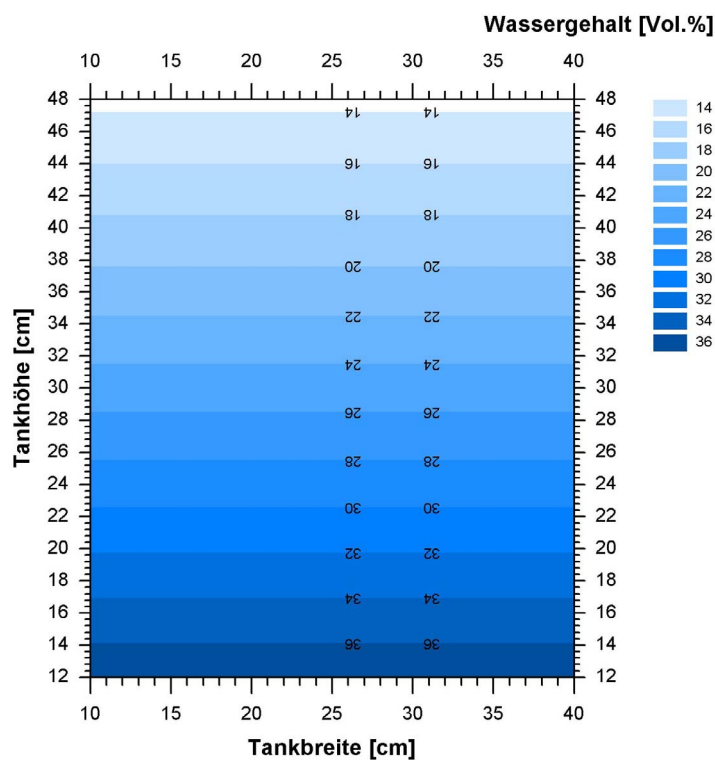


Abb. 24 b: Wassergehaltsverteilung von V3-1 bei 64 h: Vertikale Verteilung des volumetrischen Wassergehaltes von V3-1 (Sediment B) gegen Ende der Desorptionsphase bei 64 h.

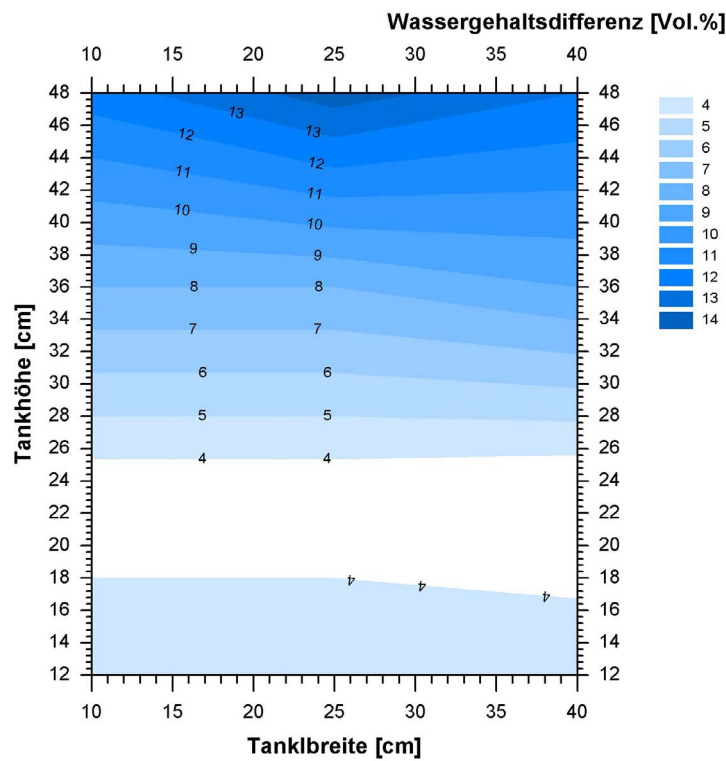


Abb. 25: Wassergehaltsdifferenz von V3-1 zwischen 40 h und 64 h: Vertikale Verteilung der volumetrischen Wassergehaltsdifferenz von V3-1 (Sediment B) gegen Ende der Desorptionsphase bei 64 h gegenüber einer punktuellen Beregnung, die 24 ml/(min m²) entspricht.

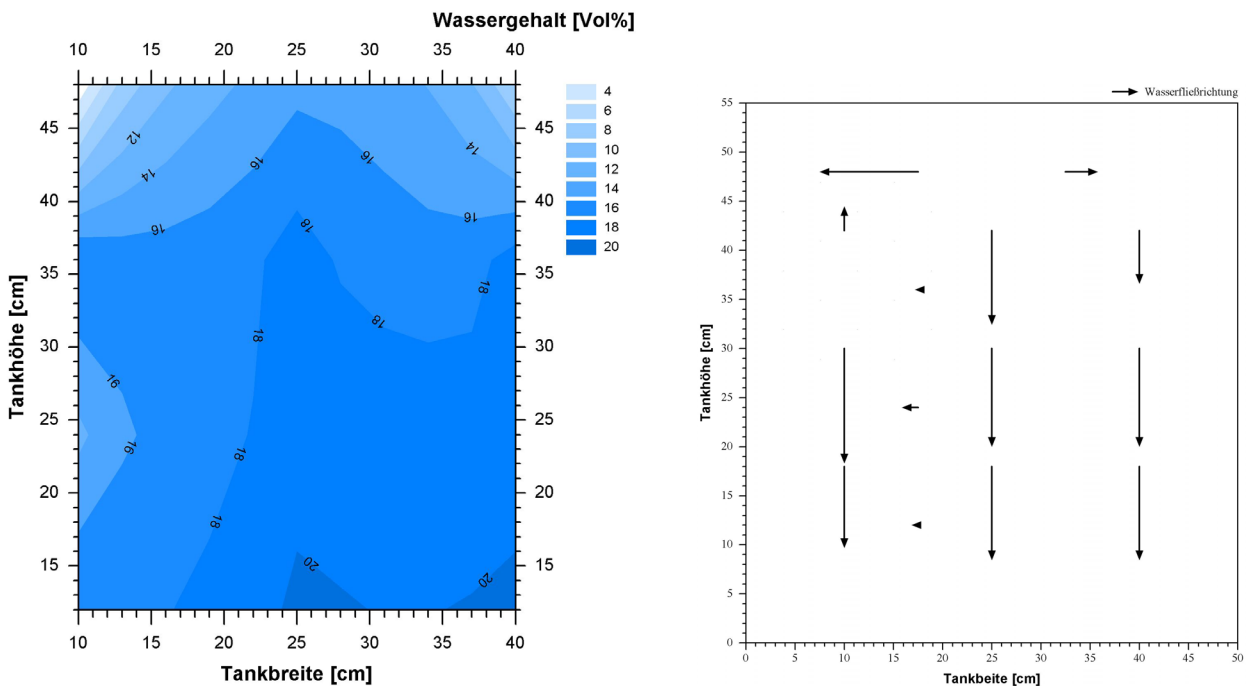


Abb. 26 a, b: Wassergehalts- und Gradientenverteilung von V3-2 bei 100 h: a) Vertikale Verteilung des volumetrischen Wassergehaltes von V3-2 (Sediment C) während der punktuellen Beregnungsphase bei 100 h. b) Dazugehörige Verteilung der Potentialgradienten nach den Gleichungen (36) und (37).

5.3 Strömungsverhalten

Die folgenden Versuche zur Ermittlung des Massenstromes wurden in Zusammenarbeit mit Martin EDENHARTER (1997) und Thomas CHABR (1996) durchgeführt. Dabei wurde abwechselnd deionisiertes Wasser und eine NaCl-Lösung als konservativer Tracer zur Beregnung eingesetzt. Dadurch konnten mit den in Kap. 3.3.7 beschriebenen Leitfähigkeitssonden die zeitlichen Abläufe des Massentransportes bestimmt werden.

5.3.1 Homogene Eingabe

Bei einer flächigen Beregnung durchwandert die NaCl-Lösung ähnlich einem Rechteck-Impuls den Sedimentkörper von oben nach unten. Die dabei gemessene Unschärfe des Signals entsteht einerseits durch Dispersion, andererseits durch Diffusion.

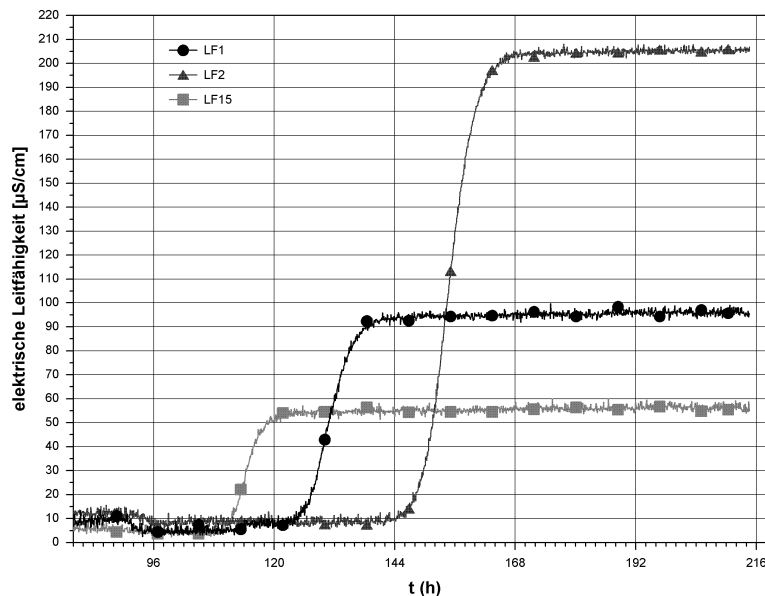


Abb. 27: Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-1 (Sediment B). Die Beregnung entsprach $24 \text{ ml}/(\text{min m}^2)$, der vertikale Sondenabstand beträgt 12 cm.

Die Tracerdurchgangskurven (Abb. 27) zeigen bei in gleichen vertikalen Abständen von 12 cm angeordneten Leitfähigkeitssonden abwärtsgerichtet größere Differenzen der Ankunftszeiten, da im unteren Tankbereich die Strömungsgeschwindigkeit abnimmt. Dies resultiert aus dem höheren Wassergehalt.

Da die NaCl-Eingabe jeweils erst nach Erreichen eines stationären Strömungszustandes erfolgte, sind die zeitlichen Variationen in der horizontalen Meßebeine ausschließlich auf Heterogenitäten der Strömung zurückzuführen.

5.3.2 Heterogene Eingabe

Bei der punktuellen Beregnung konnte der Durchlauf der NaCl-Lösungsfront durch eine horizontale Querschnittsfläche beobachtet werden. In Abbildung 28 ist der zeitliche Verlauf aller Durchgangskurven in der horizontalen Querschnittsfläche in der Tankmitte für die Versuchsreihe 3-1 dargestellt. In Abbildung 29 und 30 sind zweidimensionale Ansichten der Zustände bei 120 h und 140 h interpoliert (weitere Darstellungen in Kap. 9.5.6).

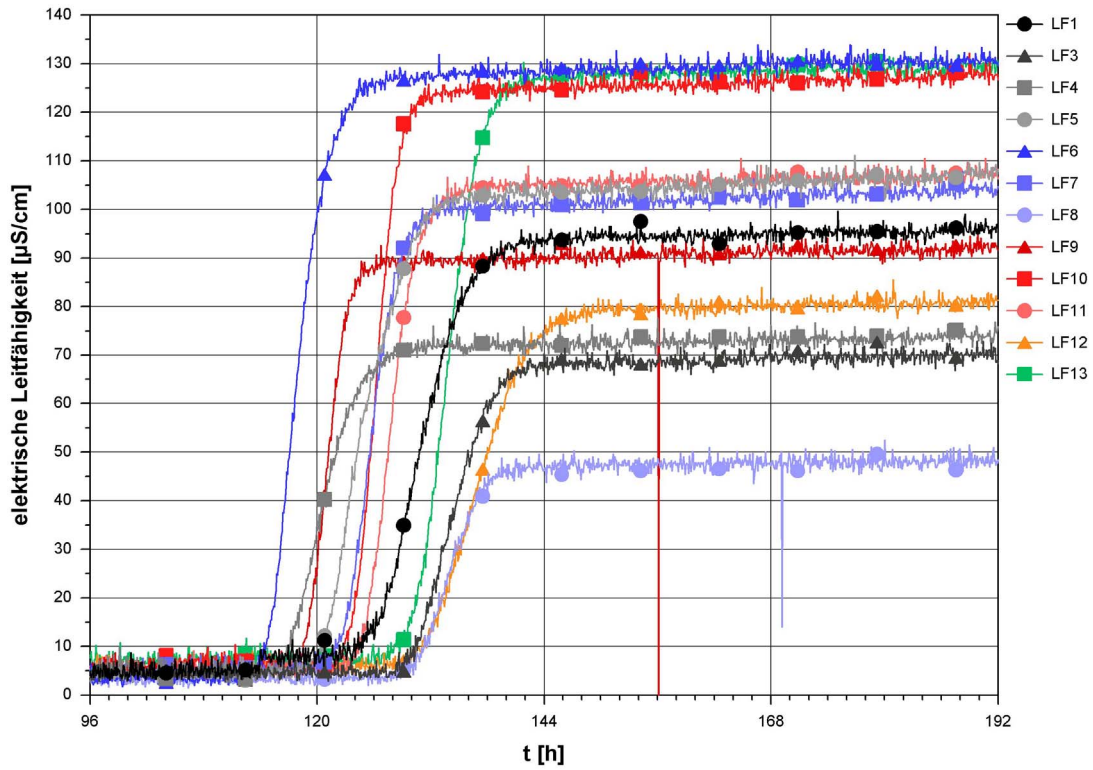


Abb. 28: Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-1 in einer horizontalen Fläche.

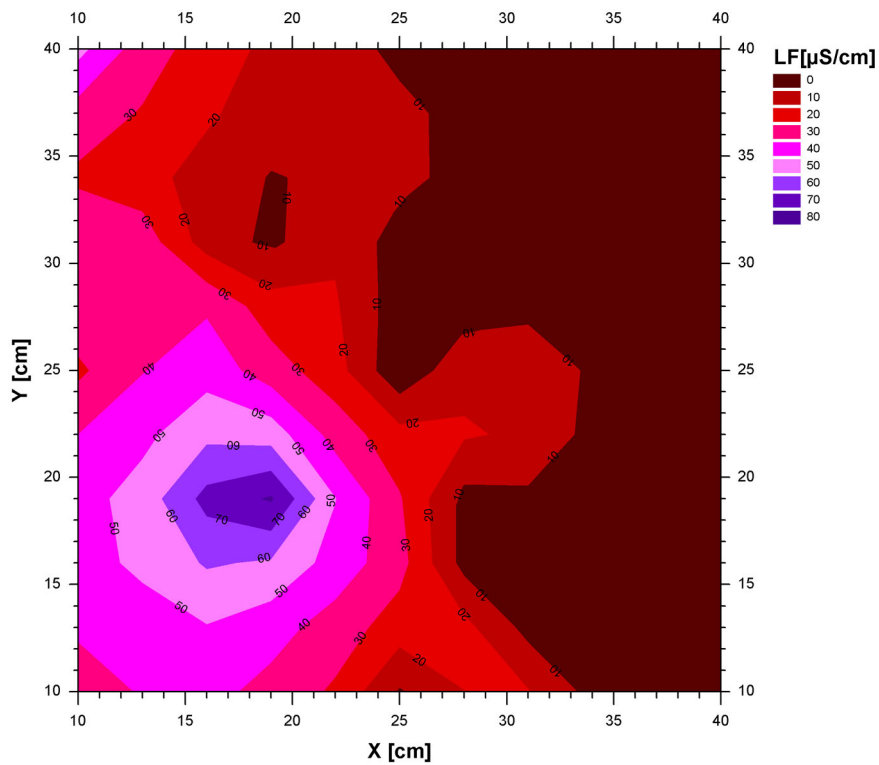


Abb. 29: 2D-Ansicht der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-1 in einer horizontalen Fläche bei 120 h.

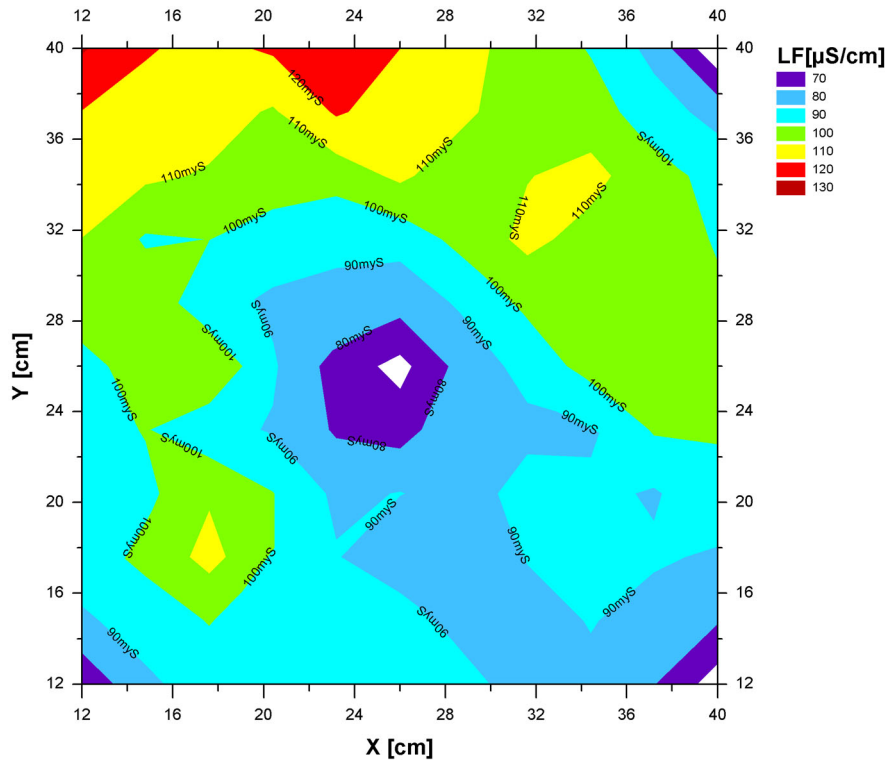


Abb. 30: 2D-Ansicht der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-1 in einer horizontalen Fläche bei 140 h.

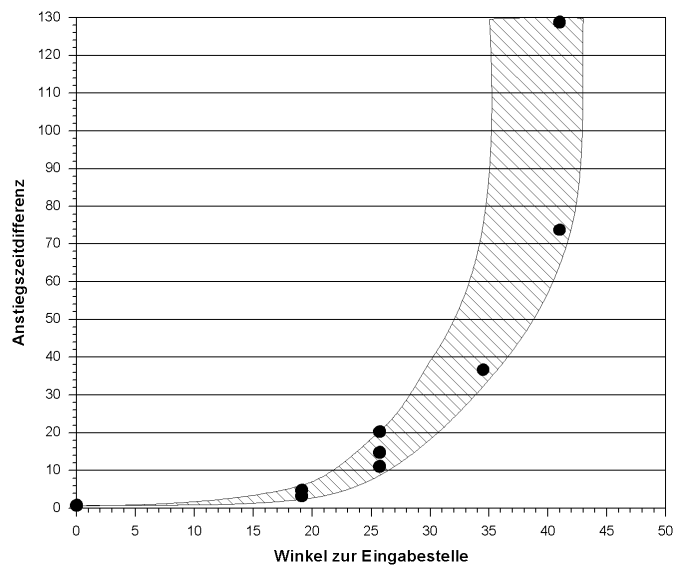


Abb. 31: Winkelabhängige Anstiegszeitdifferenz von V3-2 (Sediment C).

Wird für jede Durchgangskurve der Zeitpunkt der maximalen Flankensteilheit ermittelt und durch Subtraktion auf den zuerst beobachteten Durchgang normiert, erhält man für jedes Sediment ein charakteristisches Dispersionsverhalten. Da es sich hier um eine punktförmige Quelle für den Massenstrom handelt, kann diese Zeitdifferenz gegen den auf zwei Dimensionen reduzierten Raumwinkel reduziert werden. Dabei wurde neben einer mit dem Winkel von der Senkrechten zunehmenden Verzögerung auch eine zunehmende Streuung beobachtet (siehe Abb. 31, 32).

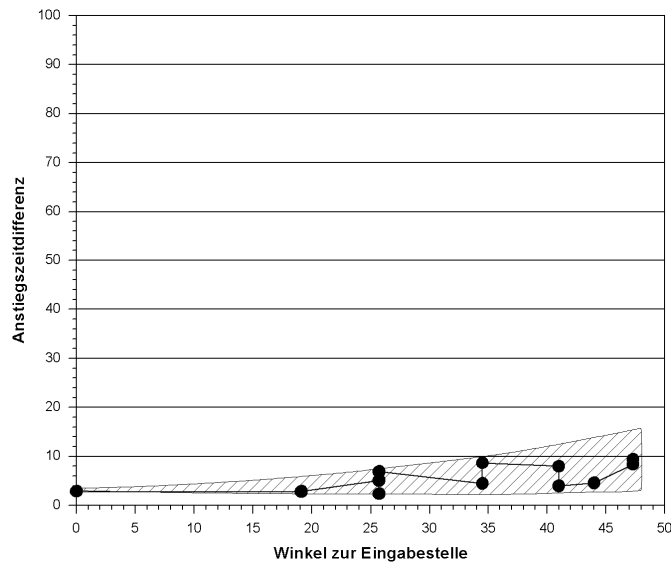


Abb. 32: Winkelabhängige Anstiegszeitdifferenz von V3-3 (Sediment D).

Dieses Auswertungsverfahren zeigt die Strömungscharakteristik eines Sedimentes auf: Ist eine große zeitliche Variationsbreite vorhanden, so neigt das Sediment zu lokalen Strömungskanälen, der Effekt wird auch als „fingering“ bezeichnet. Bei geringer zeitlicher Variationsbreite befinden sich die Poren in einem gegenseitig guten hydraulischen Kontakt und erzeugen eine homogene Strömung.

6 Optische Verfahren

Eine mathematisch verwertbare Parametrierung poröser Medien, besonders bezüglich des Porenraumes, unterliegt bisher der Problematik, daß nur wenige Parameter hinreichend durch eine direkte Messung gewonnen werden:

So lassen sich mit den in Kap. 3.1 erwähnten DIN-Verfahren die Korngrößenverteilung, der Porenanteil und die Lagerungsdichte von Sedimentproben bestimmen, hydraulische Eigenschaften des Porenraumes können durch Druckstufenverfahren gemessen werden. Porenraumstrukturen, Heterogenitäten und Anisotropien werden hierbei nicht erfaßt.

Analytische und numerische Berechnungen benutzen daher die bestimmbar Parameter als Ersatzparameter, um Näherungen für Porengrößenverteilung und Oberflächeneffekte beziehungsweise die Materialkoeffizienten für Hydraulik und Strömung zu erhalten.

Die vorgestellten optischen Verfahren können prinzipiell für jedes poröse Medium eingesetzt werden, für Festgesteine und nichtbindige Sedimente sind sie besonders empfehlenswert.

Zur Analyse von Sedimentproben wurden verschiedene optische Verfahrensschritte untersucht, miteinander kombiniert und mit DIN-Verfahren verglichen. Abbildung 36 zeigt die vollständige Methodik von der Probennahme bis zur Parametergewinnung.

- Ein erster Abschnitt reicht von der Probennahme und Aufbereitung bis zur Herstellung einer digitalisierten Bilddatei.
- Der nächste Abschnitt behandelt die Bildaufbereitung, die Bildanalyse und die Parameterberechnung.
- Die Übergabe der Bilddatei fungiert als standardisierbare Schnittstelle beider Abschnitte.

Kap. 6.1 behandelt die Möglichkeiten der Aufbereitung und Digitalisierung, während dies für tomographische Verfahren (Kap.6.2) entfällt. In Kap. 6.3 werden Möglichkeiten der digitalen Bildanalyse vorgestellt.

6.1 Probenaufbereitung und Digitalisierung

6.1.1 Fixierung

Zur Untersuchung des Porenraumes von Sedimenten ist eine ungestörte Probennahme erforderlich. Für gestörte Proben können lediglich statistische Kornparameter wie Korngrößenverteilung und Rundungsgradverteilung bestimmt werden.

Nichttomographische Bildanalyse-Verfahren benötigen Schnittebenen durch die ungestörte Probe, was bei Lockersedimenten eine Fixierung des Korngerüsts erfordert. Dies kann durch geringviskose, langsam abbindende Chemikalien realisiert werden, die beim Aushärten keine Volumenänderung der Porenräume verursachen.

Tab. 10: Fixierte Materialproben für bildanalytische Auswertungen.

Fixierte Materialproben			
Versuch	Kennung	Material	Kornklassen
V 5-1	G	Industriequarzkies 2.0	fG, gs
V 5-2	F	Industriequarzkies 1.0	gS, fg
V 5-3	B	Industriequarzsand 0.1	mS, fs
V 5-4	H	Grobsandiger Kies	fG, mg, gs
V 5-5	K	Glaskugeln, 1 mm	gS

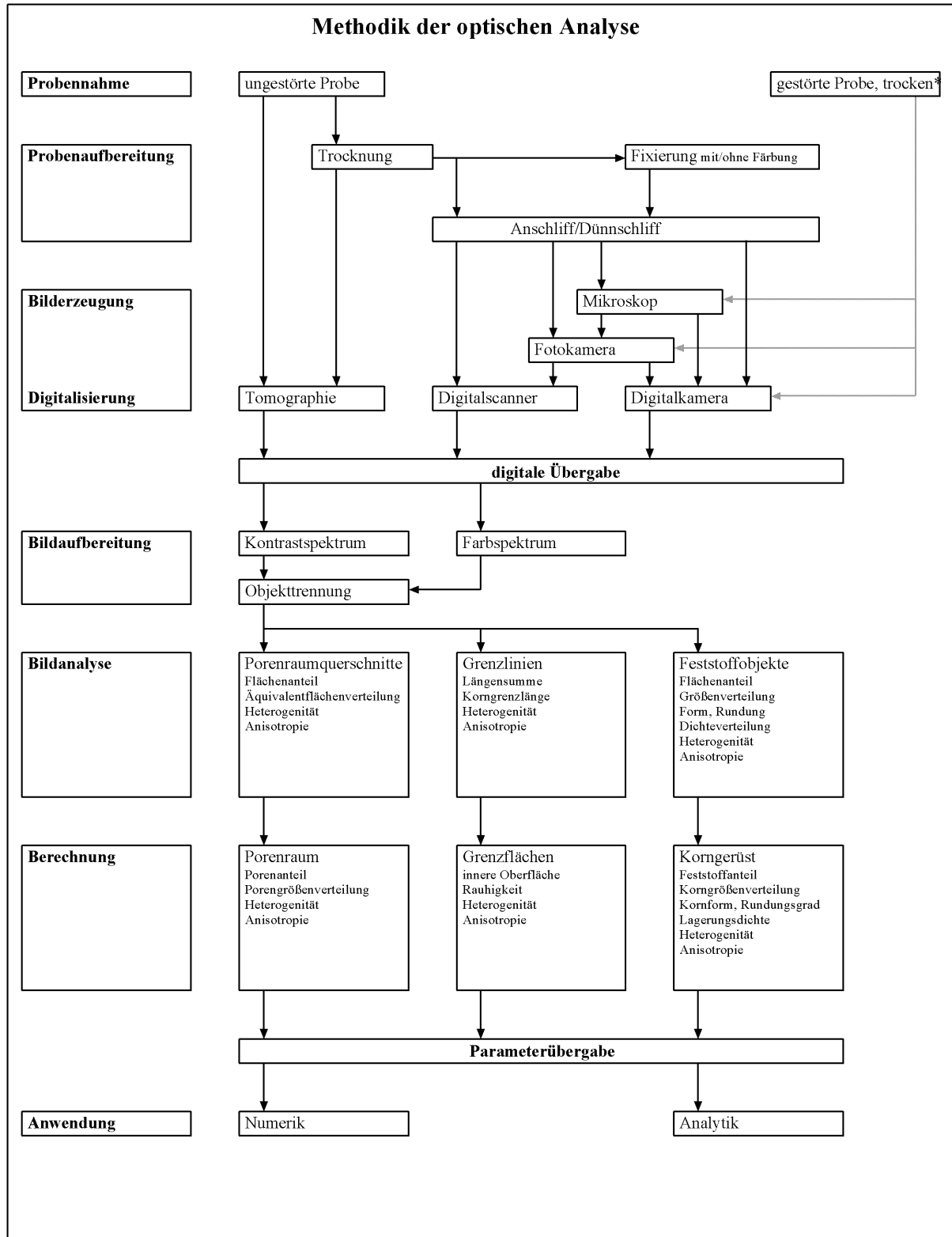


Abb. 36: Methodik der optischen Analyse. Gesamtüberblick der eingebundenen Arbeitsschritte. Die Schnittstellen der digitalen Bildübergabe und der Parameterübergabe sind für eine Standardisierung geeignet.

Die in Tabelle 11 aufgeführten Materialproben wurden nach einem von D. JUNG (1997) optimierten Verfahren fixiert: Das verwendete Polyesterharz (GTS, Voss Chemie) füllte den Porenraum vollständig aus und genügt der mechanischen Beanspruchung, die bei der Weiterverarbeitung auftritt. Überdies konnte dieses Polyesterharz mit Polyesterfarben (Voss Chemie) gleichmäßig intensiv getönt werden ohne die Gesteinsmatrix mitzufärben. Da es sich allerdings um Pigmentpartikel handelt, ist diese Färbung für Untersuchungen im Ton/Schluff-Bereich nicht anwendbar. Das blau gefärbte Polyesterharz wurde unter Zugabe von einem Gewichtsprozent Härter und zehn Gewichtsprozent Styrol angerührt. Das Fixieren erfolgte nach Trocknung in einem evakuierten Exsikkator durch langsame Eingabe von oben. Nach Entnahme härteten die Proben bei Raumtemperatur innerhalb von zwei Stunden aus.

Aus den fixierten Materialproben wurden horizontale und vertikale Anschliffe und Dünnschliffe hergestellt. Da es sich nach Kap. 4.1 nicht um natürliche Sedimentproben, sondern um Materialproben handelt, die nach einem einheitlichen Verfahren verdichtet wurden, sollte überprüft werden, ob dieses eine homogene Sedimentstruktur schafft (siehe Kap. 6.2.2). Weiterhin mußte verglichen werden, ob durch die Fixierung Volumenänderungen auftreten. Dies konnte durch Volumenkontrolle und Vergleich der Feststoffmatrix im tomographischen Verfahren ausgeschlossen werden.

6.1.2 Bilderzeugung

Während bei rechnergestützten Verfahren wie der Tomographie bereits digitale Schnittbilder ausgegeben werden, sind diese bei Anschliffen und Dünnschliffen erst herzustellen. Folgende handelsübliche Geräte zum Digitalisieren von Farbbildern waren verfügbar:

- Digitalscanner
- Digitaler Fotoapparat
- Digitale Videokamera

Alle Geräte können prinzipiell im Auflicht- und im Durchlichtverfahren eingesetzt werden. Es ist zu berücksichtigen, daß im Durchlichtverfahren bei Porenraumuntersuchungen die kleinste abzubildende Korngröße größer als die Schliffdicke (30µm, Grobschluff) sein muß. Die Auflösung sollte so hoch sein, daß die kleinste Korngröße noch mit mindestens vier Bildpunkten erfaßt wird. Abtastungen von sichtbarem Licht unterliegen im Tonbereich Beugungs- und Interferenz-Effekten und können daher nur mit höheren Frequenzen erfolgen (REM). Zur Optimierung der Abbildungsschärfe wurden drei verschiedene Ansätze verfolgt:

- Direkte Digitalisierung. Dies ist über die Laserabtastung eines Scanners möglich, jedoch nur bis zur maximalen Auflösung (Im Versuch: 6µm, Mittelschluff).
- Vorschaltung einer Optik. Dies ist bei Digitalen Kameras bzw. Videokameras immer der Fall. Anstelle einer Makrolinse wurde ein Polarisationsmikroskop vorgeschaltet. Die Auflösungsgrenze wird durch die Wellenlängen des verwendeten Lichtspektrums und die Kamera-Auflösung vorgegeben.
- Arbeiten mit einem Foto. Der Unterschied besteht darin, daß zunächst mit einem Kleinbildfilm abfotografiert wird und dann dieses oder ein vergrößerter Abzug mit Kamera oder Scanner digitalisiert wird. Hierbei ergab sich eine größere Variationsmöglichkeit der Ausleuchtung und Kontrastschärfe. Besitzt die gesamte Kornmatrix Grauwerte außerhalb des Porenraumgrauwertes, können auch kontrastreiche Schwarz-Weißfilme (hier: Agfa Ortho 25) eingesetzt werden.

Für die Bildanalyse der fixierten Proben in Kap. 6.3 wurden Fotos mit einer CCD-Videokamera (Schwarz-Weiß) in einem Makrostand und vergleichsweise Proben mit Flachbettscannern direkt digitalisiert. Die Kamera war über eine Videokarte in dem Bildanalysesystem LECO 2003 (Fa. Leco) integriert und konnte über die Software bedient werden. Beide Verfahren sind mit Durchlicht und Auflicht durchführbar.

Das direkte Scannen ergab eine hohe Bildqualität in sehr kurzer Zeit, da keine Fotos hergestellt werden mußten. Die Kamera hatte den systembedingten Vorteil, daß die Daten ohne Anpassung direkt in der Bildanalysesoftware weiterbearbeitet werden konnten. An- und Dünnschliffe von Kiesen konnten im Auflichtverfahren besser selektiert werden. Bei Sanden erbrachten die Durchlichtaufnahmen von Dünnschliffen den besten Kontrast.

Abbildung 37 zeigt die direkten Digitalisierungen der größten und kleinsten untersuchten Korngrößen aus Dünnschliffen. Da der Porenraum blau gefärbt wurde, kann er leicht isoliert werden.

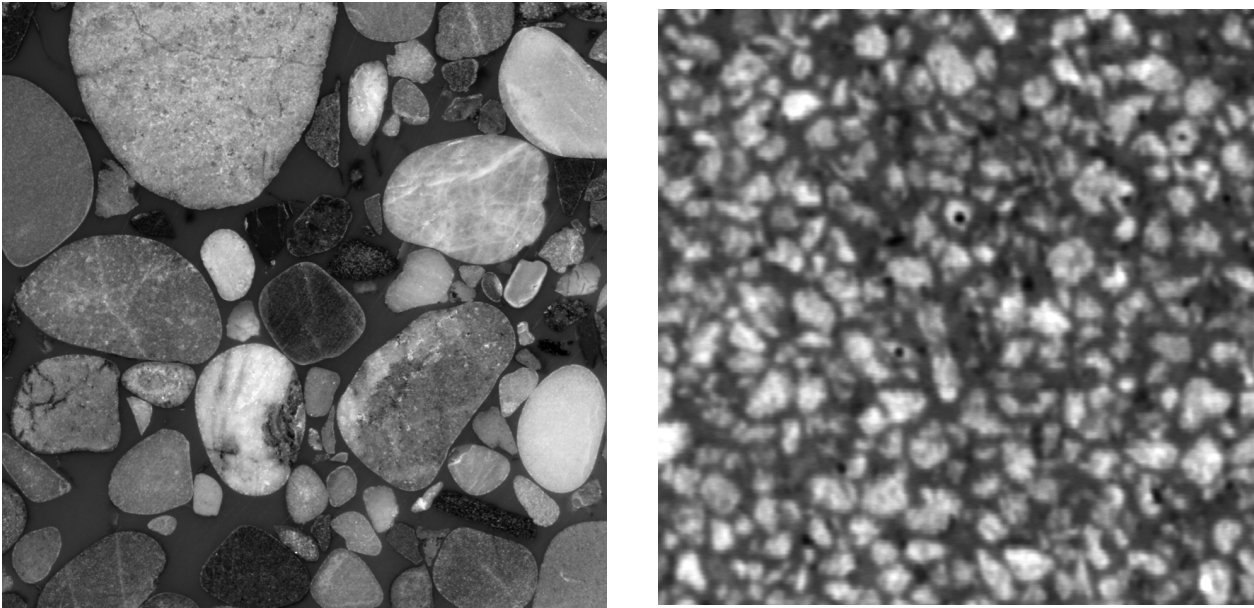


Abb. 37 a, b: Direkte Digitalisierung von Sedimentschliffen mit Flachbettscanner. Der Porenraum ist blau gefärbt.
 a) Größte Korngrößen (Probe H, grobsandiger Kies) im Auflicht-Verfahren (Bildkante entspricht 30 mm). b)
 Kleinste Korngrößen (Probe B, feinsandiger Mittelsand) im Durchlichtverfahren (Bildkante entspricht 5 mm).

Der Vergleich zwischen direktem Durchlichtscan und Foto ist in Abbildung 38 zu sehen. Hier konnten beide Verfahren zur Analyse verwendet werden. Der farbige Direktscan bildet neben Kratzern auch die sekundäre Porenraumstruktur innerhalb der Körner ab. Da es sich bei dem Foto um eine schwarz-weiße Belichtung handelt, mußte dies vermieden werden, da nur der primäre Porenraum selektiert werden sollte.

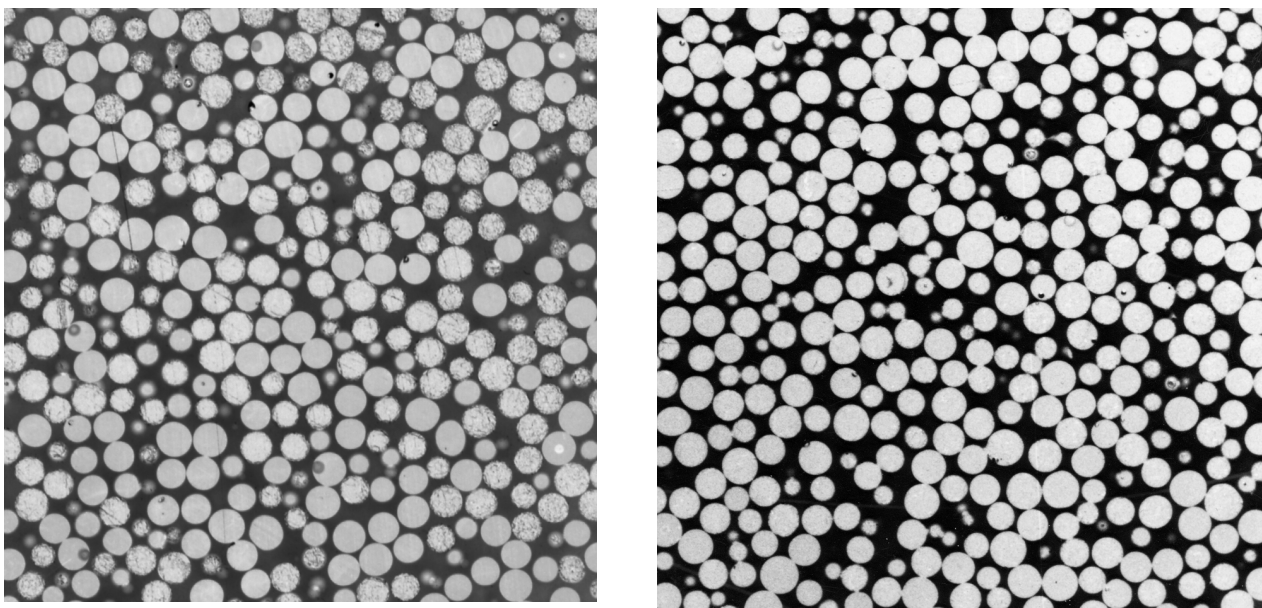


Abb. 38 a, b: Vergleich von direktem Scan und Foto (Probe K, Glaskugeln, Bildkante entspricht 20 mm). a)
 Durchlicht-Farbscan vom Dünnschliff. b) Kontrastreiche Fotoaufnahme mit starker Belichtung.

6.2 Computer-Tomographie

Der Einsatz der Computer-Tomographie (CT) bei der Messung von Bodenproben liegt nahe, da ungestörte Sedimentproben verwendet werden können und diese nicht aufbereitet werden müssen. Für eine Vergleichbarkeit der Einzelanalysen, auch zu konventionellen Untersuchungsmethoden, sind jedoch standardisierte Aufbereitungsverfahren notwendig.

Nachteilig wirken sich die hohen Kosten und ein begrenztes Auflösungsvermögen aus. Durch den Einsatz in der Humanmedizin ist aber zukünftig mit einer Verbesserung der Auflösung sowie der Weiterentwicklung anderer Methoden (Kernspinresonanz, Positronen-Tomograph) zu rechnen.

Weitere Vorzüge der CT liegen in der kurzen Meßdauer und sofortigen Visualisierung der Sedimentstrukturen und Dichteverteilungen, d.h. Korngerüst und Heterogenität des Porenraumes werden sofort sichtbar.

Bisher wurde die CT in der Hydrogeologie weitgehend für die Bestimmung von Lagerungsdichte und Wassergehalt eingesetzt. Mit der Kernspintomographie (T. BAUMANN et al., 2000a,b,c) und der SPEC-Tomographie (J. PERRET et al., 2000) konnten dagegen Wegigkeiten des Lösungstransportes detektiert werden.

6.2.1 Methodik der Computer-Tomographie

Der verwendete Computer-Tomograph mit der Bezeichnung Spiral-CT, Modell „PQ 5000“ (Hersteller: Picker International, Cleveland, Ohio, USA), basiert auf dem klassischen röntgenologischen Schichtaufnahmeverfahren und bietet neben dem Einzelschichtverfahren die Möglichkeit einer Spiralaufnahme.

Da das Dichtespektrum in der humanmedizinischen Anwendung wesentlich enger liegt als bei Bodenproben, muß die CT-Anlage neu kalibriert werden. Nach der Fixierung des Probenbehälters wird von einem abgeschirmten Nebenraum aus die Anlage bedient.

Die Auswertung der Rohdaten erfolgt dann auf einer UNIX-Workstation, wobei folgende Achssymmetrie vorgegeben ist:

Die axiale Richtung verläuft parallel zur Hauptachse der Spiralmessung, horizontal senkrecht dazu liegt die sagitale Achse. Für eine mehr oder weniger in horizontalen Schichten sedimentierte Probe in natürlicher Positionierung bilden diese beiden Blickrichtungen ein Profil und sehen sehr ähnlich aus. Berechnet man dagegen eine coronale Ansicht, befindet sich diese meist in einer Sedimentschicht und erscheint daher homogener.

Für die Auswertung bieten sich verschiedene Darstellungsmöglichkeiten:

- Für die Kornverteilung bzw. Porenverteilung kann eine zweidimensionale Einzelschicht in allen Richtungen berechnet werden.
- In einem sogenannten „3D-mode“ wird ein beliebiger Quader innerhalb des Meßraumes gewählt, die Dichteunterschiede werden in Grauwerten dargestellt.
- Im „4D-mode“ berechnet man aus der räumlichen Dichteverteilung Objekte hoher Dichte heraus, in diesem Fall das Korngerüst. Über das „volume rendering“ wird unter Zuhilfenahme einer virtuellen Lichtquelle in Richtung des Betrachters eine plastische Darstellung gerendert, die Grauwerte bilden dann jedoch die Schattierung in die Raumentiefe nach.
- Weiterhin kann man alle Quader auch räumlich drehen und mit einer ferneren virtuellen Lichtquelle (Illumination) ausleuchten.

Alle Abbildungen können auf Film ausbelichtet oder als TIFF-Datei auf andere Bildanalyse- oder Bearbeitungsprogramme exportiert werden. Die Rohdaten können digital auf Streamerkassette oder Wechselplatte gespeichert werden.

6.2.2 CT- Aufnahme und Bearbeitung

Alle Messungen wurden am Klinikum Innenstadt der Universität München, CT-Abteilung, unter großzügiger Betreuung von Dr. med. Ulrike Szeimies durchgeführt.

Die umfangreichen Rohdaten wurden auf ein Digitalband überspielt und beim Autor hinterlegt.

In einem Vorversuch wurde zunächst das Dichtespektrum auf bis 3g/cm^3 erhöht. In einem Vergleichstest zwischen Einzelschicht- und Spiralaufnahme brachte letztere die besseren Ergebnisse.

Die Proben befanden sich in für Röntgenstrahlung unproblematischen Plexiglaszylindern und konnten ohne Aufwand in die Anlage gestellt werden.

Folgende Sedimentproben wurden mit der CT gemessen (siehe auch Kapitel 4):

Tab. 11: Tomographisch gemessene Sedimentproben.

CT- Messungen			
Versuch	Kennung	Material	Kornklassen
V 4-1	H	Grobsandiger Kies	fG, mg, gs
V 4-2	G	Industriequarzkies 2.0	fG, gs
V 4-3	B	Industriequarzsand 0.1	mS, fs
V 4-4	K	Glaskugeln, 1 mm	gS

Die Proben wurden nacheinander unter gleichen Bedingungen gemessen, die Rohdaten als Einzelbilder direkt auf Film ausbelichtet.

Da Rohdatenbilder die tatsächliche Dichteverteilung zeigen, kann bei Korngrößen ab etwa 1 mm auch die Heterogenität der Korndichte untersucht werden (V 4-1), bei feinkörnigeren trockenen Proben zeigt die Dichteverteilung die Heterogenität der Lagerungsdichte (V 4-3). Letztendlich kann jedoch die CT unterhalb der räumlichen Auflösungsgrenze nicht zwischen Korndichte, Lagerungsdichte und Wassergehalt unterscheiden. Wenn zwei dieser Faktoren bekannt oder relativ homogen sind, ist eine Anwendung sinnvoll.

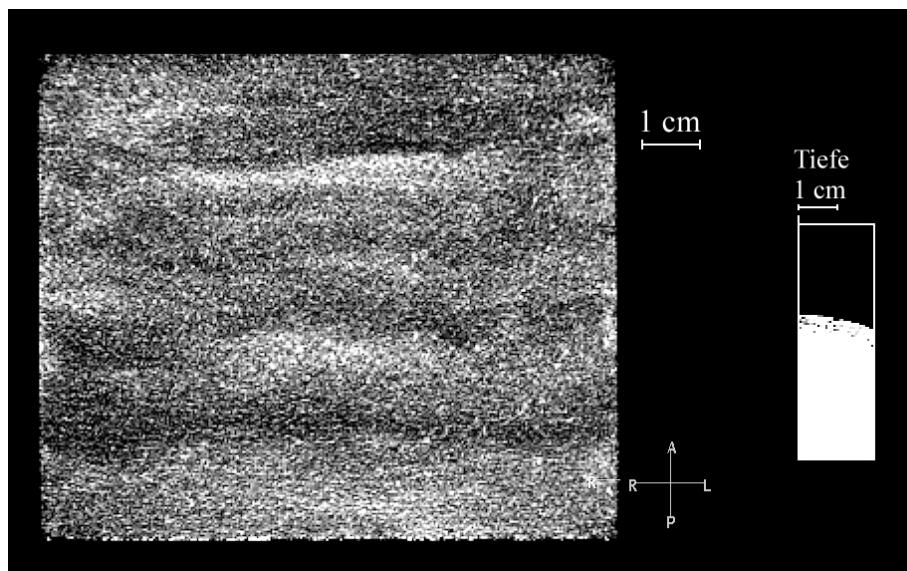


Abb. 39: Die axiale Berechnung (Vertikalschnitt) eines CT-Bildes im „4D-mode“ von Probe B (mS, fs/V 4-3) zeigt die vertikale Schwankung der Lagerungsdichte.

Die Probe B (mS, fs/V 4-3) weist trotz eines scheinbar homogenen Materials eine Veränderung des Porenraumes in vertikaler Richtung auf. Dies wird durch die mit der in Kapitel 5 beschriebenen und aus Vergleichsgründen identischen Einbauweise wie in den Tankversuchen verursacht. Die Verdichtungsmethode beim künstlichen Einbau wirkt sich jeweils besonders stark auf die ersten Millimeter der jeweiligen Sedimentoberfläche aus (Abb. 39).

Zur Räumlichen Darstellung können beliebige Quader berechnet und von allen Seiten betrachtet werden. In Abbildung 40 wird ein Teil der Probe B aus Abbildung 39 gedreht, um die räumliche Struktur der Lagerungsdichte darzustellen. Da die Auflösungsgenauigkeit sinkt, ist es empfehlenswert, einzelne Flächen aus den verschiedenen Richtungen zu berechnen. Die Bezeichnungen für rechts und links sind bei allen Darstellungen vertauscht, da die CT-Anlage von einem liegenden und somit seitenverkehrten Patienten ausgeht.

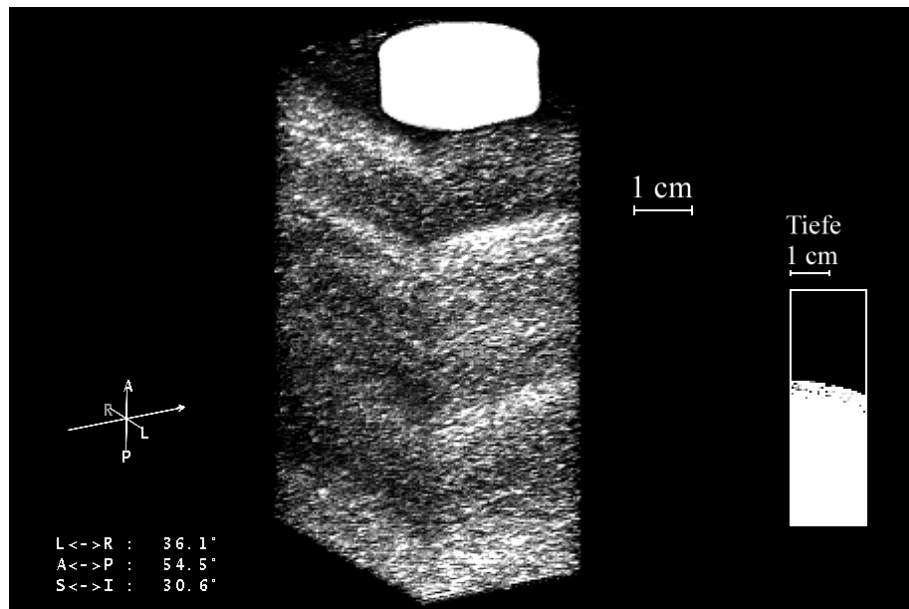


Abb. 40: Die gedrehte Berechnung (Vertikalschnitt) eines CT-Bildes im „4D-mode“ von Probe B (mS, fs/V 4-3) zeigt die räumliche Struktur der Lagerungsdichte. Das vermeintlich homogene Sediment weist deutlich sichtbare Schwankungen in der Dichte auf, die durch die Einbaumethode verursacht werden.

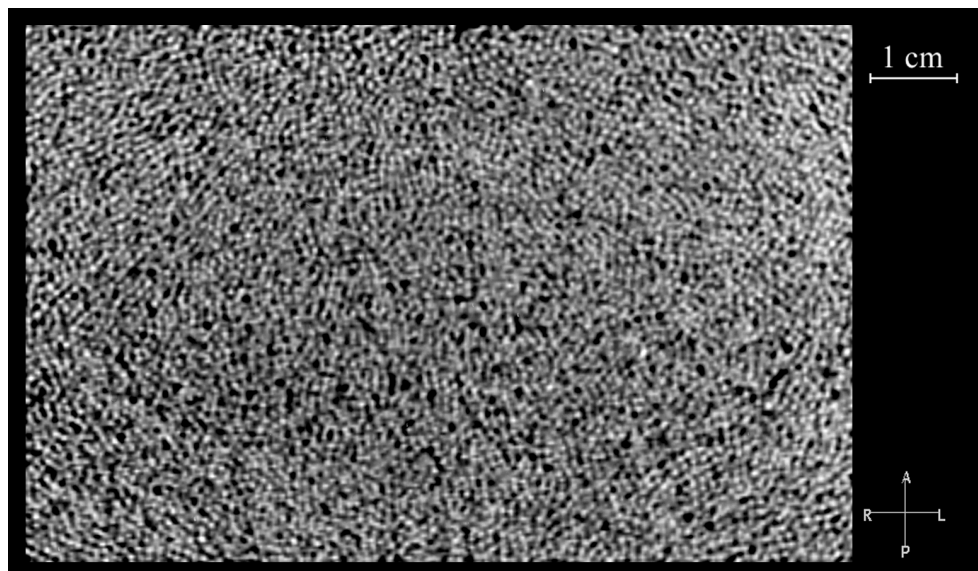


Abb. 41: Darstellung der CT-Rohdaten von Glaskugeln (K/V 4-4). Der Tomograph befindet sich hier an der Grenze der optischen Auflösung der Porenraumstruktur.

Die Probe K (V4-4, Glaskugeln) zeigte, daß Korngrößenverteilung, Kornform und Porenraum im Größenbereich von 1 mm noch für eine zweidimensionale Auswertung von Korngerüst und Porenraumverteilung hinreichend gut abgebildet wird (Abb. 41).

Zur räumlichen Porenraumbestimmung war eine mehrstufige Nachbearbeitung der CT-Aufnahmen notwendig. Da hierbei ausschließlich numerische Veränderungen vorgenommen wurden, war eine Standardisierung des Verfahrens für einen bestimmten Tomographen unproblematisch.

Zunächst wurden, von einer festgelegten Schnittebene aus, verschieden dünne (bis hin zur Auflösungsgrenze) Quader in axialer Richtung im „3D-mode“ und „4D-mode“ (siehe 6.2.1) mit der CT-Software (Picker International, PQ5000/UNIX, Version 3.3) berechnet. Der zweidimensionale Grenzfall eignet sich für analytische Auswertung von Korngrößenverteilung, Kornform, Kornabstand, Porenquerschnitten, Porengrößenverteilung und Heterogenitätsberechnungen bei Grobsanden und Kiesen.

Quader, die mehrere Schichtaufnahmen beinhalteten, stellten für jeden beliebigen Bereich die Heterogenität der Sedimentstruktur dar (Abb. 42).

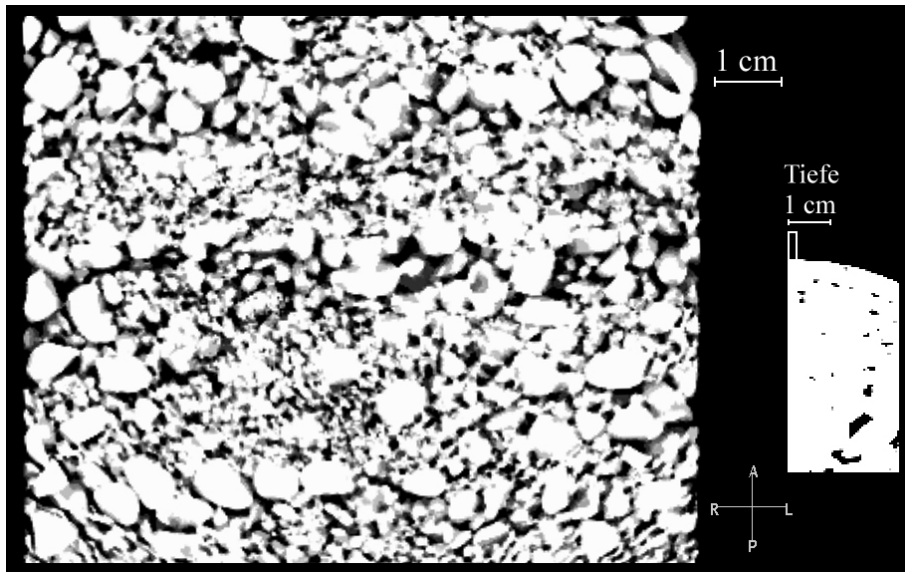


Abb. 42: Axiale Berechnung (Vertikalschnitt) eines CT-Bildes im „4D-mode“ von Probe H (fG, mg, gs/V 4-1).

Versuchsweise wurde dies auch in coronaler Ansicht durchgeführt, um eine horizontale Verteilung innerhalb einer Sedimentschicht zu erhalten, jedoch ist hier die Auflösungsgenauigkeit etwas geringer (Abb. 43).



Abb. 43: Coronale Berechnung (Horizontalschnitt) eines CT-Bildes im „4D-mode“ von Probe H (fG, mg, gs/V 4-1) mit ähnlicher Tiefe wie Abb. 40.

Für eine optimale Darstellung der Sedimentstruktur eignete sich ein sehr dünner Quader mit einer Tiefe von etwa 2-3 mittleren Korngrößen. In Abb. 44 ist auch der Porenraum aufgrund der „4D-mode“-Grauwertverteilung gut zu sehen. Auffällig sind der große Abstand der Einzelkörner und die geringe Anzahl an Berührungspunkten.

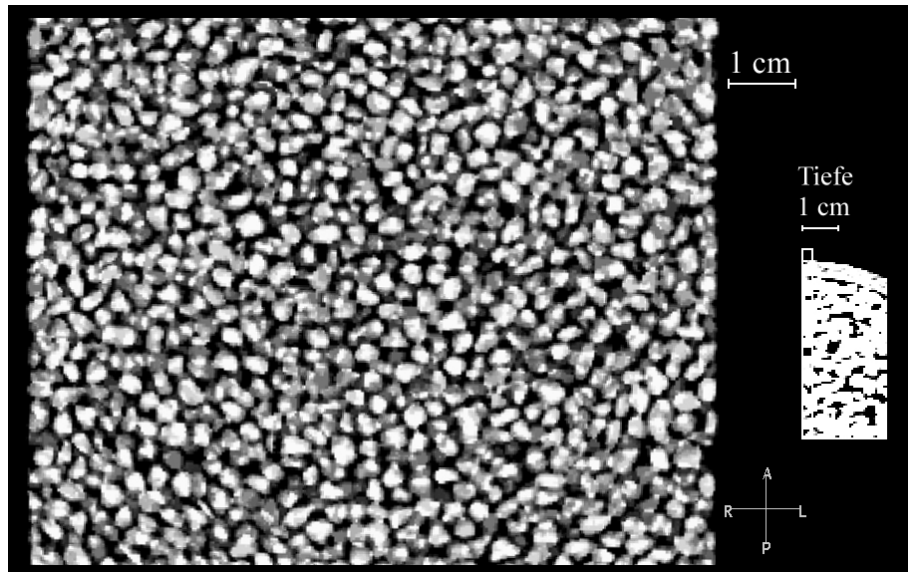


Abb. 44: Axiale Berechnung (Vertikalschnitt) eines CT-Bildes im „4D-mode“ von Probe G (fG, gs/V 4-1) mit auffällig großem Porenanteil.

Durch Drehung des berechneten Quaders in Abbildung 45 wird die Struktur anschaulicher, jedoch auch unschärfer.

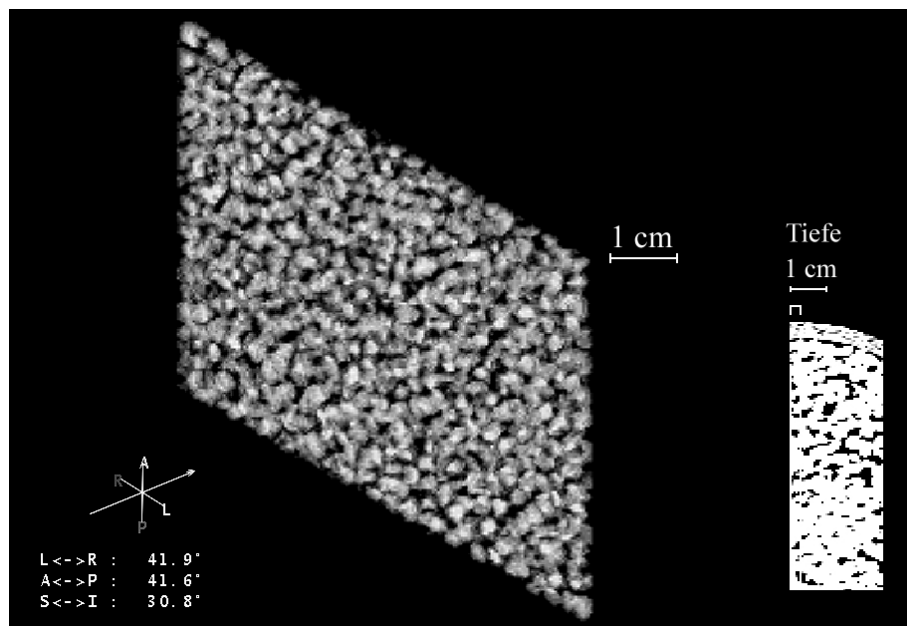


Abb. 45: Drehung des berechneten Quaders aus Abbildung 44 von Probe G (fG, gs/V 4-1).

Im nächsten Arbeitsschritt wurden die zu erfassenden Bereiche in einer Bildbearbeitungs-Software (hier: Adobe, Photoshop 4.0/MacOS) selektiert und in Ebenen hintereinandergestellt:

Zur Darstellung der axialen Tiefe der Porenkanäle wurde ein transparenter Porenraum durch Selektion des tiefenabhängig eingefärbten Korngerüsts erzeugt (Abb. 46, Abb. 47). Denkbar wäre aber auch, den Porenraum in Einzelschichtbildern zu selektieren und tiefenabhängig einzufärben. Dies wäre aber nur für einen kleinen Bereich oder im Rahmen einer 3D-Animation anschaulich.

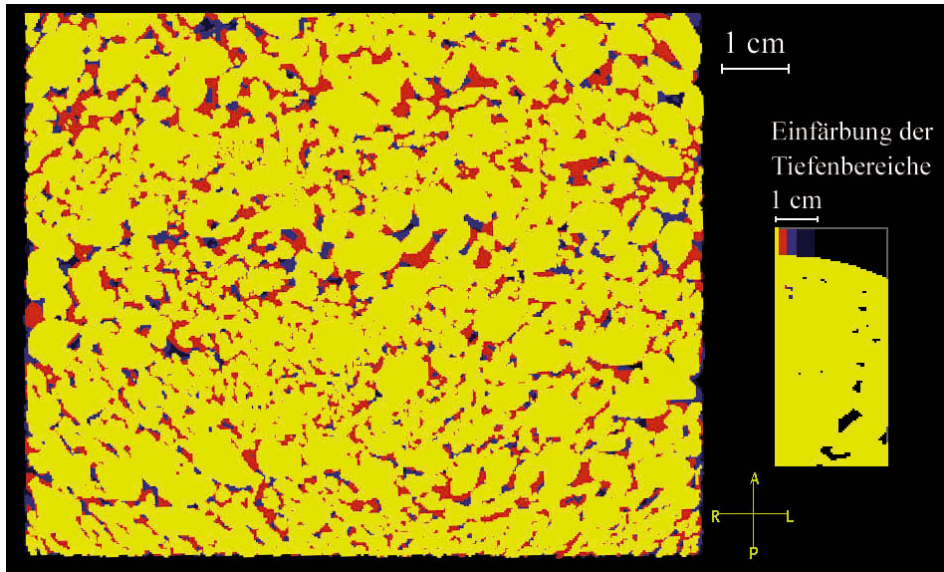


Abb. 46: Tomographische Auswertung der Porenkanäle von Probe H. Tiefenabhängig eingefärbte CT-Bilder von Probe H (fG, mg, gs) zeigen die heterogene Verteilung der Grobporen.

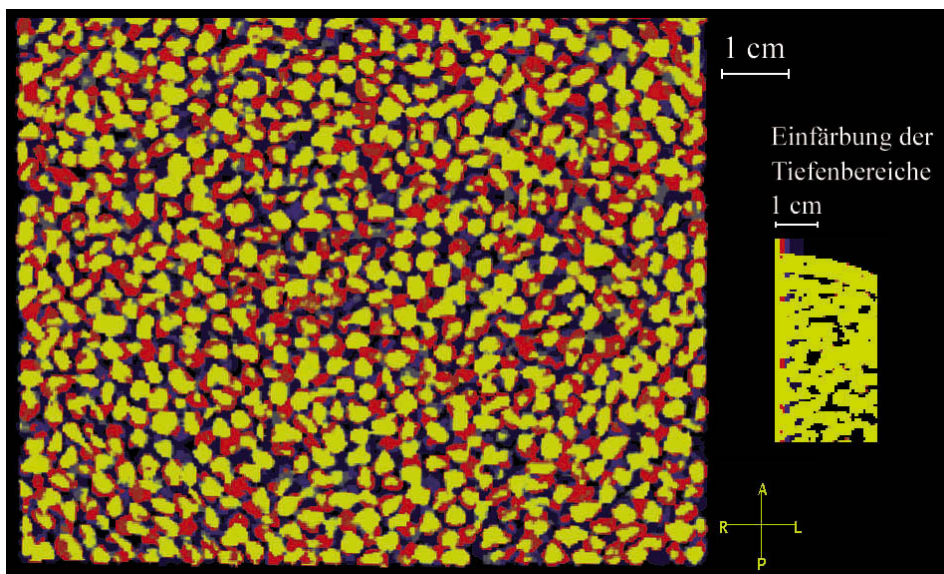


Abb. 47: Tomographische Auswertung der Porenkanäle von Probe G. Tiefenabhängig eingefärbte CT-Bilder von Probe G (fG, gs) zeigen den großen Porenanteil und den homogenen Porenraum.

Die eingefärbten Flächen erlauben ebenfalls eine analytische Auswertung der Porenkanäle. Nicht zur Auswertung, jedoch zur räumlichen Darstellung eignet sich die Überlagerung der Farbflächen mit einem halbtransparenten Grauwertbild aus dem „4D-mode“ (Abb. 48, Abb. 49).

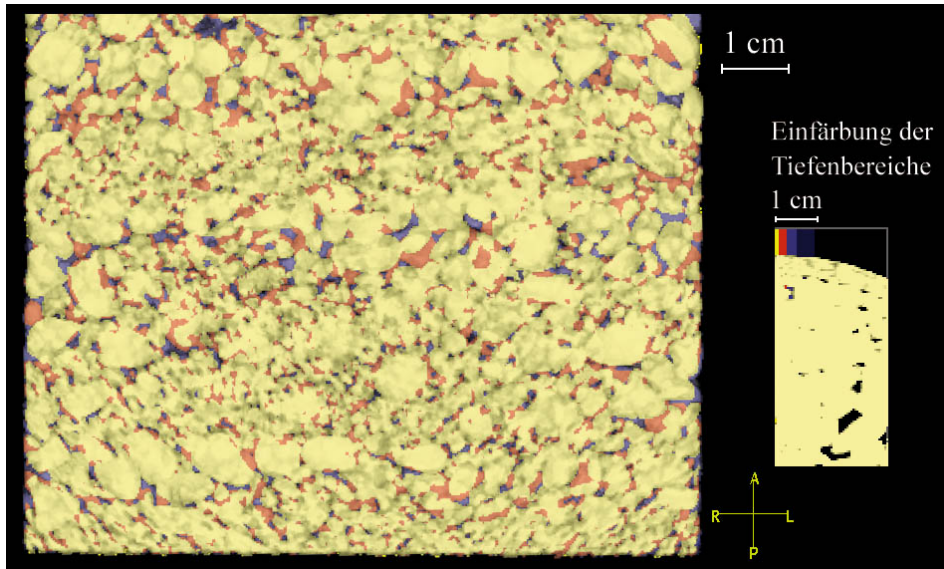


Abb. 48: Räumliche Struktur von Probe H. Überlagerung der eingefärbten CT-Bilder von Probe G (fG, gs) mit dem „4D-mode“-Grauwert zeigen den Zusammenhang von Sedimentstruktur und Großporen.

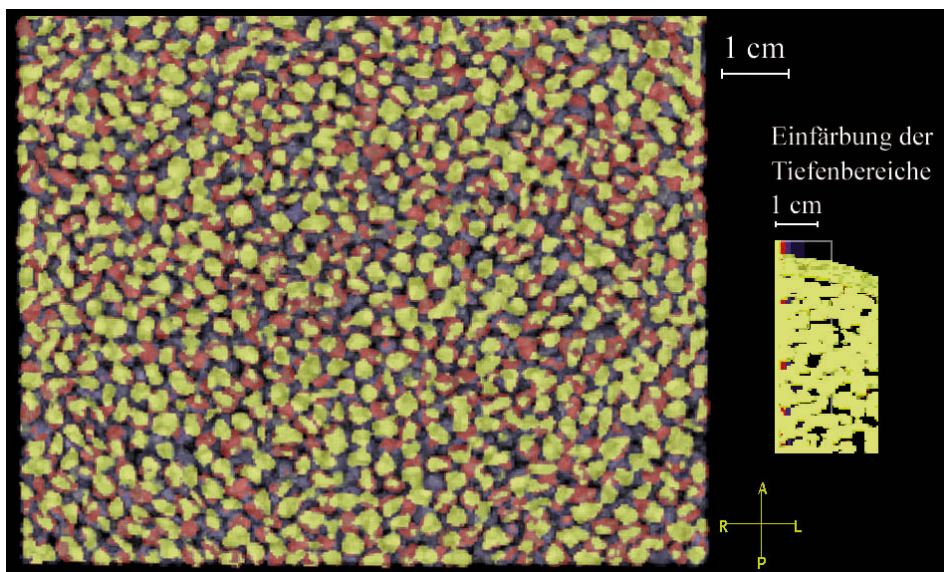


Abb. 49: Räumliche Struktur von Probe G. Überlagerung der eingefärbten CT-Bilder von Probe G (fG, gs) mit dem „4D-mode“-Grauwert zeigen die räumliche Struktur des Korngerüstes.

6.3 Bildanalyse

Die vorgenommene digitale Analyse setzt direkt nach der Digitalisierung ein und läßt sich in drei Abschnitte einteilen:

- digitale Bildaufbereitung
- mathematische Bildanalyse
- Parameter- und Funktionsberechnung

Für die Analyse stand das digitale Bildanalyse-System LECO 2003 (siehe Abb. 50) zur Verfügung. Es besteht aus einem zentralen Rechner (PC), der über digitale Videokarten mit zwei CCD-Videokameras (Farbe und schwarz-weiß) verbunden ist. Die Kameras können auf Makrostand und Polarisationsmikroskop montiert werden. An zwei Graphikkarten befinden sich Monitore für die Analyse-Software LECO 2003 (Fa. LECO) sowie dem zu bearbeitenden Bild. Das Bild kann von einem der Videokanäle in Echtzeit abgerufen oder über ein MO-Laufwerk importiert werden. Weiterhin wurde zur Bildaufbereitung und Vergleichsanalysen eine Fotobearbeitungssoftware (Photoshop 4.0, Fa. Adobe) eingesetzt.



Abb. 50: Bildanalyse-Arbeitsplatz LECO 2003: Makrostand mit CCD-Farbkamera, Polarisationsmikroskop mit CCD-Kamera (schwarz-weiß), Tower-PC mit MO-Laufwerk, Monitor für Digitalbild, Bedienungs-Monitor für Bildanalyse-Software (von links nach rechts).

6.3.1 Bildaufbereitung

Bei dem Digitalisierungsprozess wird das Grauwertspektrum meist linear optimiert, somit bietet sich die Möglichkeit der digitalen Bildaufbereitung an. Während bei der Arbeit mit Fotos schon eine Verbesserung vorliegt, empfiehlt sich eine Bearbeitung besonders beim direkten Scannen.

Bei den einkanaligen Grauwertspektren (CT, Fotos, CCD-Kamera) wurde eine nichtlineare Optimierung des Kontrastes durchgeführt, wobei die Auflösung durch die Bildanalyse vorgegeben wird. Das verwendete 8-bit Format (TIFF) besitzt 256 Graustufen je Kanal. Für die Objektrennung in Korngerüst und Porenraum wurde eine größtmögliche Grauwertdifferenz durch eine Tonwertkorrektur eingestellt (Normalisierung).

Bei Farbbildern vom Scanner oder der CCD-Farbkamera (hier 3-Kanal RGB-TIFF) gelingt dies präziser, da alle Kanäle gleichzeitig bearbeitet werden können. Der in einem spezifischen Blauton eingefärbte Porenraum ließ sich so besonders gut gegenüber der Kornmatrix selektieren.

Für diese Arbeitsschritte kann jede handelsübliche Fotobearbeitungssoftware herangezogen werden, eingesetzt wurden Photoshop 4.0 und LECO 2003. Zur weiteren Bildanalyse wurden zunächst Bilder abgespeichert, die nur noch 2 definierte Farbtöne (für Korngerüst und Porenraum) enthielten.

6.3.2 Bildanalyse und Parameterberechnung

Fotobearbeitungsprogramme enthalten oft nur wenig statistische Auswertungsmöglichkeiten, da aber zwei Farbtöne für die Auswertung genügen, bieten sie eine kostengünstige Alternative. Das eingesetzte Bildanalyseprogramm enthält dagegen eine Vielzahl von Funktionen, die Bool'sche Operatoren und Algorithmen zur statistischen Auswertung von Flächen und Grenzen einschließen. Durch die abspeicherbare Kombination von Arbeitsschritten konnten sich Auswertungen automatisieren lassen (siehe auch JUNG, 1997).

6.3.2.1 Analyse der Flächen

Ausgehend von dem Ansatz, daß jeder Querschnitt durch das Sediment dem prozentualen Verhältnis von Feststoff zu Porenraum entspricht, wurde das Verhältnis der jeweiligen Farbflächen zur Gesamtfläche zur Bestimmung von Porenanteil n und Feststoffanteil f mit der Pixelstatistik bestimmt. Durch die einzelne Auswertung von verschiedenen Schichten ergibt sich eine statistische Verteilungskurve, die der Heterogenität des Porenanteils bzw. der Lagerungsdichte (bei einheitlicher Korndichte) entspricht.

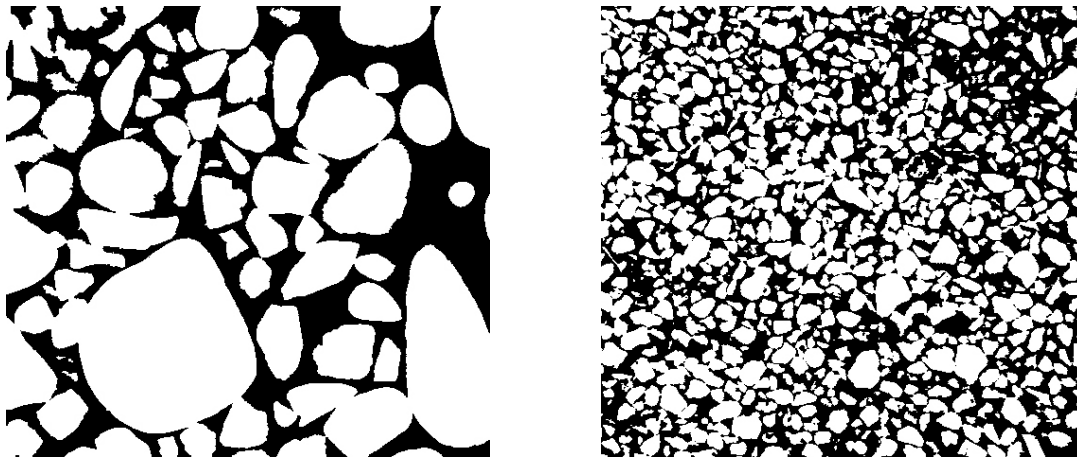


Abb. 51 a, b: Bildanalyse von Flächen. a) Die ungleichförmige Probe H zeigt dennoch wenig Berührungspunkte der Einzelkörner. b) In Probe B sind auch die Feinkornanteile erfaßt.

Zur Analyse der Einzelkörner müssen diese als Einzelflächen erfaßt werden. Da sich die Einzelkörner nur an wenigen Punkten in der Schnittebene berührten, konnte die Mehrzahl der Kontakte durch eine Flächenverkleinerung um einen Pixel schon eine Trennung vollzogen werden. Die Funktion „ULTIMATE DILATION“ erweitert die Flächen wieder um ein Pixel, ohne die Flächen wieder zusammenzufügen. Dadurch kann eine Verteilung der Kornquerschnittsflächen berechnet werden.

Ordnet man aus diesen Flächen Äquivalentdurchmesser zu und gewichtet man die Kornklassen nach ihrem Flächenanteil, ergibt sich eine Kornverteilungskurve. Diese ist allerdings mit dem Fehler behaftet, daß viele Körner nicht mittig angeschnitten sind und daher etwas kleiner erscheinen. Ist die Korntrennung nicht immer vollständig, erscheinen auch zu große Körner. Andere Methoden wie Siebung, Schlämmanalyse und Partikelsizer sind allerdings ebenfalls mit solchen methodischen Fehlern behaftet.

Aus den Kornquerschnittsflächen wurden weiterhin mit der Funktion „ROUNDNESS“ eine Verteilung der Rundungsgrade bestimmt. Bei vollständiger Korntrennung kann nach Gleichung (6) der mittlere Rundungsgrad berechnet werden. Bei unvollständiger Trennung ergab eine Bestimmung von Glaskugeln (Probe K) für 17 % der Einzelflächen zu niedrige Rundungsgrade. In diesem Fall entspricht das höchste Maximum der Rundungsgradverteilung innerhalb einer Kornklasse deren mittlerem Rundungsgrad.

Korngrößenverteilung und Rundungsgrad können auch aus gestörten Proben gemessen werden, z.B. indem man etwas Sediment auf einer Glasplatte verteilt.

6.3.2.2 Analyse der Grenzen

Mit der Funktion „PERIMETER“ kann der Umfang von Flächen bestimmt werden. Bei getrennten Einzelkörnern resultiert daraus die Verteilung der Oberflächenrauigkeit. Ohne Trennung bildet die Summe des Umfangs aller Kornflächen gegenüber der Gesamtfläche ein Maß für die innere Oberfläche des Sedimentes gegenüber dem Porenraum. Genau diese Oberfläche ist entscheidend für die Bindungskräfte zum Bodenwasser. Von dem Ansatz ausgehend, daß in einem homogenen, isotropen Sediment beliebige Schnitte gleiche Verhältnisse von Umfang zu Querschnittsfläche erzeugen, ist der gemessene Wert mit der Einheit $[\text{m}/\text{m}^2]$ identisch mit der dreidimensionalen Einheit $[\text{m}^2/\text{m}^3]$. Dagegen wird die spezifische Oberfläche in $[\text{m}^2/\text{g}]$ angegeben (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002).

Der einfachste Algorithmus besteht darin, alle Kornflächen zu selektieren, um eine Pixelreihe zu verkleinern, und dann diese Flächen zu subtrahieren. Die Gesamtlänge der übriggebliebenen Pixelreihen läßt sich aus einer Farbstatistik berechnen.

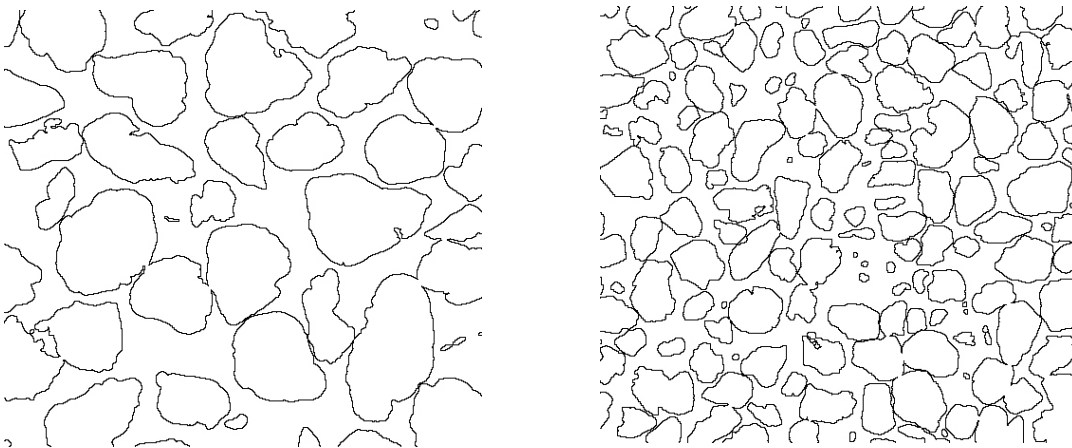


Abb. 52 a, b: Bildanalyse von Grenzen: Der Vergleich von a) Probe G zu b) Probe F zeigt, daß in der Regel mit der Korngröße die Oberfläche des Korngerüstes abnimmt und der Rundungsgrad zunimmt.

Stellt man sich die Oberfläche des Korngerüstes als Ebene vor, kann man für dünne Wasserfilme das Volumen und die Bindungskräfte mit dem Abstand zur Oberfläche berechnen.

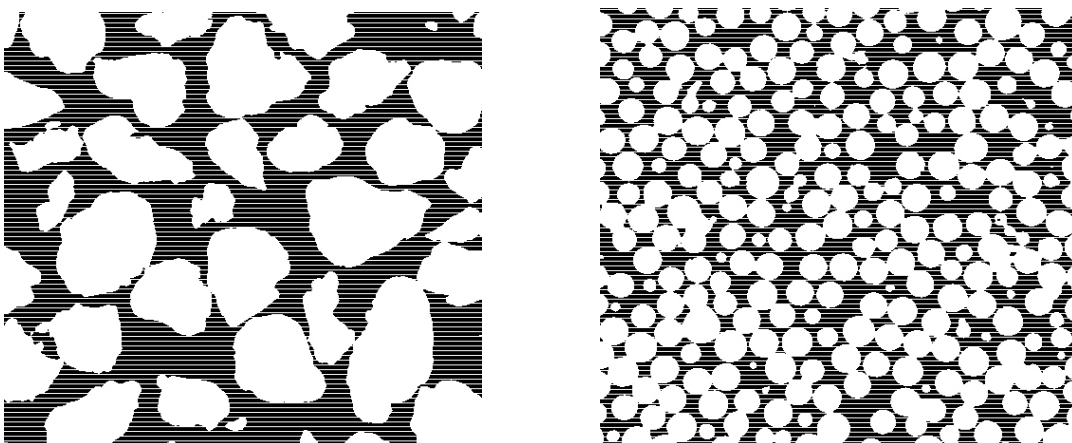


Abb. 53 a, b: Bildanalyse der Porenraumstruktur: Vom vorgegebenen Linienraster wurde die Kornstruktur von a) Probe G und b) Probe K subtrahiert. Aus den entstehenden Einzelobjekten werden Äquivalentdurchmesser der Porenstruktur abgeleitet.

6.3.2.3 Porenraumanalyse

Da der Porenraum als Negativstruktur des Korngerüstes ein heterogenes Kontinuum darstellt, läßt es sich schlecht in geometrische Einzelobjekte zerlegen. Denkbar ist eine Auffüllung der Porenraumstruktur mit

immer kleiner werdenden Äquivalentobjekten. Ein weiterer Weg ist, für jeden Punkt des Porenraumes die Bindungs- und Kapillarkräfte zu berechnen. Während durch CT-Aufnahmen die tatsächlichen Porenkanäle reproduziert werden, erzeugt eine Reduktion auf ein oder zwei Dimensionen einen statistischen Fehler, der etwas größere Poren anzeigt.

Eine sehr einfache Strukturanalyse wurde folgendermaßen ausgeführt: Von einem Linienraster wurden die Kornflächen subtrahiert (siehe Abb. 53), die Längen der dadurch im Porenraum verbliebenen Einzelobjekte wurden statistisch ausgewertet. Die Längen entsprechen dabei den Äquivalentporendurchmessern. Aus der Häufigkeitsverteilung multipliziert man die Klassenanzahl mit ihrer Äquivalentquerschnittsfläche und normiert die Summenkurve auf die tatsächliche Porenraum-Querschnittsfläche. Dies ergibt eine Näherung für die Porenraumverteilung (siehe Abb. 54), jedoch sind die Porendurchmesser insgesamt zu groß.

Um die Heterogenität von Schichtungen zu erfassen, muß bereichsweise vorgegangen werden, bei Anisotropien durch Einregelung und Schichtung muß aus verschiedenen Richtungen gemessen werden. Dies gilt natürlich auch für die Sedimentstruktur.

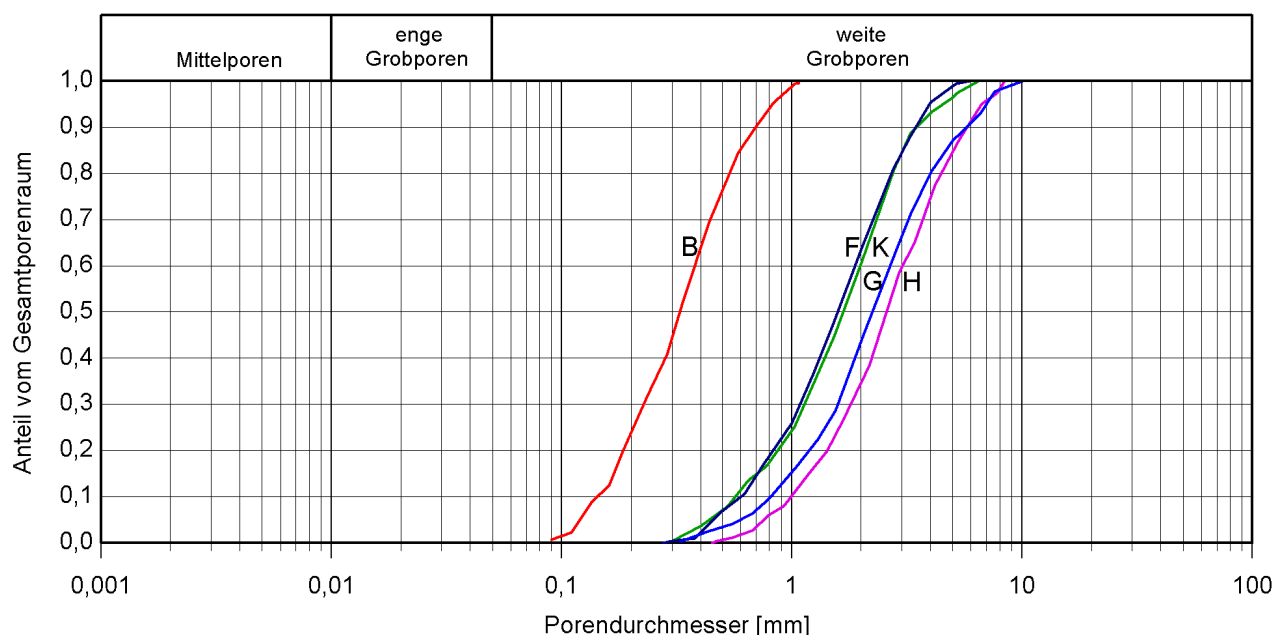


Abb. 54: Porenraumverteilung. Summenkurven der Äquivalentporendurchmesser der untersuchten Proben, normiert auf den Gesamtporenraum.

6.3.2.4 Ergebnisse der Analyse

Aus der Porenraumverteilung kann der Median als mittlere Porengröße entnommen werden. Für durchflußwirksame Kenngrößen müssen die größten Porenkanäle ausgewertet werden, z.B. anhand der Percentile bei 90% der Summenkurve. Die angewendete Methode erfaßt die Porenraumstruktur nur eindimensional und erzeugt zu große Äquivalentvolumina.

Der Vergleich der Porenanteilbestimmung durch Luftpyknometer und Bildanalyse (siehe Tab. 13) zeigt eine deutliche Übereinstimmung. Die Abweichungen sind einerseits auf die Ungenauigkeit der Pyknometermessung (hier: Mittelwerte), andererseits auf die Variationsbreite der Proben zurückzuführen.

Die Oberfläche des Korngerüsts wurde nur für die primären Porenräume bestimmt, Strukturen im Korn konnten eliminiert werden. Somit hängt die Oberfläche neben der Korngrößenverteilung und dem Rundungsgrad von der Oberflächenrauigkeit der Feststoffmatrix ab.

Tab. 12: Ergebnisse der Bildanalyse. Porenanteil bestimmt mit Photoshop 4.0, in Klammern befindet sich der Vergleichswert von Luftpyknometer-Messungen. Oberfläche des Korngerüsts ermittelt mit LECO 2003 von JUNG (1997), Rundungsgrad gemittelt, mittlere Porengröße entspricht dem Median der Porengrößenverteilung.

Ergebnisse der Bildanalyse					
Versuch	Kennung	Porenanteil n [-]	Oberfläche [mm ² /mm ³]	Rundungsgrad [-]	mittlere Porengröße [mm]
V 5-1	G	0.41 (0.42 ± 0.01)	0.903	0.75 ± 0.1	1.22
V 5-2	F	0.43 (0.41 ± 0.01)	1.841	0.85 ± 0.05	1.4
V 5-3	B	0.43 (0.43 ± 0.01)	4.275	0.80 ± 0.05	0.32
V 5-4	H	0.32 (0.36 ± 0.02)	0.671	0.80 ± 0.1	1.26
V 5-5	K	0.45 (0.44 ± 0.01)	1.683	0.98 ± 0.02	1.5

Modellhaft wurde die gemessene Oberfläche mit einem Adsorptionswasserfilm (0.19 µm) überzogen und der Volumenanteil berechnet. In gleicher Weise wurde mit 1.5 µm der Bereich des Porenwinkelwassers berechnet. In das Porenraummodell (Abb. 55) wird die volumetrische Summenkurve der Porengrößenverteilung (PGV) in Abhängigkeit vom Äquivalentporendurchmesser aufgetragen.

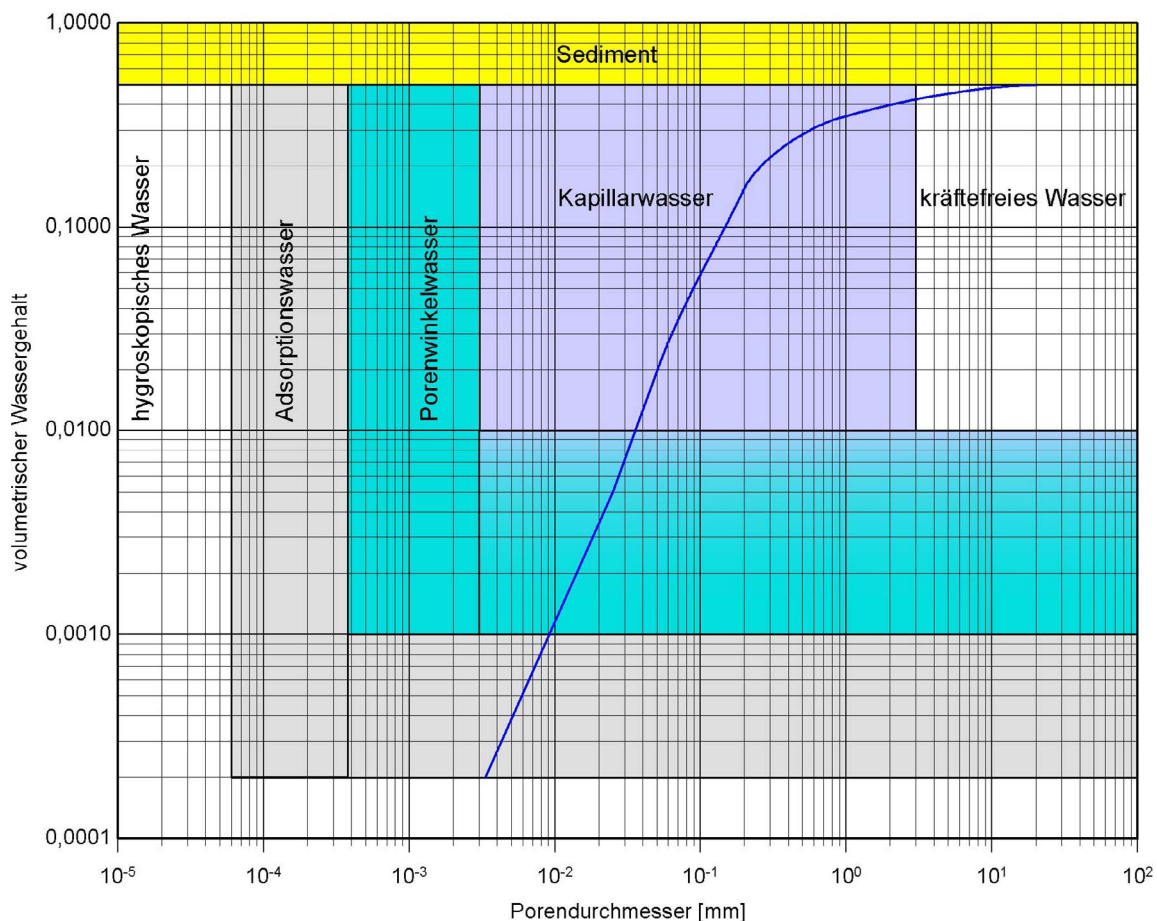


Abb. 55: Modell der wirksamen Kräfte im Bodenwasser. In Richtung der x-Achse sind die Bindungskräfte in Abhängigkeit zum Äquivalentporendurchmesser aus Abb. 4 berücksichtigt. In Richtung der y-Achse werden die volumetrischen Anteile der Porenraumbereiche angezeigt. Die Funktion entspricht der volumetrischen Summenkurve einer Porengrößenverteilung, die hier einem Sediment ohne Feinkornanteil entspricht.

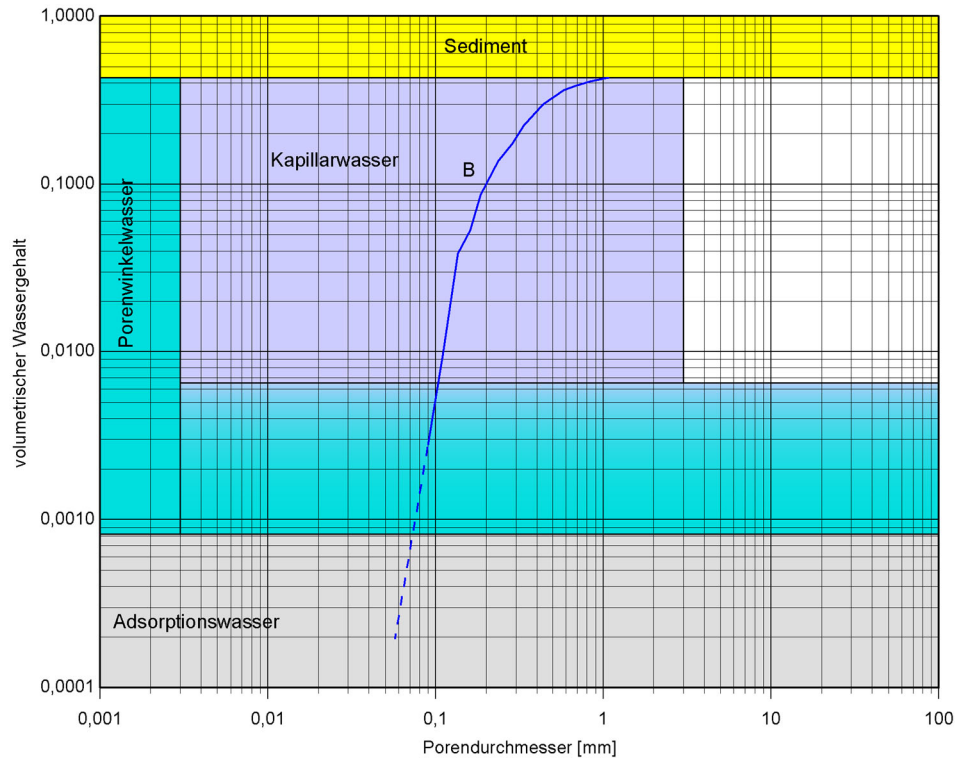


Abb. 56: Porenraummodell von Material B: Das Modell zeigt die volumetrische Verteilung der Bindungskräfte in Abhängigkeit vom Wassergehalt. (Gestrichelte Linie extrapoliert).

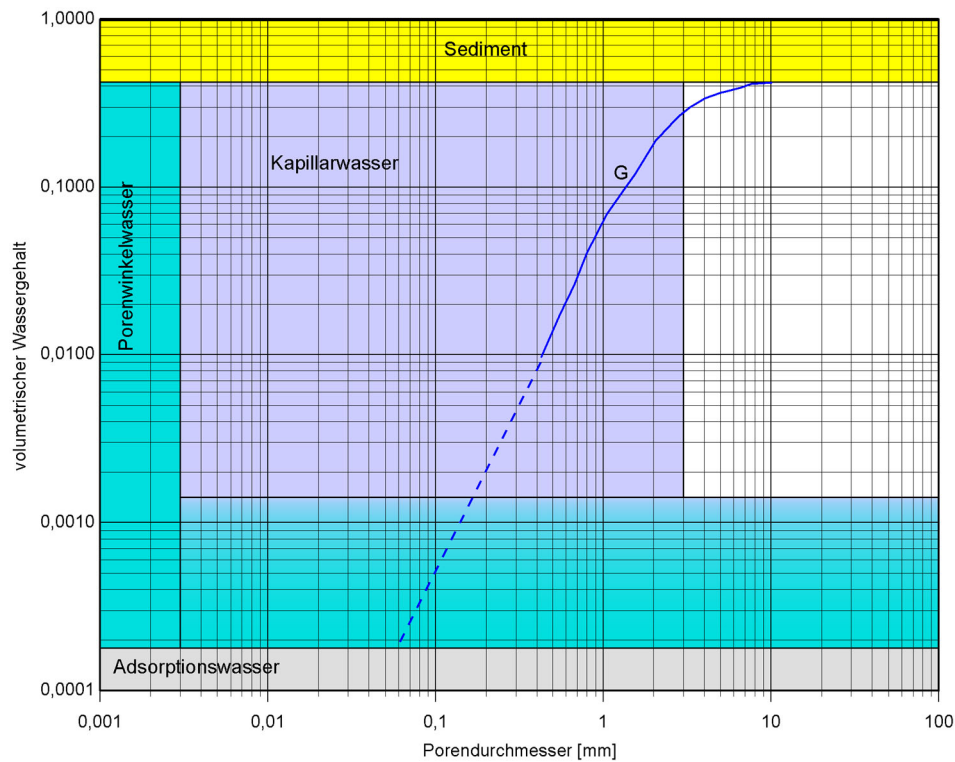


Abb. 57: Porenraummodell von Material G: Vergleichsweise zu Abb. 56 ist der Anteil der an die Sedimentoberfläche gebundenen Wassergehalte niedriger. Die Funktion reicht weiterhin in den kräftefreien Bereich. (Gestrichelte Linie extrapoliert).

Das verwendete Modell zeigt für jeden volumetrischen Wassergehalt, welche Kräfte auf die verschiedenen Wasseranteile potentiell wirken. Aus der Porengrößenverteilung leiten sich nach Gleichung (25) die kapillare Steighöhe und das Matrixpotential (Kapitel 2.3.5) ab. Da im Sediment mit Tensiometern die Saugspannung bestimmt werden kann, zeigt Abbildung 58 den volumetrischen Wassergehalt als Funktion der Saugspannung.

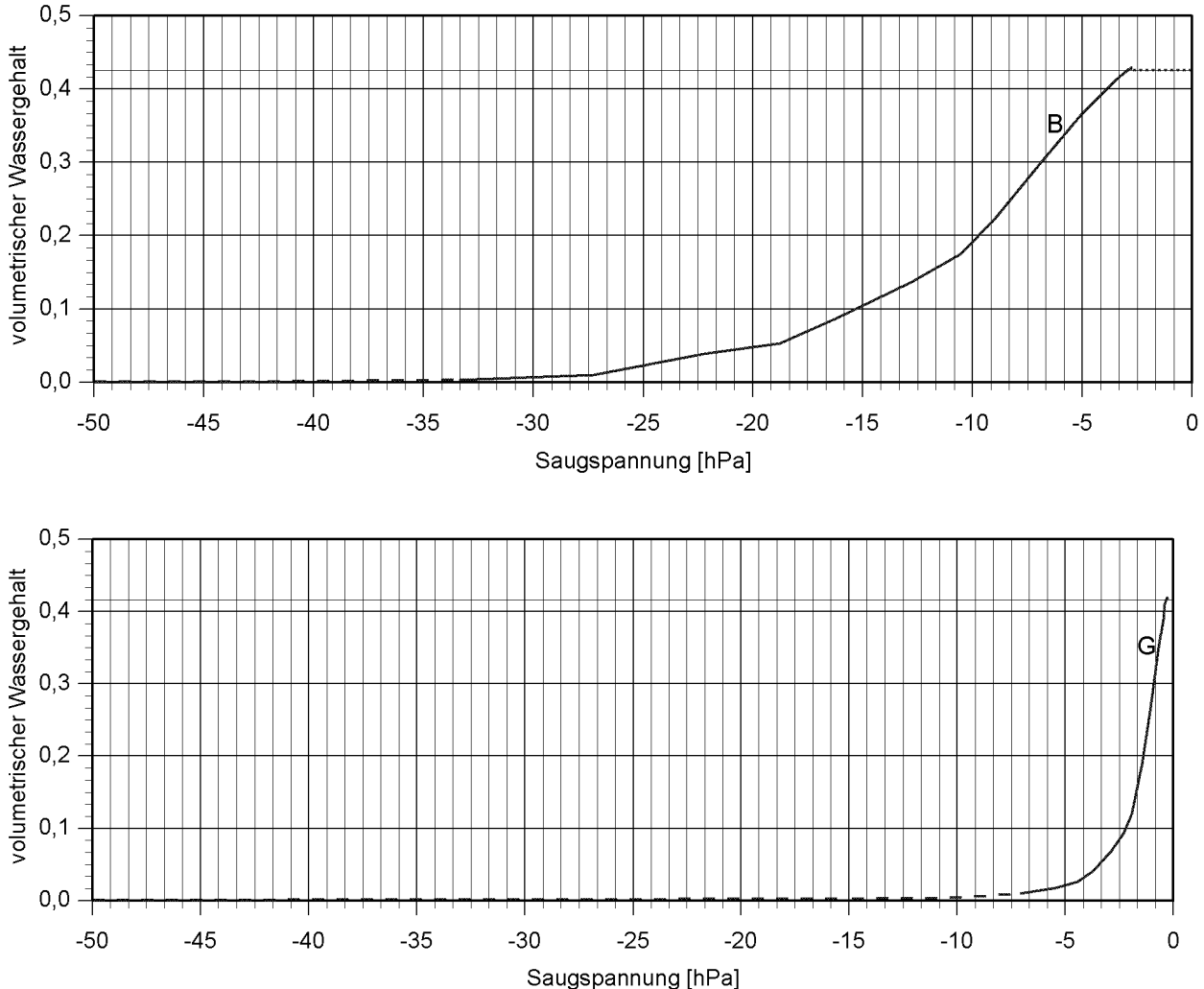


Abb. 58 a, b: Saugspannungskurve des Modells: Vergleichsweise der Zusammenhang von volumetrischem Wassergehalt und Matrixpotential von a) Material B und b) Material G.

Da der Wassergehalt auch den Strömungsquerschnitt bestimmt, kann näherungsweise der Durchlässigkeitsbeiwert k_u der ungesättigten Zone (Gleichung 47, 48) über den Sättigungsgrad θ_{rel} (Gleichung 21) anteilig vom Durchlässigkeitsbeiwert k_f der gesättigten Zone (Gleichung 42) bestimmt werden. Dieser in Gleichung 59 dargestellte Zusammenhang gilt nur für unveränderte Viskositäten, für die Wassergehalte, die der Adsorption und Adhäsion unterliegen, müssen die in Kapitel 2.3.7 beschriebenen physikalischen Eigenschaften berücksichtigt werden.

$$(59) \quad k_u = \theta_{rel} \cdot k_f \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Ist dieser Bereich jedoch mengenmäßig vernachlässigbar und die benötigten Wassergehalte nicht zu niedrig, lässt sich, wie in Abbildung 59 zu sehen, der Durchlässigkeitsbeiwert in Abhängigkeit vom

Matrixpotentials berechnen. Der Adsorptionswassergehalt (siehe Abb. 56, 57) wurde für den untersuchten Wassergehaltsbereich bei weitem nicht erreicht.

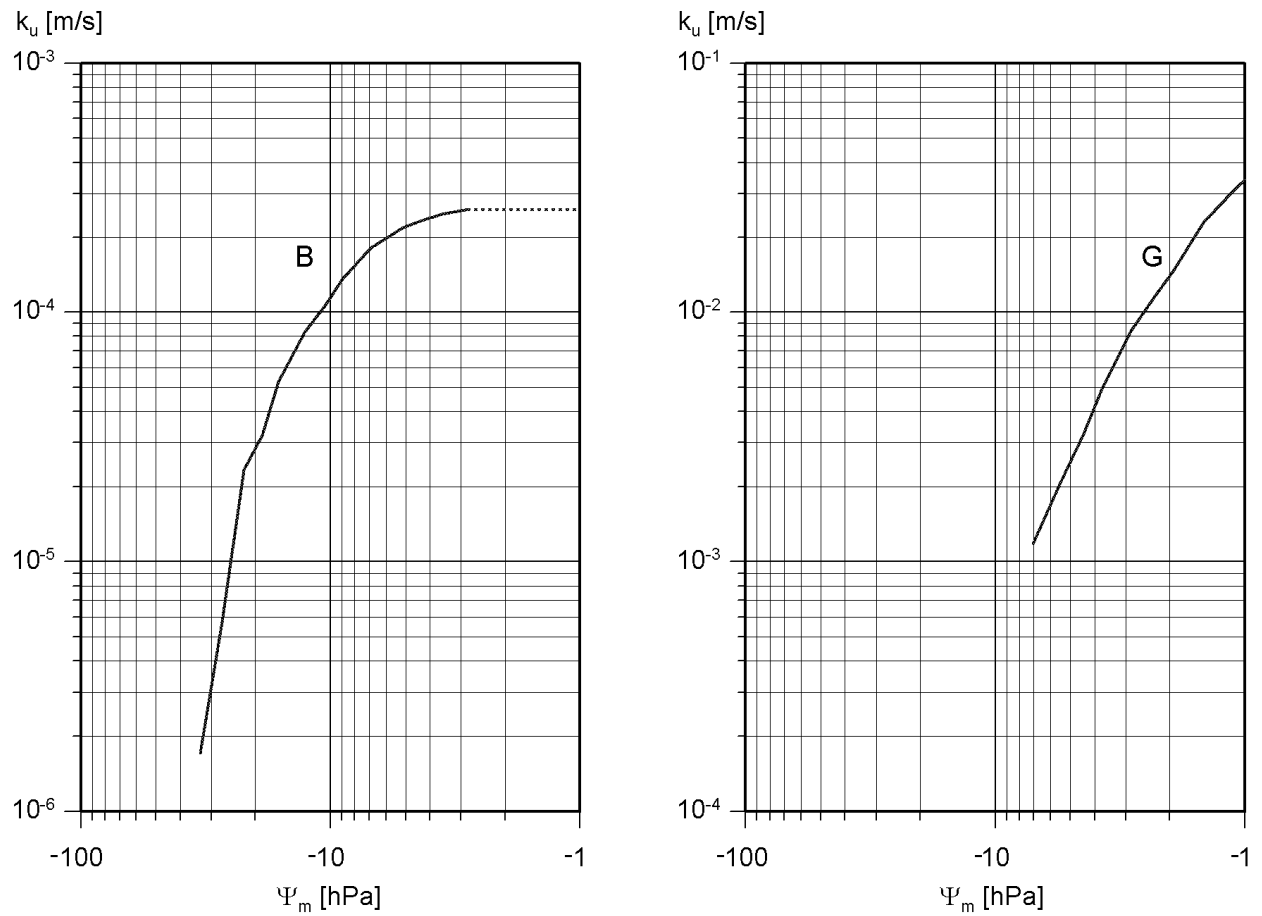


Abb. 59 a, b: Durchlässigkeitsbeiwert des Modells. Vergleichsweise die berechneten Funktionen der Durchlässigkeitsbeiwerte im ungesättigten Fall in Abhängigkeit vom Matrixpotential von a) Material B und b) Material G.

Alle aus der Bildanalyse gewonnenen Funktionen und Parameter können über die Schnittstelle der Parameterübergabe (siehe Abb. 36) an numerische oder analytische Berechnungen übergeben werden.

6.4 Vorteile optischer Verfahren

Der Systemansatz der optischen Verfahren bildet gegenüber den konventionellen Verfahren eine sinnvolle Ergänzung. Zur Berechnung der hydraulischen Eigenschaften eines Sedimentkörpers werden bisher, neben aufwendigen hydraulischen Tests, einfache Parameter des Korngerüsts und des Porenraumes verwendet. Durch die Bildanalyse können sie um die Messung von Porenraumstruktur und Grenzflächen sowie Heterogenitätsstatistiken erweitert werden können.

Die Korngrößenverteilung wird durch Kombination von Siebverfahren sowie Sedimentationsverfahren bestimmt. Optische Messverfahren mit dem Laserpartikelsizer und der Bildanalyse bilden eine zukunftsweisende Alternative, da sie schneller durchgeführt werden können.

Besonders die direkte Bestimmung des Porenraumes ist mit Schwierigkeiten verbunden. Bisherige Druckstufenverfahren sind sehr aufwendig, das Pyknometer liefert lediglich den Summenparameter n .

Eine empirische Näherung für die Porenraumverteilung aus Korngrößenverteilung und Lagerungsdichte wurde von M. RENGER (1971) bestimmt. Die Lagerungsdichte (L_a) wird hier allerdings durch die folgende Formel

$$(60) \quad L_a = \rho_D + 0.9 \cdot m_{C,rel} \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

ausgedrückt, wobei der Massenanteil der Tonfraktion ($m_{C,rel}$) aus der Kornsummenkurve abgelesen werden kann. Er entspricht der Masse der Tonfraktion m_C geteilt durch die Feststoffmasse m_S :

$$(61) \quad m_{C,rel} = \frac{m_C}{m_S} \quad [-]$$

In Tabelle 14 werden die Formeln für den Geltungsbereich $L_a = 1.75-1.40$ aufgezeigt, genaugenommen sind sie für Werte um $\rho_D = 1.60$ am besten anwendbar:

Tab. 13: Berechnung der Porenvolumenanteile aus der Korngrößenverteilung. Dabei werden als Eingangsparameter die Massenanteile der Tonfraktion ($m_{C,rel}$) und der Schlufffraktion ($m_{U,rel}$) verwendet (Geltungsbereich für $L_a = 1.75-1.40$).

Porendurchmesser	Porenvolumenanteil aus CUSG-Verteilung
< 0.2 μm	$67 \cdot m_{C,rel} - 0.2 \cdot m_{C,rel}^2 + 2 \cdot m_{U,rel} + 3$
< 10 μm	$57 \cdot m_{C,rel} + 14 \cdot m_{U,rel} + 12.5$
< 50 μm	$27 \cdot m_{C,rel} + 3 \cdot m_{U,rel} + 19$
Gesamtvolumen	$25 \cdot m_{C,rel} + 2 \cdot m_{U,rel} + 39$

Hierbei ist anzumerken, daß die Bestimmung der Feinporen zuverlässiger ist, als die der Grobporen beziehungsweise des Gesamtporenvolumens, da letztere stärker von Rißbildung und Aggregatgefüge abhängt.

Auf der Kostenseite ist der Vergleich zwischen Druckstufenverfahren und Bildanalyse besonders deutlich. Für eine Analyse reicht ein herkömmlicher Rechner mit einer Bildanalysesoftware und einem Flachbettscanner aus, für bestimmte Analysen genügt ein Fotobearbeitungsprogramm mit Statistik. Diese Komponenten werden mit großem Fortschritt ebenso wie die Tomographie weiterentwickelt.

Gegenüber den ähnlich preiswerten und zeitsparenden Methoden stellen Bildanalyse und Tomographie eine deutliche qualitative Verbesserung der bisherigen Bestimmung von Porenraum und Heterogenitäten (z.B. der Dichteverteilung) dar.

Ein weiterer Vorteil der Bildanalyse besteht darin, daß gegenüber Labormethoden viele Parameter gleichzeitig aus einer Probe gewonnen werden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die physikalische Bestimmung der Hydraulik und Strömung der ungesättigten Zone in Sedimentkörpern ist Grundlage der Berechnung und Modellierung von Bodenwasser-, Schadstoff- und Wärmetransport.

Dabei spielen die Struktur des Porenraumes und die Eigenschaften der Kornoberflächen eine entscheidende Rolle. Durch Desorptionsmessungen und Tankversuche konnten, unter Berücksichtigung der besonderen Bedingungen im Labor (Temperatur, Mikroorganismen), verwertbare zweidimensionale Ergebnisse erzielt werden. Bei der Auswertung dieser sowie bei der Anwendung von optischen Verfahren konnten hier neue Ansätze für eine Bestimmung der Porenraumeigenschaften aufgezeigt werden.

Bei den optischen Verfahren zeigte die zerstörungsfreie Methode der Computer-Tomographie ein zukünftig praktikables Konzept, da gegenüber dem verwendeten Tomographen bei der optischen Auflösung noch große Entwicklungspotentiale physikalisch möglich sind. Die analytische Auswertung mit eingescannten Anschliffen ist dagegen mit einer Probenaufbereitung verbunden, zeichnet sich aber auch durch starke Automatisierung (Zeiteinsparung) und geringe Kosten, vor allem bei hoher Probenanzahl, aus.

Die Anwendung der verschiedenen Methoden konnte den Zusammenhang von Porenraumstruktur und Strömungseigenschaften darstellen:

Die Messungen der Hydraulik ergaben, daß in einem zusammenhängenden Wasserfilm auf den Kornoberflächen schnelle hydraulische Ausgleichsbewegungen stattfinden. Die gebräuchliche d10-Percentile der Korngrößenverteilungskurve ist ein empfehlenswerter Eingangsparameter für die Quantifizierung der Geschwindigkeit und Homogenität (bzw. Gradienten) dieses Potentialausgleichs. Die Versuche zeigten, daß mit zunehmendem Schluffanteil in den verwendeten Materialien eine Abnahme von Heterogenitäten und kapillaren Abrissen einherging.

Durch die optischen Verfahren konnten die komplexen strukturellen Eigenschaften (bis zur Grenze der optischen Auflösung) schnell und vielseitig verwendbar erfaßt werden. So konnten unter anderem die Porengrößenverteilung und die Gesamtkornoberfläche ermittelt werden, was mit konventioneller Messtechnik sehr aufwendig ist. Daraus konnte ein Modellansatz für die hydraulischen Eigenschaften des Sedimentes entwickelt werden. Zur Verbesserung des Verfahrens kann der verwendete Algorithmus Dank moderner Rechner gegen eine komplexere Berechnung ausgetauscht werden. Eine deutliche Verbesserung würde schon eine statistische Auswertung mit Kreisflächen oder Kreuzen als Berechnungsbasis bewirken.

Die Bestimmung des Massenstromes zeigte bei den Tankversuchen eine deutliche Heterogenität, die aber in ihrem Umfang definierbar war. Das Modell der bildanalytischen Auswertung kann hier eine Funktion für den Durchlässigkeitsbeiwert liefern.

Beim Vergleich der Messdaten und dem analytischen Modell ergeben sich noch starke Differenzen, das Modell scheint die Feinkornanteile nicht zu berücksichtigen. Die Ursache ist in diesem Fall einerseits in der Probenaufbereitung zu sehen, da hier Feinkornanteile verloren gingen, andererseits sind Feinschluffanteile zu dicht an der Auflösungsgrenze der verwendeten Optik und werden daher bisher nicht mitberechnet. Für eine Verfeinerung des Verfahrens sind die physikalischen Grenzen noch nicht erreicht, die größten Entwicklungspotentiale sind jedoch im Analyseprogramm zu sehen. Eine weitere Verbesserung kann hier auch durch eine 3D-Analytik erreicht werden. Die digitale Struktur kann dann direkt in ein numerisches Programm transferiert werden.

Weiterhin ist es mit Tomographen auch möglich, die Struktur des Wassers im Porenraum direkt aufzunehmen. Die heutigen Computer-Tomographen der vierten Generation besitzen eine Ortsauflösung unter 0,2 mm und zeitliche Auflösung im Bereich einer Sekunde. Durch Verbesserung der Geräte und eine entsprechende Justierung sind in Zukunft Ortsauflösungen im Bereich von 1-10 µm machbar. Die physikalische Grenze liegt erst im Bereich der verwendeten Wellenlänge. Der von J. PERRET et al. (2000) verwendete SPEC-Tomograph besitzt zwar nur eine Ortsauflösung von 2 mm, aber eine zeitliche Auflösung im Bereich von 2 ms. Dadurch sind Messungen von dynamischen Strömungszuständen möglich.

8 Literaturverzeichnis

- BAHR, T. (1997): Hydrogeologische Untersuchungen im Skeiðarársandur (Südisland). Münchner Geologische Hefte, Reihe B: Angewandte Geologie, Spaun, G., Miller, H., Wohnlich, S. [Hrsg.]. XIV + 142 S., 67 Abb., 7 Tab.; München.
- BAUER, E. (2001): Eignung verschiedener Materialien für Kapillarsperren - Materialenauswahl und Dimensionierung. Münchner Geologische Hefte, Reihe B: Angewandte Geologie, Spaun, G., Miller, H., Wohnlich, S. [Hrsg.]. XII + 142 S., 41 Abb., 39 Tab.; München.
- BAUER, E. & WOHNLICH, S. (1998): Anwendung von Recycling Materialien in Kapillarsperren für Oberflächenabdichtungen in Deponien - Auswahlverfahren und Gütekriterien von Baustoffen für Kapillarsperren am Beispiel von Recyclingmaterialien. BayFORREST Berichtschrift, Nr. 9, S. 395-404; TU München.
- BAUMANN, T. (Editor, 2000a): Institut für Wasserchemie und Chemische Balneologie, Lehrstuhl für Hydrogeologie, Hydrochemie und Umweltanalytik, Jahresbericht 2000. TU München.
- BAUMANN, T. (Editor, 2002): Institute of Hydrochemistry, Chair of Hydrogeology, Hydrochemistry and Environmental Analytical Chemistry, Annual Report 2002. TU München.
- BAUMANN, T., PETSCH, R. & NIEßNER, R. (2000b): Direct 3-D Measurement of the Flow Velocity in Porous Media Using Magnetic Resonance Tomography. Environmental Science & Technology, Nr. 34, S. 4242-4248.
- BAUMANN, T., PETSCH, R., FESL, G. & NIEßNER, R. (2000c): Flow and Diffusion Measurement in Natural Porous Media Using Magnetic Resonance Imaging. Journal of Environmental Quality, Nr. 31, S. 470-476.
- BEDNAR, T. (2000): Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden. Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, TU Wien.
- BETSON, M., JUPE, A., BARNES, P. & ATKINSON, T. (2001): Examining pore scale tracer movement with X-ray diffractive tomography, in: Seiler, K.-P. & Wohnlich, S. [Hrsg.], New Approaches Characterizing Groundwater Flow, Vol. 1 – 1. Aufl., S. 15-18, Swets & Zeitlinger B.V., Lisse, The Netherlands.
- BÖHM, B. (1997): Die Heterogenität von Fließwegen in der ungesättigten Zone und deren Beeinflussung durch mikrobielle Aktivität. Unveröff. Dipl.-Arbeit Inst. Allg. Angew. Geol. Univ. München. 73 S., 54 Abb.; München.
- BUSCH, K. F., LUCKNER, L. & TIEMER, K. (1993): Geohydraulik - MATTHESS, G. [Hrsg.]: Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 3, 3. Aufl., XIII + 497 S., 238 Abb., 50 Tab.; Bornträger, Stuttgart, Berlin.
- CARMELIET, J. & ROELS, S. (2002): Determination of the Moisture Capacity of Porous Building Materials. Journal of Thermal Envelope & Building Science, Nr. 25, S. 209-237.
- CASAGRANDE, A. (1934): Die Aräometer-Methode zur Bestimmung der Kornverteilungen von Böden und anderen Materialien. 56 S., 20 Abb.; Springer, Berlin.
- CHABR, T. (1996): 3D Electrical Conductivity Measurement in the Unsaturated Zone. TEMPUS project JEP 08330, 31 S., unveröffentlichter Bericht z. Studienaufenthalt a. d. Ludwig-Maximilians-Universität München.
- DIN 1054 (2003): Baugrund – Sicherheitshinweise im Erd- und Grundbau. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg.]; Berlin.
- DIN 4022-1 (1987): Baugrund und Grundwasser: Benennen und Beschreiben von Boden und Fels. Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernteten Proben im Boden und im Fels. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg.]; Berlin.
- DIN 4023 (1984): Baugrund- und Wasserbohrungen: Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg.]; Berlin.

- DIN 4044 (1980): Hydromechanik im Wasserbau, Begriffe. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIN 4047-1 (1993): Landwirtschaftlicher Wasserbau, Begriffe, allgemeine Begriffe. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIN 4049-1 (1992): Hydrologie: Grundbegriffe. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie – Teil 3, Begriffe zur quantitativen Hydrologie. . Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIN 18121-1 (1998): Untersuchung von Bodenproben – Wassergehalt – Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIN 18121-2 (2001): Baugrund - Untersuchungen von Bodenproben, Wassergehalt – Teil 2: Bestimmung durch Schnellverfahren. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIN 18123 (1996): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIN 18124 (1997): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korndichte – Kapillarpyknometer, Weithalspyknometer. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIN 18125-1 (1997): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 1: Laborversuche. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIN 18126 (1996): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIN 18130-1 (1996): Baugrund – Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes – Teil 1: Laborversuche. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIN 18196 (1988): Erd- und Grundbau: Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin. Bestimmung der Korngrößenverteilung.
- DIN 19682-5 (1997): Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau, Bestimmung des Feuchtezustands des Bodens. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIN 19683-13: Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau – Physikalische Laboruntersuchungen – Teil 13: Bestimmung des Substanzanteils, Porenanteils und der Porenziffer. .Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIN ISO 3310-1 (2001): Analysensiebe – Technische Anforderungen und Prüfung – Teil 1: Analysensiebe mit Metalldrahtgewebe. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIN ISO 3310-2 (2001): Analysensiebe – Technische Anforderungen und Prüfung – Teil 2: Analysensiebe mit Lochblechen. Deutsches Institut für Normung e. V. [Hrsg]; Berlin.
- DIRKSEN, C. (1991): Unsaturated Hydraulic conductivity; in: K. A. Smith & C. E. Mullins [Hrsg]; Soil Analysis: Physical Methods. 1. Aufl., S. 209-268; Marcel Dekker Inc., New York.
- DONTSOVA, K. M., NORTON, L. D., JOHNSTON, C. T. & BIGHAM, J. M. (2004): Influence of Exchangeable Cations on Water Adsorption by Soil Clays. Soil Science Society of America Journal, Nr. 68, S. 1218-1227.
- DVORAČEK, P. (1995): Heterogenous Flow in Sediments - 2D Laboratory Measurements of Heterogenous Water Flow in Sediments. TEMPUS project JEP 08300, 22 S. Unveröff. Bericht z. Studienaufenthalt a. d. Ludwig-Maximilians-Universität München.
- EDENHARTER, M. (1997): Laborversuche zur Bestimmung der Heterogenität des Stofftransportes in der ungesättigten Zone. Unveröff. Dipl.-Arbeit Inst. Allg. Angew. Geol. Univ. München, 109 S.; München.
- FETTER, C. W. (2001): Applied Hydrogeology. 4. Aufl., XVIII + 691 S.; Prentice Hall International.
- FETTER, C. W. (1998): Contaminant Hydrogeology, 2. Aufl., XI + 500 S., Prentice Hall International.

- FÜCHTBAUER, H. (1988): Sedimente und Sedimentgesteine. Sediment-Petrologie II. 4. Aufl., 1141 S.; Schweizerbart, Stuttgart.
- GARNIER, P., EZZINE, N., DE GRYZE, S. & RICHARD, G. (2004): Hydraulic Properties of Soil-Straw Mixtures. *Vadose Zone Journal*, Nr. 3, S. 714-721.
- HÄUPL, P. & FECHNER, H. (2003): Hygric Material Properties of Porous Building Materials. *Journal of Thermal Envelope & Building Science*, Nr. 26, S. 259-284.
- HARTGE, K. H. (1969): Die Ermittlung der Wasserspannungskurve aus der Körnungssummenkurve und dem Gesamtporenvolumen. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung*, 10: 20-27.
- HARTGE, K. H. & HORN, R. (1996): Einführung in die Bodenphysik. 3. Aufl., 320 S., 159 Abb.; Enke, Stuttgart.
- HAZEN, A. (1893): Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration. *Ann. Rep. Mass. State Bd. Health* 24: 541-556, Boston.
- HERRMANN, K.-H., POHLMEIER, A., WIESE, S., SHAH, N. J., NITZSCHE, O. & VERECKEN, H. (2002): Three Dimensional Nickel Ion Transport through Porous Media Using Magnetic Resonance Imaging. *Journal of Environmental Quality*, Nr. 31, S. 506-514.
- HÖLTING, B. (1995): Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 5. Aufl., XIII + 441 S., 114 Abb.; Enke, Stuttgart.
- JUNG, D. (1997): Auswertung und Darstellung von Sediment- und Porenraumstruktur mit Hilfe der Bildanalyse. Unveröff. Dipl.-Arbeit Inst. Allg. Angew. Geol. Univ. München, 65 S.; München.
- KRUS, M. (1995): Feuchttransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart.
- KUCHLING, H., (2004): Taschenbuch der Physik. 18. Aufl.; Hanser Fachbuchverlag, Fachbuchverlag Leipzig.
- KUNTZE, H., ROESCHMANN, G. & SCHWERDTFEGER, G. (1994): Bodenkunde. 5. Aufl., 424 S., 178 Abb., 188 Tab., 4 Farbtafeln; Ulmer, Stuttgart.
- LANGGUTH, H. R. & VOIGT, R. (2004): Hydrogeologische Methoden. 2. Aufl., XIV + 1005 S., 304 Abb.; Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- LECO (1992): LECO 2001 Handbuch, Version 2.01.
- LIU, S. & YEH, T.-C. J. (2004): An Integrative Approach for Monitoring Water Movement in the Vadose Zone. *Vadose Zone Journal*, Nr. 3, S. 681-692.
- MATTHESS, G. & UBELL, K. (2003): Allgemeine Hydrogeologie - Grundwasserhaushalt - Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 1, 2. Aufl., 575 S., 249 Abb., 83 Tab.; Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- MERTENS, F. & LÖSCHER, R. (1993): Biologie und Taxonomie der Bakterien und Pilze. 2. Aufl., Teil 1: Bakterien; Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.
- MORAN, C. J. & MCBRATNEY, A. B. (1992): Acquisition and analysis of three-component digital images of soil pore structure. I. Method, in: *Journal of Soil Science*, Nr. 43, S. 541-549.
- MORAN, C. J., MCBRATNEY, A. B. & KOPPI, A. J. (1989): A rapid method for analysis of soil macropore structure. I. Specimen preparation and digital binary image production; in: *Soil Science Society of America*, Nr. 53, S. 921-928.
- MUALEM, Y. & FRIEDMANN, S. P. (1991): Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. *Water Resources Research* 27 (10): S. 2771-2777.
- MULLINS, C. E. (2000): Matric Potential, aus: *Soil Analysis, Physical Methods*. Edition: K. A. Smith & C. E. Mullins, S. 65-93; Verlag Marcel Dekker Inc., New York.
- NESTLE, N., BAUMANN, T. & NIEßNER, R. (2002): Magnetic Resonance Imaging in Environmental Science. *Environmental Science & Technology*, Nr. 36, S. 154-160.

- PACE, M. N., MAYES, M. A., JARDINE, P. M., MEHLHORN, T. L., ZACHARA, J. M. & BJORNSTAD, B. N. (2003): Quantifying the Effects of Small-Scale Heterogeneities on Flow and Transport in Undisturbed Cores from the Hanford Formation. *Vadose Zone Journal*, Nr. 2, S. 664-676.
- PERRET, J., PRASHER, S. O., KANTZAS, A., HAMILTON, K. & LANGFORD, C. (2000): Preferential Solute Flow in Intact Soil Columns Measured by SPECT Scanning. *Soil Science Society of America Journal*, Nr. 64, S. 469-477.
- PRINZ, H. (1997): Abriß der Ingenieurgeologie - mit Grundlagen der Boden- und Felsmechanik, des Erd-, Grund- und Tunnelbaus sowie der Abfalldeponien. 3. Aufl., 546 S., 415 Abb., 84 Tab.; Enke, Stuttgart.
- RENGER, M. (1971): Die Ermittlung der Porengrößenverteilung aus der Körnung, dem Gehalt an organischer Substanz und der Lagerungsdichte. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, Bd. 130, Heft 1, S. 53-67; Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstraße.
- RETTINGER, S. (1991): Wasser- und Stoffdynamik bei der Abwasserperkolatation. Unveröff. Diss. TU München.
- RIEK, W., WESSOLEK, G., RENGER, M. & VETTERLEIN, E. (1995): Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität und Feldkapazität von Substrat-Horizontgruppen - eine statistische Auswertung von Labordatenbanken. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, Bd. 158, S. 458-491; VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim.
- RINGROSE - VOASE, A. J. & BULLOCK, P. (1984): The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs; in: *Journal of Soil Science*, Nr. 35, S. 673-684.
- RINGROSE - VOASE, A. J. (1990): One - dimensional image analysis of soil structure. I. Principles; in: *Journal of Soil Science*, Nr. 41, S. 499-512.
- ROBINSON, D. A., JONES, S. B., WRAITH, J. M., OR, D. & FRIEDMAN, S. P. (2003): A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry. *Vadose Zone Journal*, Nr. 2, S. 444-475.
- ROELS, S., CARMELIET, J., HENS, H., ADAN, O., BROCKEN, H., CERNY, R., PAVLIK, Z., HALL, C., KUMARAN, K., PEL, L. & PLAGGE, R. (2004): Interlaboratory Comparison of Hygric Properties of Porous Building Materials. *Journal of Thermal Envelope & Building Science*, Nr. 27, S. 307-325.
- ROELS, S., CARMELIET, J., HENS, H., ADAN, O., BROCKEN, H., CERNY, R., PAVLIK, Z., ELLIS, A. T., HALL C. & KUMARAN, K. (2004): A Comparison of Different Techniques to Quantify Moisture Content Profiles in Porous Building Materials. *Journal of Thermal Envelope & Building Science*, Nr. 27, S. 261-276.
- ROSENBERG, T. (1998): Laborversuche zur Bestimmung der Heterogenität der Strömung in der ungesättigten Zone. 130 S., Unveröff. Dipl.-Arbeit der Ludwig-Maximilians-Universität München.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Aufl., XIV + 607 S., 281 Abb., 1 Farbtafel; Enke, Stuttgart
- SCHLEGEL, H. G. (1992): Allgemeine Mikrobiologie. 7. Aufl., XIV + 634 S., 240 Abb.; Thieme, Stuttgart, New York.
- SCHOFIELD, R. K. (1935): The pF of the water in soil. *Trans. 3rd Int. Congr. Soil Sci.*, Nr. 2, S. 37-48.
- SCHÜLKE, A. (2001): Schülkes Tafeln. Bearb. von Wunderling, H. & Adelsberger, H., 59. Aufl., 85 S.; Teubner-Verlag, Stuttgart.
- SCHWARZ, R. C. & EVETT, S. R. (2002): Estimating Hydraulic Properties of a Fine-textured Soil Using a Disc Infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, Nr. 66, S. 1409-1423.
- SI, B. C. & KACHANOSKI, R. G. (2000): Unified Solution for Infiltration and Drainage with Hysteresis: Theory and Field Test. *Soil Science Society of America Journal*, Nr. 64, S. 30-36.

- STACHEDER, M. (1996): Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik. Messung von Wassergehalt, elektrischer Leitfähigkeit und Stofftransport. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, 40: XV + 170 S., 59 Abb., 17 Tab.; Karlsruhe.
- SU, G. W., GELLER, J. T., HUNT, J. R. & PRUESS, K. (2004): Small-Scale Features of Gravity-Driven Flow in Unsaturated Fractures. *Vadose Zone Journal*, Nr. 3, S 592-601.
- TORIDE, N., INOUE, M. & LEIJ, F. J. (2003): Hydrodynamic Dispersion in an Unsaturated Dune Sand. *Soil Science Society of America Journal*, Nr. 67, S. 703-712.
- TULLER, M. & OR, D. (2002): Unsaturated Hydraulic Conductivity of Structured Porous Media: A Review of Liquid Configuration-Based Models. *Vadose Zone Journal*, Nr. 1, S. 14-37.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. (1980): A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, Nr. 44, S. 892-898.
- WANG, Z., JURY, W. A., TULI, A. & KIM, D.-J. (2004): Unstable Flow during Redistribution: Controlling Factors and Practical Implications. *Vadose Zone Journal*, Nr. 3, S. 549-559.
- WENINGER, W. (1995): Laboruntersuchungen zur Verifikation feldgemessener Grundwasser- und Bodenfeuchtedaten aus Island. Unveröff. Dipl.-Arbeit Inst. Allg. Angew. Geol. Univ. München, VII + 45 S.; München.
- WOHNLICH, S., BAUER, E., FRANKE, C. & BRAUN, A. (1997): Anwendung von Recyclingmaterialien in Kapillarsperren für Deponieabdichtungen. Unveröff. Zwischenbericht zum BayFORREST-Projekt F 54 (F); München.

9 Anhang

9.1 Verwendete Software

Tab. A1: Für Messungen und Auswertungen verwendete Software.

Software	Hersteller	Bezeichnung, Beschreibung
Windows NT 4.0	Microsoft	Betriebssystem
Windows 3.1.1, 2000	Microsoft	Betriebssystem
MacOS 8.7	Apple Macintosh	Betriebssystem
Office 97, 98, 2000	Microsoft	Textverarbeitung
LC 2003	LECO	Bildanalyse
Photoshop 4.0, 5.0, CS	Adobe	Bildbearbeitung, Bildanalyse
Xact 3.0, 4.0, 8.0	SciLab	Datenauswertung, Berechnung, Vektor-Grafik
LabWindows	National Instruments	MSR-Programmiersoberfläche, Q-Basic
LabWindows CVI	National Instruments	MSR-Programmiersoberfläche, ANSI-C
MSR-Software	IAAG	Programm zur automatisierten Meßerfassung und Steuerung der Versuchsaufbauten

In Tabelle A1 ist die verwendete Software aufgelistet, das in ANSI-C geschriebene MSR-Programm ist eine Eigenentwicklung, die bei Prof. Dr. S. Wohnlich hinterlegt wurde.

9.2 Sedimentanalyse

In Tabelle A2 sind die sedimentologischen Untersuchungsergebnisse aller verwendeten Materialien zusammengefaßt.

Tab. A2: Zusammenfassung der Bestimmung der verwendeten Materialien. Im Text verwendete Kennung und Bezeichnung, die Zahl hinter Industriesiebungen entspricht der Maschenweite bei der Gewinnung. Haupt- und Nebenbestandteile: Qz = Quarz, Fs = Feldspäte, Ca = Karbonate, Kr = Kristalline Gerölle, Sk = Schichtsilikate. Percentilen aus der Korngrößenverteilung nach DIN 4022. Kornklasseneinteilung nach DIN 4023 und Kornkennziffer CUSG (PRINZ, 1982). Ungleichförmigkeit U nach DIN 1054 und Sortierungskoeffizient S_0 nach FÜCHTBAUER. Berechnung der Durchlässigkeit: k_f -Wert nach HAZEN (1893), bei Sediment D und E ist wegen der hohen Ungleichförmigkeit die Formel nach HAZEN nicht zulässig. für Sediment D wurde daher ein Standrohrversuch nach DIN 18130 durchgeführt. Feststoffdichte ρ_s nach DIN 18124, Trockendichte (Einbaudichte) ρ_D , Porosität n, Verdichtung D nach DIN 19683/18126, Beurteilung nach DIN 1054. Ungleichförmigkeit U nach DIN 1054. Alle Meßwerte wurden gemittelt. Zuordnung der Materialien zu den Versuchsreihen V1 bis V6.

Bestimmung der Korngrößenverteilung und Bestandteile												
Kennung	Bezeichnung	Bestandteile	Percentilen				Korngrößenklassen					
			d_{10} [mm]	d_{25} [mm]	d_{60} [mm]	d_{75} [mm]	CUSG	DIN 4023				
A	Sand/Schluff	Qz, Fs, Ca, Sk	0.013	0.032	0.071	0.09	0 5 5 0	U, fS, ms				
B	Industriequarzsand 0.1	Qz, Fs, Sk	0.15	0.2	0.35	0.39	0 0 10 0	mS, fs				
C	Industriequarzsand 0.6	Qz, Fs	0.74	0.8	0.95	1.1	0 0 10 0	gS				
D	Sandiger Kies	Ca, Kr, Qz, Fs	0.35	4.0	10.5	15	0 0 2 8	G, s				
E	Kiesig schluffiger Sand	Qz, Ca, Fs, Sk	0.07	0.18	0.45	1.15	0 1 7 2	S, fg, u				
F	Industriequarzsand 1.0	Qz, Fs	1.25	1.3	1.80	1.8	0 0 9 1	gS, fg				
G	Industriequarzkies 2.0	Qz, Fs	2.1	2.45	2.7	3.2	0 0 0 10	fG, gs				
H	Grobsandiger Kies	Ca, Kr	2.0	3.2	5.9	6.1	0 0 1 9	fG, mg, gs				
K	Glaskugeln 1 mm	Qz	1.0	1.0	1.0	1.0	0 0 10 0	gS				
Auswertung der Korngrößenverteilung												
Kennung	Bezeichnung	Ungleichförmigkeit		Sortierungsgrad		Durchlässigkeit (k_f [m/s])						
		U [-]	Beurteilung Ungleichförmigkeit	S_0 [-]	Beurteilung Sortierungsgrad	Hazen	DIN 18130	Beurteilung				
A	Sand/Schluff	5.5	ungleichförmig	1.68	mittelmäßig	2.0 E-6		durchlässig				
B	Industriequarzsand 0.1	2.3	gleichförmig	1.40	gut	2.6 E-4		stark durchlässig				
C	Industriequarzsand 0.6	1.3	gleichförmig	1.17	sehr gut	6.4 E-3		stark durchlässig				
D	Sandiger Kies	30	sehr ungleichförmig	1.94	schlecht	-	1.4 E-3	stark durchlässig				
E	Kiesig schluffiger Sand	6.4	ungleichförmig	2.53	sehr schlecht	5.7 E-5		durchlässig				
F	Industriequarzsand 1.0	1.4	gleichförmig	1.18	sehr gut	1.8 E-2		stark durchlässig				
G	Industriequarzkies 2.0	1.3	gleichförmig	1.14	sehr gut	5.1 E-2		stark durchlässig				
H	Grobsandiger Kies	2.9	gleichförmig	1.38	gut	4.6 E-2		stark durchlässig				
K	Glaskugeln 1 mm	1.0	gleichförmig	1	sehr gut sortiert	1.2 E-2		stark durchlässig				
Auswertung der Dichteverhältnisse												
Kennung	Bezeichnung	Dichte [g/cm ³]		n [-]	Verdichtung		Versuchsreihe					
		ρ_S	ρ_D		D [-]	Beurteilung	V1	V2	V3	V4	V5	V6
A	Sand/Schluff	2.43	1.38	0.37	0.41	locker	V1	V2-1				V6-1
B	Industriequarzsand 0.1	2.63	1.57	0.43	0.64	dicht		V2-2	V3-1	V4-3	V5-3	V6-2
C	Industriequarzsand 0.6	2.62	1.60	0.38	0.70	dicht			V3-2			
D	Sandiger Kies	2.79	1.96	0.20	0.41	locker			V3-3			
E	Kiesig schluffiger Sand	2.80	1.86	0.36	0.45	mitteldicht			V3-4			
F	Industriequarzsand 1.0	2.64	1.59	0.41	0.72	dicht					V5-2	
G	Industriequarzkies 2.0	2.67	1.57	0.42	0.56	dicht				V4-2	V5-1	
H	Grobsandiger Kies	2.75	1.78	0.36	0.64	dicht				V4-1	V5-4	
K	Glaskugeln 1 mm	2.67	1.52	0.43	(0.71)	(dicht)				V4-4	V5-5	

9.3 Versuchsaufbau der hydraulischen Versuche

9.3.1 Anlagenkomponenten

In Tabelle A3 sind die bei den hydraulischen Versuchen verwendeten Anlagenkomponenten aufgelistet. Darüber hinaus wurden Kunststoff-Wasserbehälter, verzinkte Untergestelle, Kunststoff-Folien, Silikon, Einwegspritzen und verschiedene Klebstoffe eingesetzt.

Tab. A3: Verwendete Anlagenkomponenten der Versuchsaufbauten.

Anlagenkomponente	Hersteller, Vertrieb	Bezeichnung, Beschreibung
Plexiglaskolonnen	IAAG	Ø 19 cm und 30 cm, Einbauhöhe: 65 cm, seitliche Bohrungen
Duranglaskolonnen	Schott Rohrglas	Ø 19 cm und 30 cm, Gesamthöhe: Bis zu 150 cm
Plexiglastank	IAAG	Grundfläche: 50 cm * 50 cm, Einbauhöhe: Bis zu 60 cm, seitliche Bohrungen
Schlauchpumpen	Masterflex, (Novodirekt)	Pumpen: Modelle 7521-35 und L/S 7554-52, Pumpköpfe: Modelle ST-07014-20, 07013-20 und 07015-20
Pumpschläuche	Novodirekt	Norpren
Sprühnebel-Beregnungsanlage	Gardena	Sprühnebeldüse, Micro-Drip-System
Kanalumschaltung für Injektions-Beregnungsanlage	Scanivalve Corp., USA, (Althen)	Switch wafer W1260/1P-24T, Schrittmotorsteuerung
Kanalsteuerung für Injektions-Beregnungsanlage	Scanivalve Corp., USA, (Althen)	Solenoid-Controller CTCR 10P/S2-S6, Impulssteuerung
Mikro-Tensiometer	KPM	Keramik, Ø 5 mm, Länge 50 mm, Porengröße 1 µm
Kanalumschaltung für Tensiometeranlage	Scanivalve Corp., USA, (Althen)	Switch wafer W1260/1P-12T, Schrittmotorsteuerung
Kanalsteuerung für Tensiometeranlage	Scanivalve Corp., USA, (Althen)	Solenoid-Controller CTCR 10P/S2-S6, Impulssteuerung
Druckaufnehmer für Tensiometeranlage	SETRA, (Althen)	Modell 204D Edelstahl-Differenzdruckaufnehmer mit integrierter Signalkonditionierung, ± 2,5 V, ± 689,4 hPa
Schläuche, Kupplungen	Novodirekt	PVC, verschiedene Größen
Pt100-Temperatursonden	Linseis (Synotech) und TMG	Ø 3 mm, Länge 30 mm bis 200 mm für Sediment, Ø 5 mm, Länge bis 300 mm für Luft und Wasser
Temperatur-Signalkonditionierung	TMG	4-Leiter RTD-Modul, 24 V-Versorgung, 0 - 10 V entspricht 0 - 100 °C, Messgenauigkeit 0,1 °C
Temperatur-Signalkonditionierung	Acrowag (Synotech)	Modell A5B34, 4-Leiter RTD-Modul, galvanisch entkoppelter Meßkreis 0-5 V (Optokoppler), -50 bis + 200 °C, integrierte Messgenauigkeit 0,02 °C
Leitfähigkeitsmeßgerät	WTW	Modell LF535
Leitfähigkeitssonden	Pero GmbH	Edelstahl mit Kunststoffgehäuse, Sondenabstand: 1 cm

Leitfähigkeits-Signalkonditionierung	Pero GmbH	Wechselspannungsmodulator/Demodulator, Signalkreis 0 – 10 V, Versorgung: StVA90 Ringkerntransformator, 30 VA
Leitfähigkeits-Referenzmessung	WTW	WTW LF 535, portables Leitfähigkeitsmeßgerät
Digitalwaage	Sartorius	Sartorius excellence, Präzisionswaage, 2000 g, RS232, Messgenauigkeit 0,01 g
Durchflußmesser	Pero GmbH	Modell DM 06
Modulträgerbord	Acrowag (Synotech)	APB01, 16 Module
Meßerfassungsrechner	(verschiedene Hersteller)	PC, Prozessor 486/50 und 486/40, 4 RS232
Meßerfassungskarte	Meilhaus Electronic	ME-30-2 Multifunktionskarte, optopentkoppelt, 16 A/D-Wandler (12 Bit, $\pm 0,1$ bis 10 V), 4 D/A-Wandler (2*12 Bit, 2*8 Bit), 3*8 Bit I/O-Port
Meßerfassungskarte	Meilhaus Electronic	ME-300 Multifunktionskarte, optopentkoppelt, 16 programmierbare A/D-Wandler (12 Bit, $\pm 0,1$ bis 10 V), 4 D/A-Wandler (12 Bit), 3*8 Bit I/O-Port
Relaiskarten	Amlicon Liveline Ltd. UK, (Meilhaus Electronic)	PC 263, 16 Reed-Relais, PC I/O-Port
Konnektorblöcke	Meilhaus Electronic	50-polig für Meßerfassung, 32-polig für Relaisfunktionen, jeweils mit Multicore-Kabel und Steckern
Programmieroberfläche	National Instruments	LabWindows und LabWindows CVI, Sprachen: ANSI-C und Q-Basic
MSR-Software	IAAG	Programm zur automatisierten Meßerfassung und Steuerung der Versuchsaufbauten

9.3.2 Kalibrierung

Darstellung der vorgenommenen Kalibrierungen der Meß- und Regeltechnik für die hydraulischen Versuche.

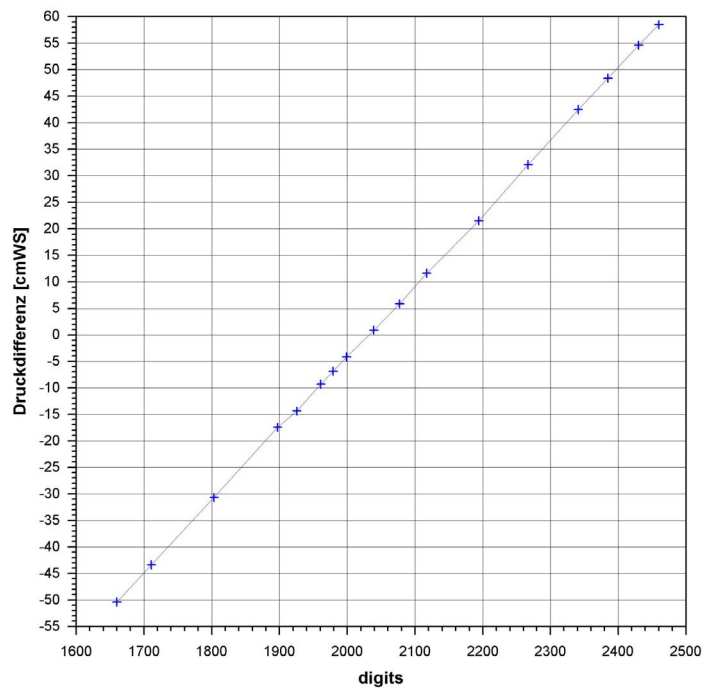


Abb. A1: Kalibrierung des Differenzdruckaufnehmers SETRA 204D. Zu sehen ist die hohe Linearität des Differenzdruckaufnehmers und die hohe A/D-Wandler-Auflösung durch die Meßdatenerfassung. Der Umschwingpunkt der Edelstahlmembran liegt bei etwa -16 cmWS. Referenzgröße wird durch eine einstellbare Wassersäule in einem durchsichtigen Plexiglasrohr gebildet.

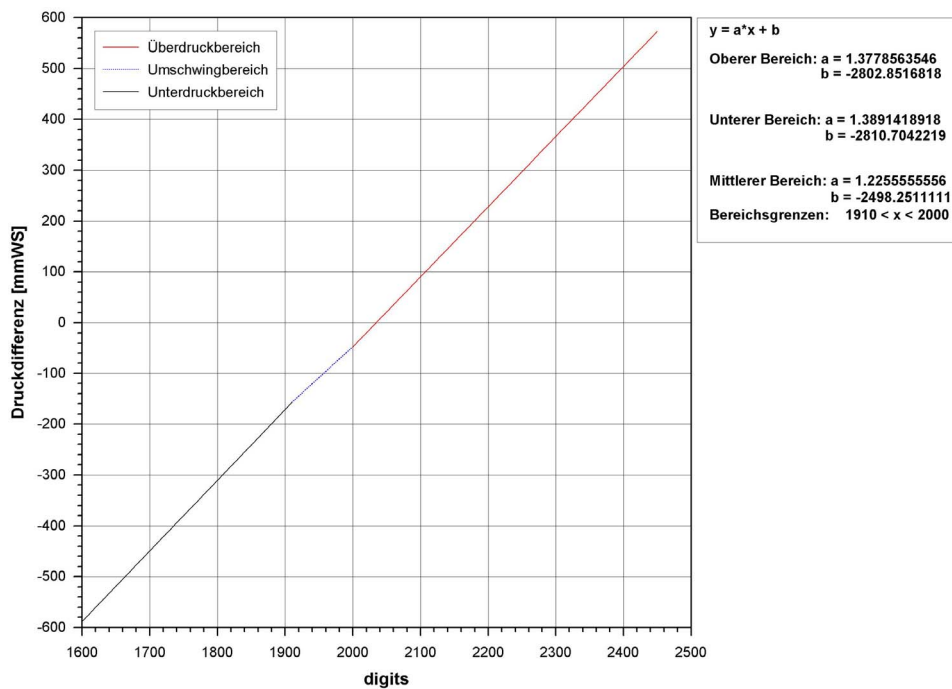


Abb. A2: Zusammengesetzte Funktion der Kalibrierung des Differenzdruckaufnehmers SETRA 204D. Das Umschwingverhalten der Edelstahlmembran wurde durch drei lineare Funktionen abgebildet.

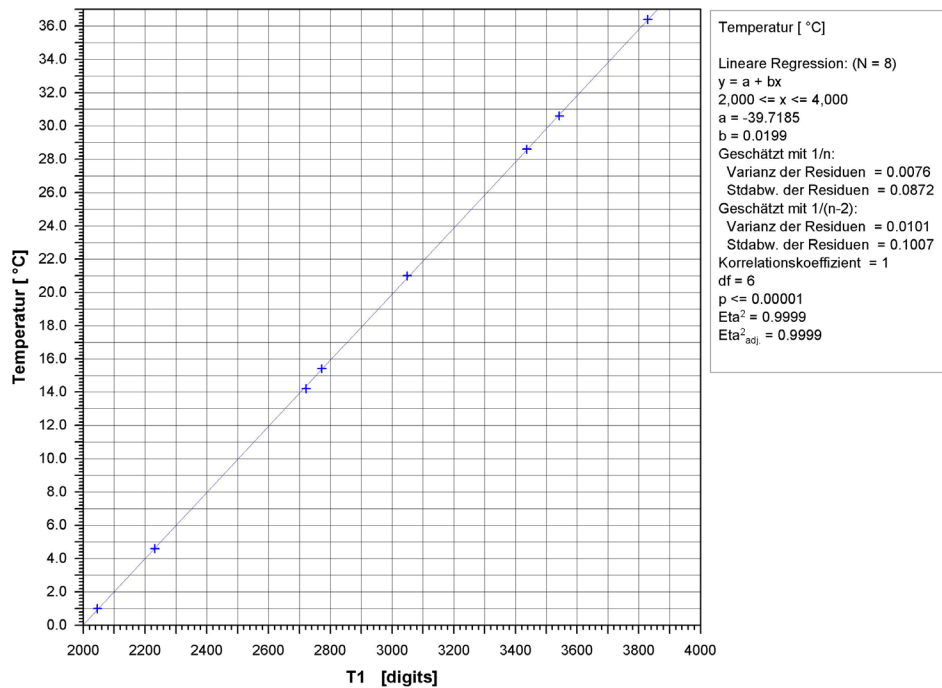


Abb. A3: Kalibrierung des Temperaturmeßkanales T1. Anordnung mit Pt100-Sonde (Fa. Linseis) und einem Acrowag A5B34 RTD-Modul. Zu sehen ist die hohe Linearität der Temperaturmessung sowie die hohe A/D-Wandler-Auflösung durch die Meßdatenerfassung. Die Referenzmessung erfolgte durch Präzisionsthermometer (Genauigkeit 0,01 °C) in einer wassergefüllten Thermoskanne, in der mit einem Magnetrührer eine homogene Innentemperatur erzeugt wurde.

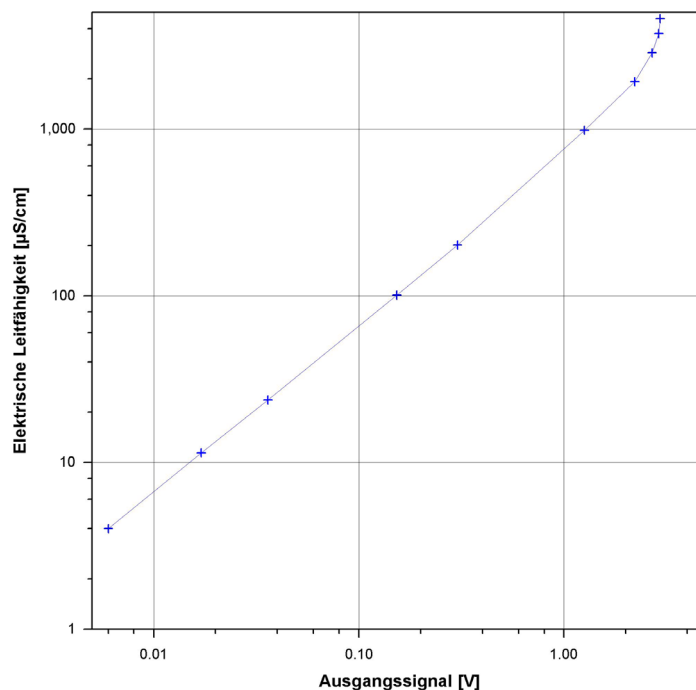


Abb. A4: Kalibrierung des LF-Meßkanales mit der Sonde LF1 zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit. Als Referenz wurden verschiedene konzentrierte NaCl-Lösungen sowie das portable Leitfähigkeitsmeßgerät WTW LF 535 eingesetzt. Dabei mußte auf eine konstante Fluidtemperatur geachtet werden. Dann wurden die Abweichungen der Sonden LF2 bis LF16 (ebenfalls bei konstanter Fluidtemperatur) bestimmt und als Korrekturfunktion in das Meßprogramm eingegeben. Die erfassten Meßdaten wurden jeweils zusätzlich mit einer Temperaturkompensation für NaCl-Ionen aufgezeichnet.

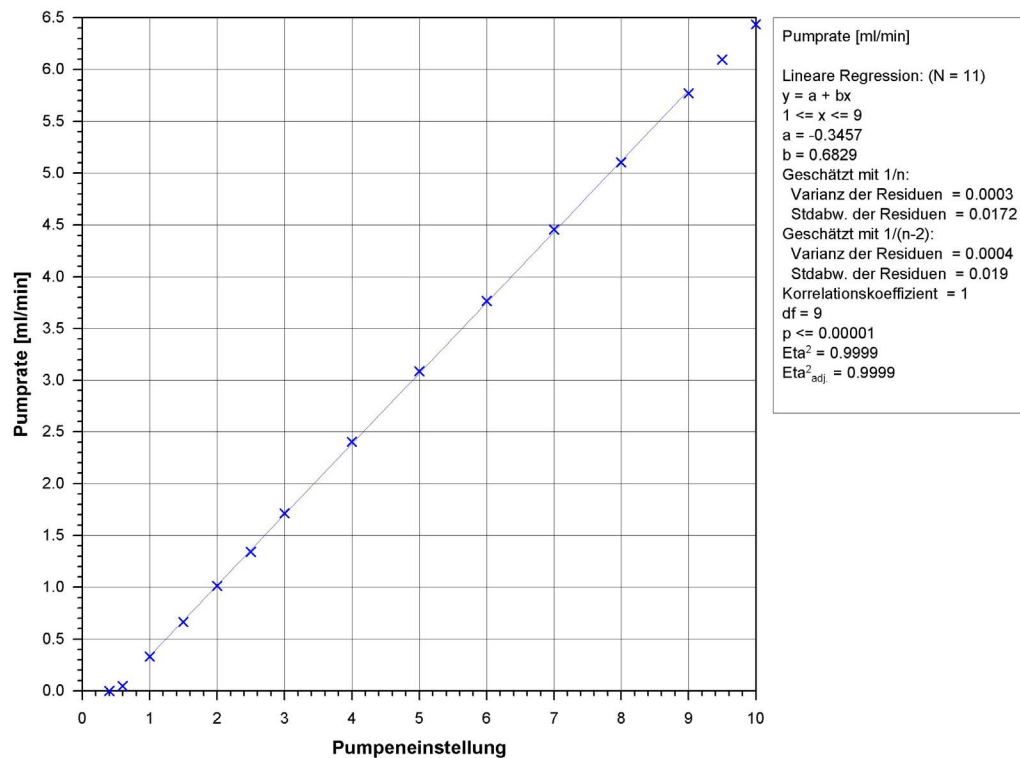


Abb. A5: Kalibrierung einer Masterflex-Schlauchpumpe Modell 7521-35 mit Pumpkopf Modell 07013-20. Pumpe 1, bestückt mit zwei Pumpköpfen, davon der vordere in Vorwärtsrichtung. Referenzmessung durch zeitgleiche Massenbestimmung der gepumpten Wassermenge mittels der Sartorius excellence Präzisionswaage (Genauigkeit 0,01 g). Die Waage wurde im Rahmen eines Wartungsvertrages von der Fa. Sartorius kalibriert.

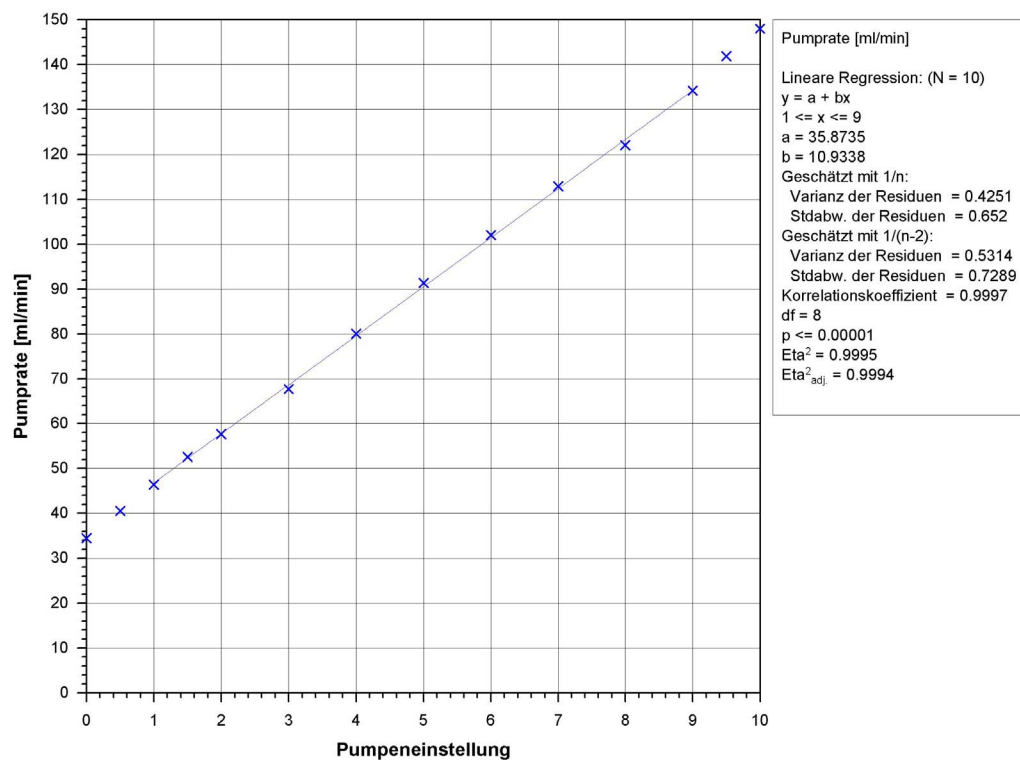


Abb. A6: Kalibrierung der Masterflex-Schlauchpumpe Modell 7521-35 mit Pumpkopf Modell 07015-20. Pumpe 2, bestückt mit zwei Pumpköpfen, davon der vordere in Vorwärtsrichtung. Referenzmessung durch zeitgleiche Massenbestimmung der gepumpten Wassermenge mittels der Sartorius excellence Präzisionswaage (Genauigkeit 0,01 g).

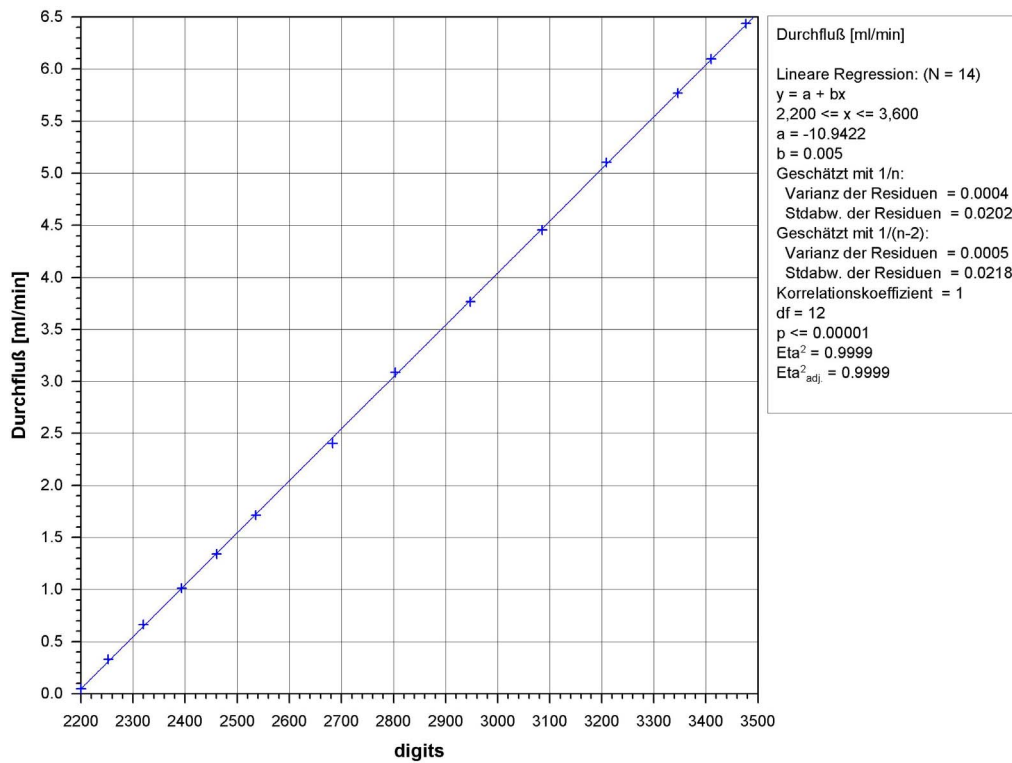


Abb. A7: Kalibrierung der induktiven Durchflußmessung. Der verwendete Durchflußmesser Pero DM 06 wurde an den Ablauf eines Behälters angeschlossen, der von einer Schlauchpumpe mit Leitungswasser bei konstanter Drehzahl beschickt wurde. Referenzmessung durch zeitgleiche Massenbestimmung der ausströmenden Wassermenge mittels der Sartorius excellence Präzisionswaage (Genauigkeit 0,01 g).

9.4 Messungen und Auswertung der Säulenversuche

Darstellung der Meßergebnisse und Auswertung der in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Desorptionsversuche.

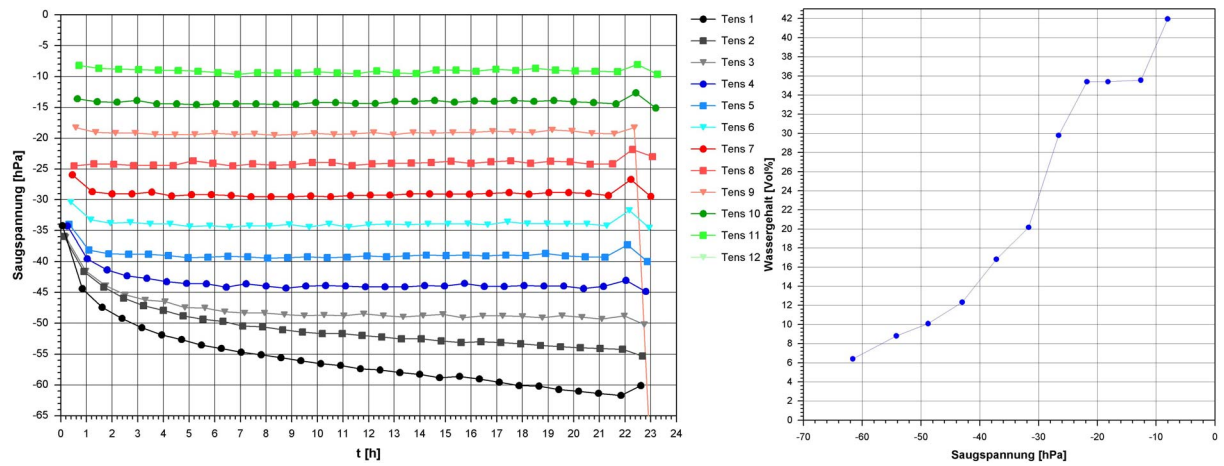


Abb. A8: Messung der Saugspannung und Bestimmung des Wassergehaltes von Material B.

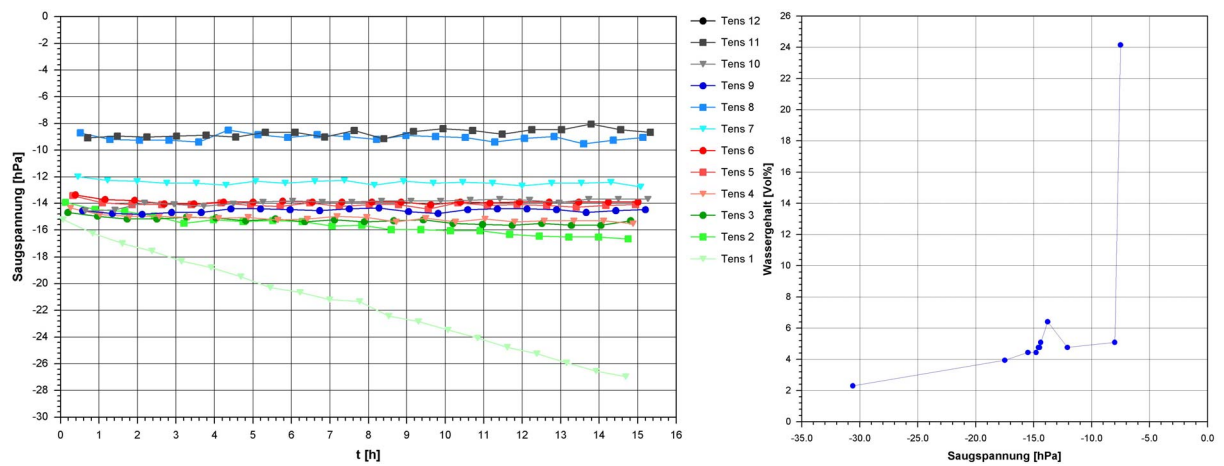


Abb. A9: Messung der Saugspannung und Bestimmung des Wassergehaltes von Material C.

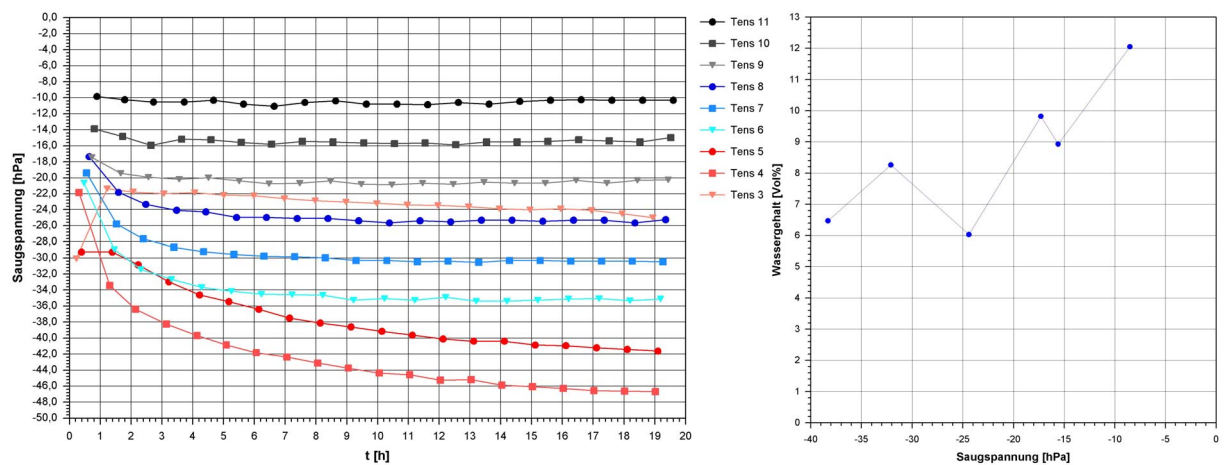


Abb. A10: Messung der Saugspannung und Bestimmung des Wassergehaltes von Material D.

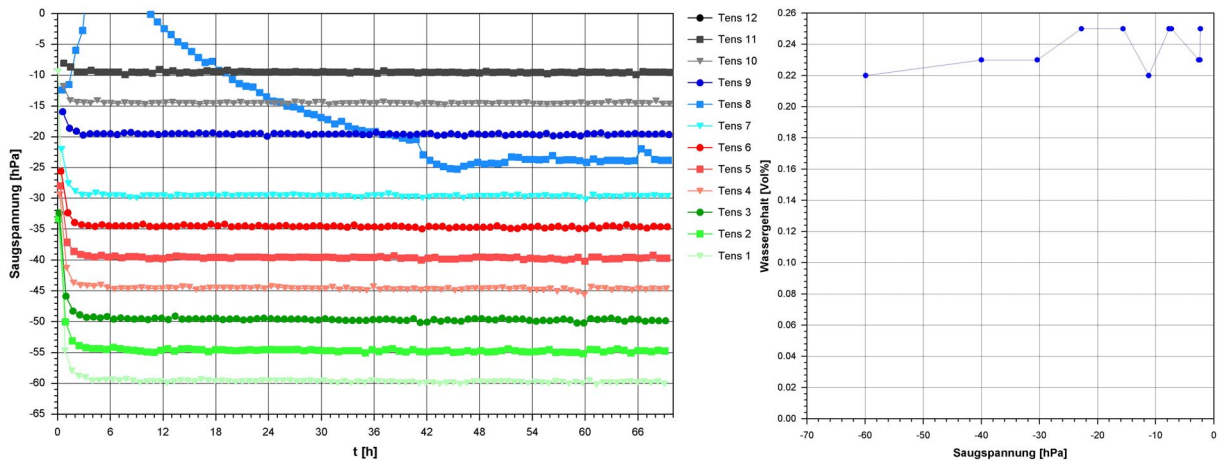


Abb. A11: Messung der Saugspannung und Bestimmung des Wassergehaltes von Material E.

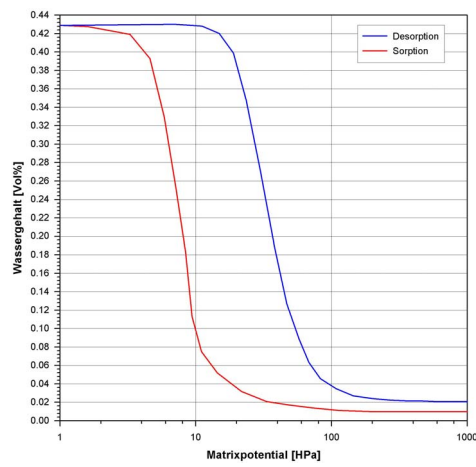


Abb. A12: Hysterese des volumetrischen Wassergehaltes als Funktion des Matrixpotentials. Darstellung der in Kapitel 2.3.7 beschriebenen Hysterese der Wassergehaltsfunktion des Matrixpotentials zwischen Adsorptions- und Desorptionszustand der Wasserströmung für einen Sand mit hoher Porosität.

9.5 Messungen und Auswertung der Tankversuche

Darstellung der Meßergebnisse und Auswertung der in Kapitel 5.2.2 und 5.2.3 beschriebenen Tankversuchsreihe V3.

9.5.1 Messungen der Versuchsreihe V3-1

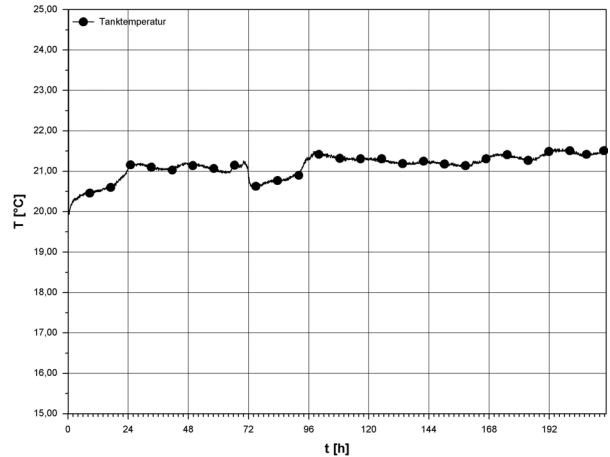
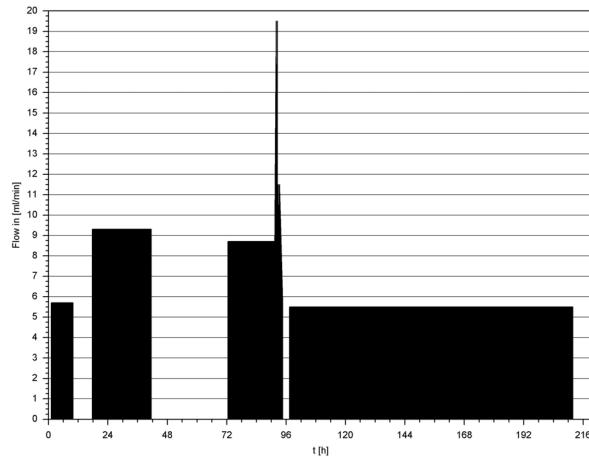


Abb. A13: Gemittelte Berechnungsraten (punktuelle Beregnung) und Temperaturverlauf im Sediment bei Versuchsreihe V3-1 a.

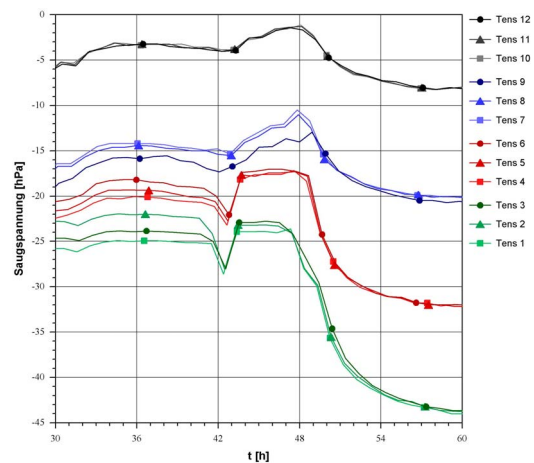
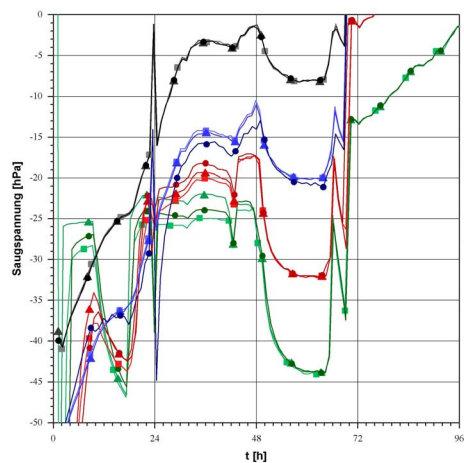


Abb. A14: Relevante Ausschnitte der Tensiometermessungen bei Versuchsreihe V3-1 a.

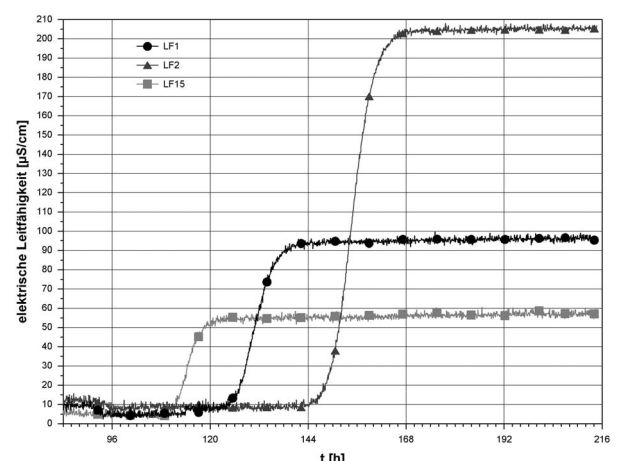
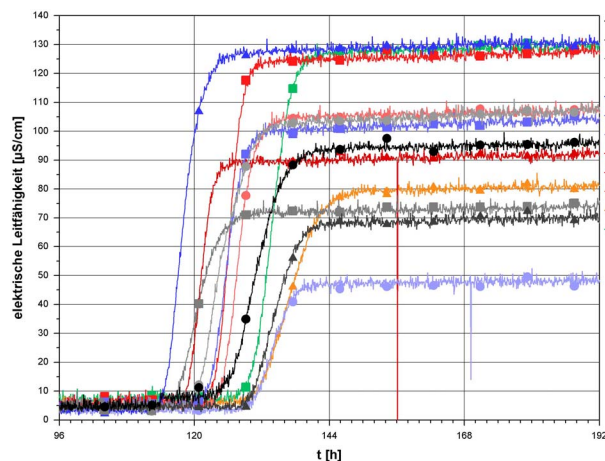


Abb. A15: Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-1 a. Horizontale (links) und vertikale (rechts) Sondenarrangierung.

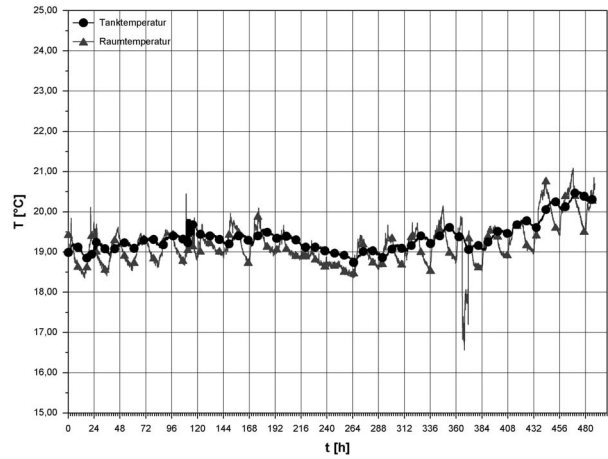
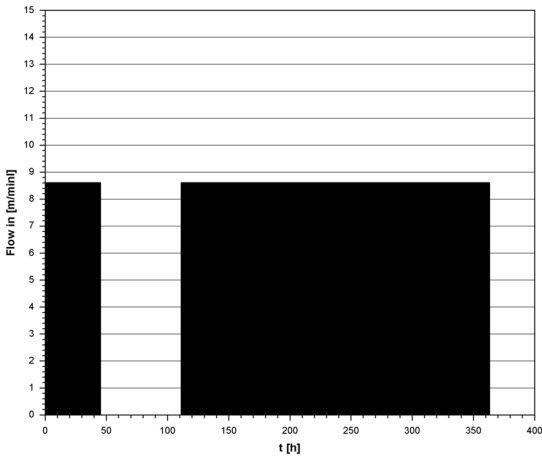


Abb. A16: Gemittelte Berechnungsraten (flächige Sprühnebelberegnung) und Temperaturverlauf von Sediment- und Raumtemperatur bei Versuchreihe V3-1 b.

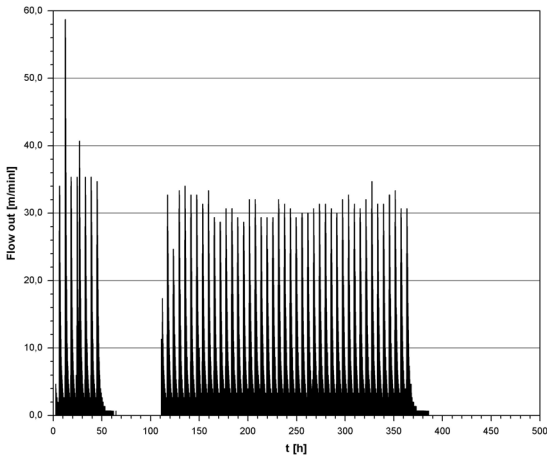


Abb. A17: Abflußmessung bei Versuchreihe V3-1 b.

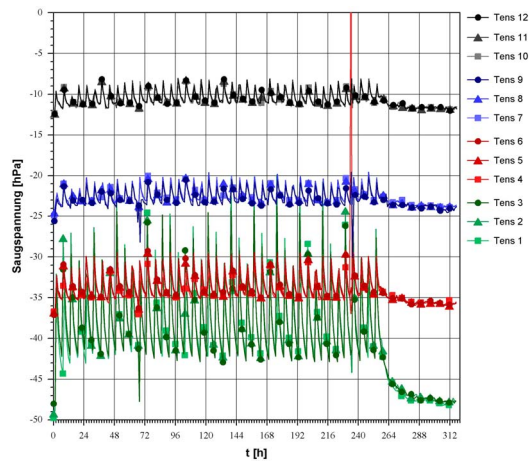
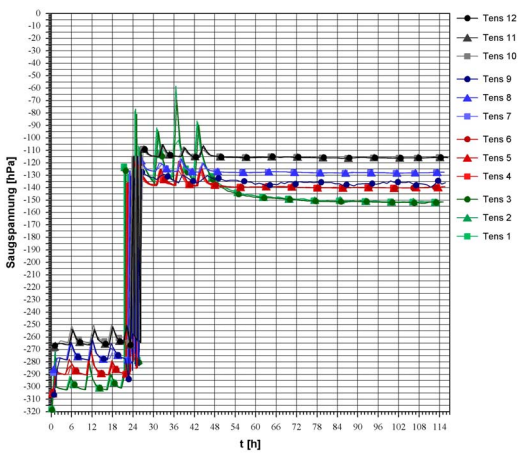


Abb. A18: Relevante Ausschnitte der Tensiometermessungen bei Versuchreihe V3-1 b.

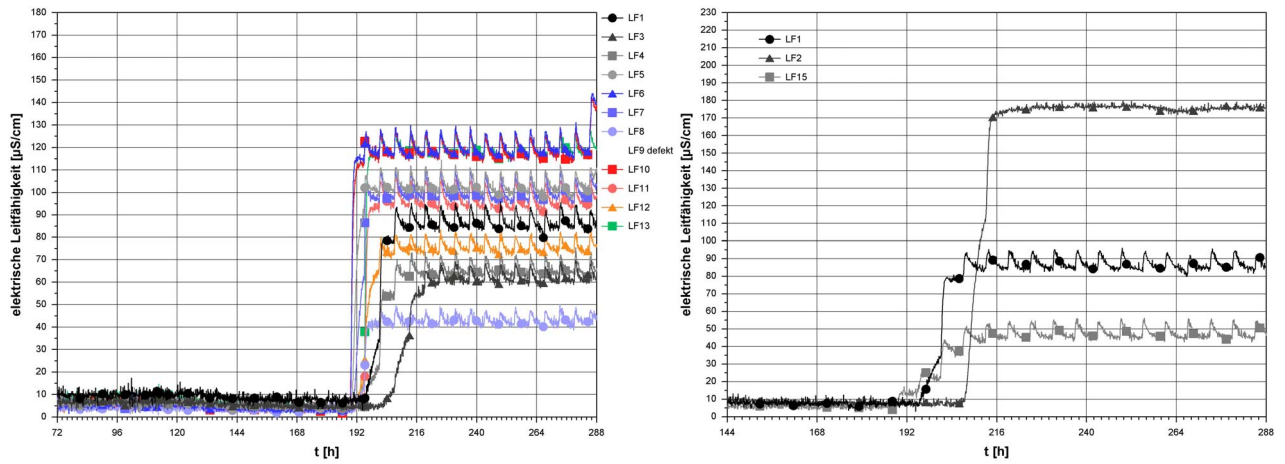


Abb. A19: Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-1 b. Horizontale (links) und vertikale (rechts) Sondenordnung.

9.5.2 Messungen der Versuchsreihe V3-2

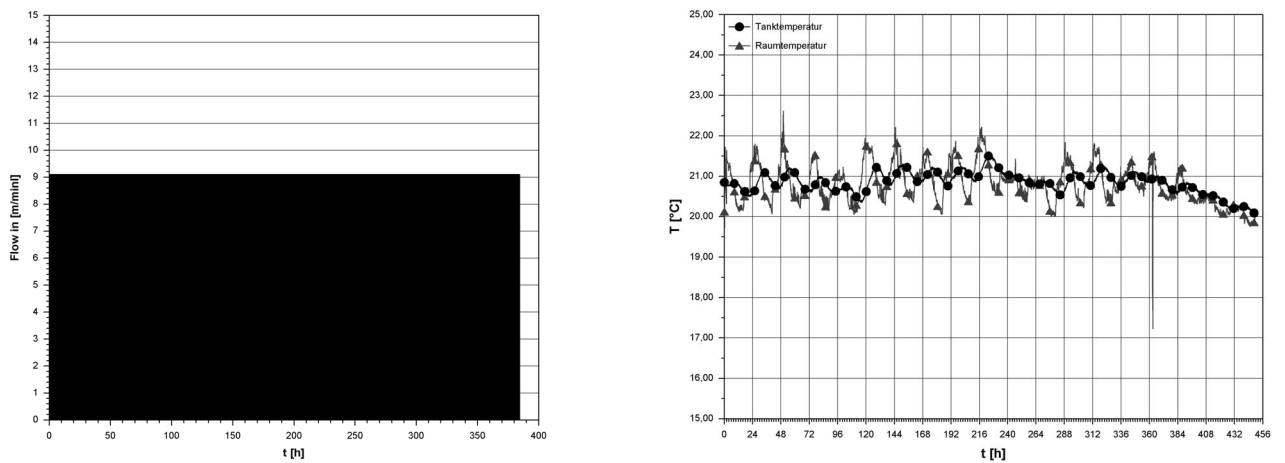


Abb. A20: Gemittelte Beregnungsraten (flächige Sprühnebelberegnung) und Temperaturverlauf von Sediment- und Raumtemperatur bei Versuchreihe V3-2 a.

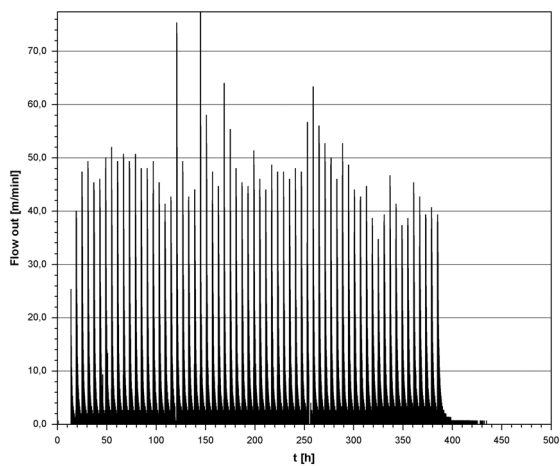


Abb. A21: Abflußmessung bei Versuchreihe V3-2 a.

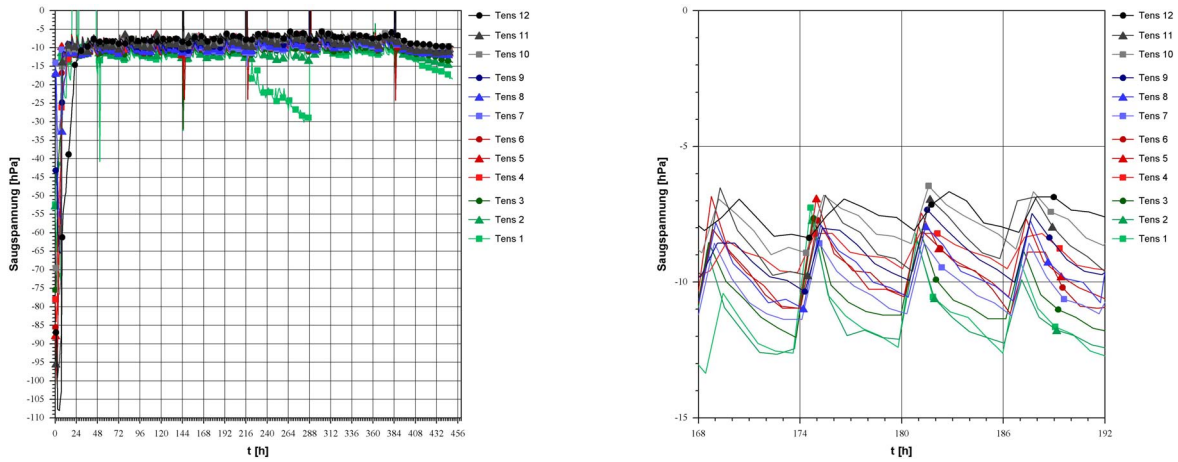


Abb. A22: Relevante Ausschnitte der Tensiometermessungen bei Versuchreihe V3-2 a.

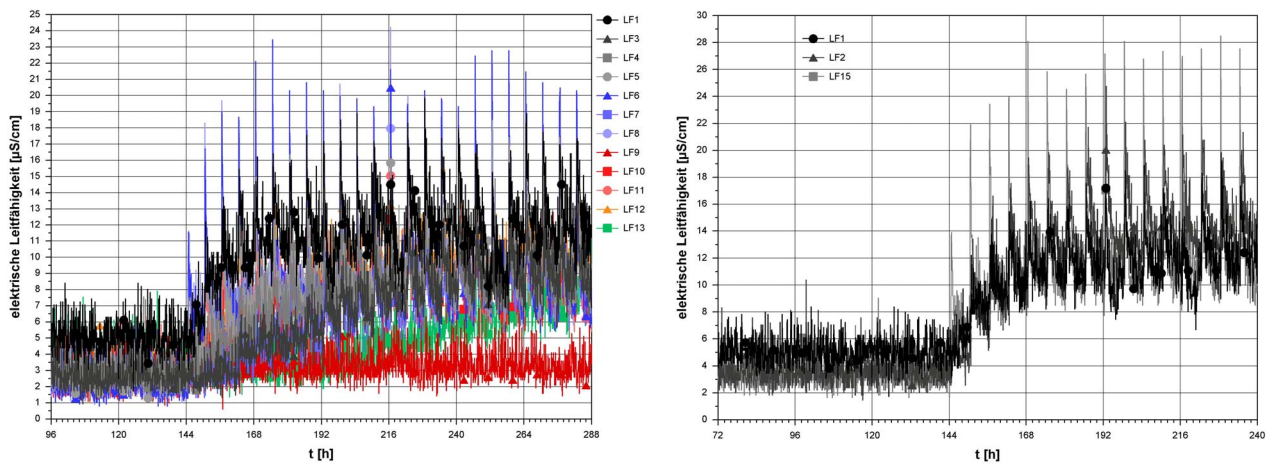


Abb. A23: Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-2 a. Horizontale (links) und vertikale (rechts) Sondenordnung.

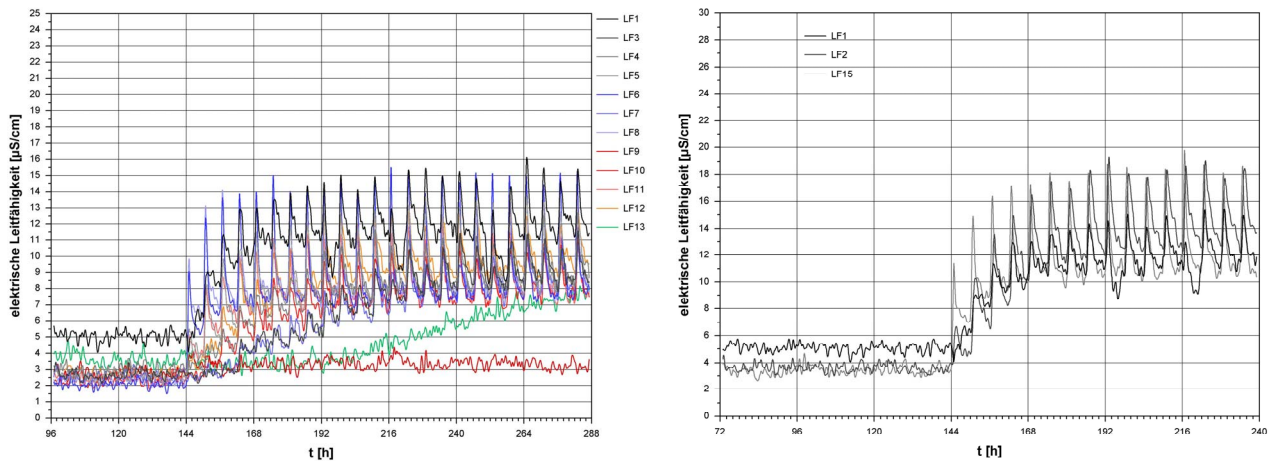


Abb. A24: Geglättete Meßdaten der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-2 a. Horizontale (links) und vertikale (rechts) Sondenordnung bei gewichteter Glättung der Stufe 20.

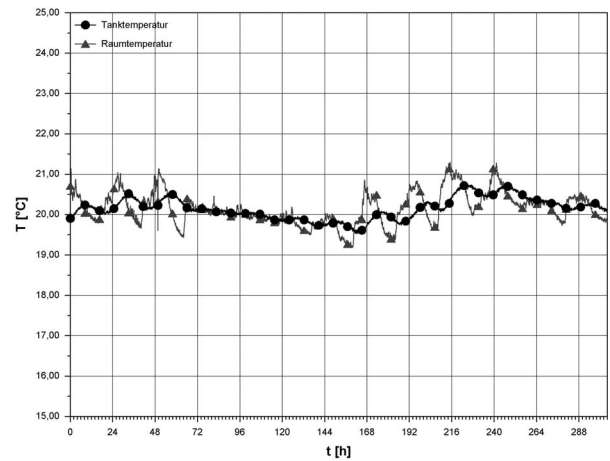
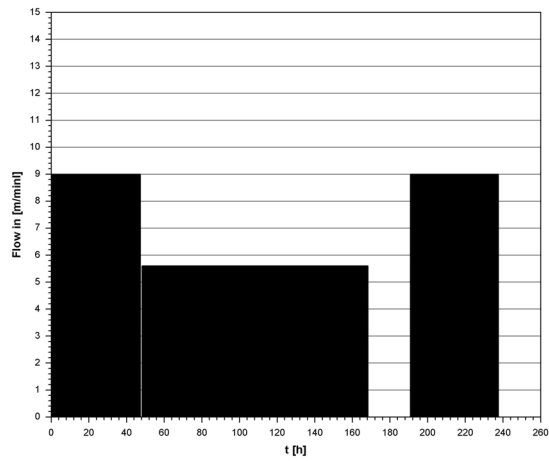


Abb. A25: Gemittelte Berechnungsraten (punktuelle Beregnung) und Temperaturverlauf von Sediment- und Raumtemperatur bei Versuchreihe V3-2 b.

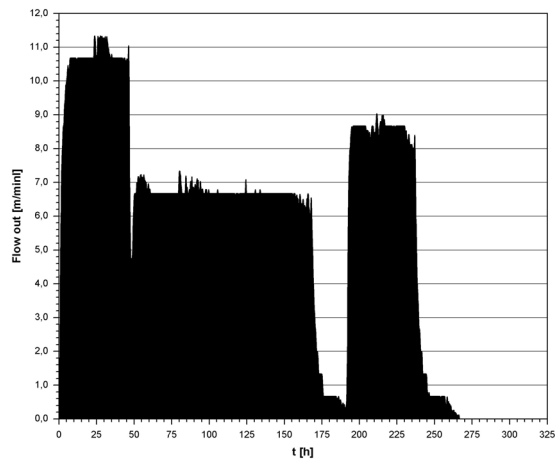


Abb. A26: Abflußmessung bei Versuchreihe V3-2 b.

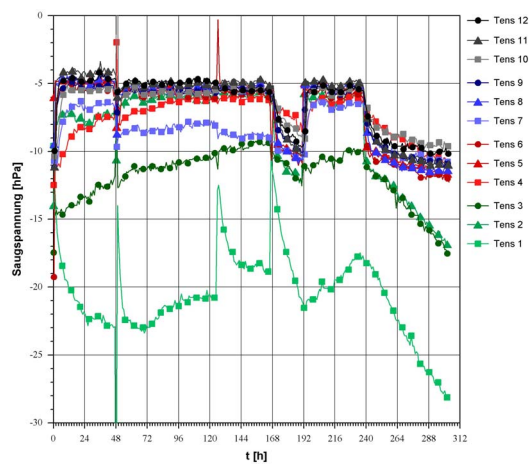


Abb. A27: Tensiometermessungen bei Versuchreihe V3-2 b.

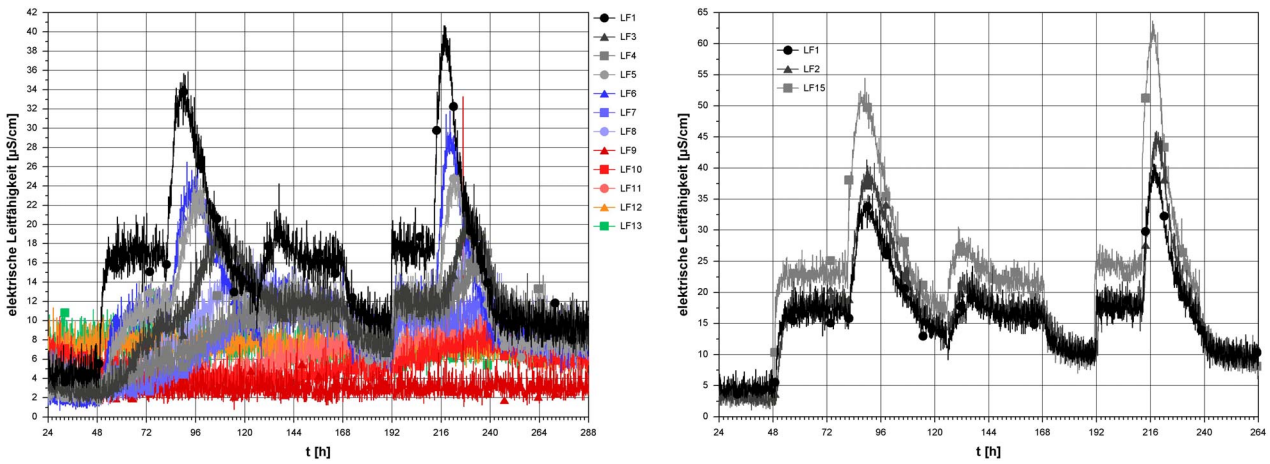


Abb. A28: Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-2 b. Horizontale (links) und vertikale (rechts) Sondenanordnung.

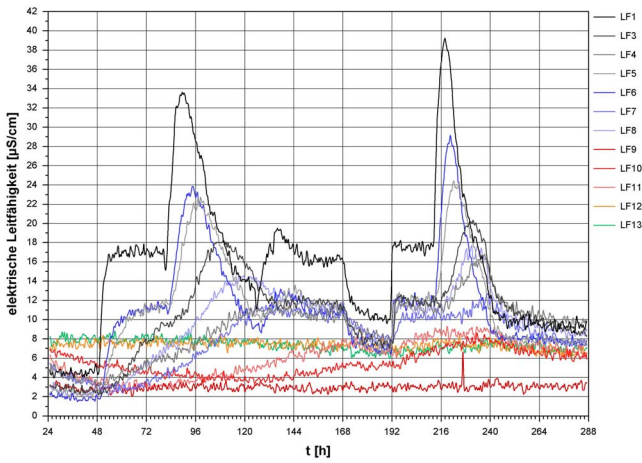


Abb. A29: Geglättete Meßdaten der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-2 b. Horizontale Sondenanordnung bei gewichteter Glättung der Stufe 20.

9.5.3 Messungen der Versuchsreihe V3-3

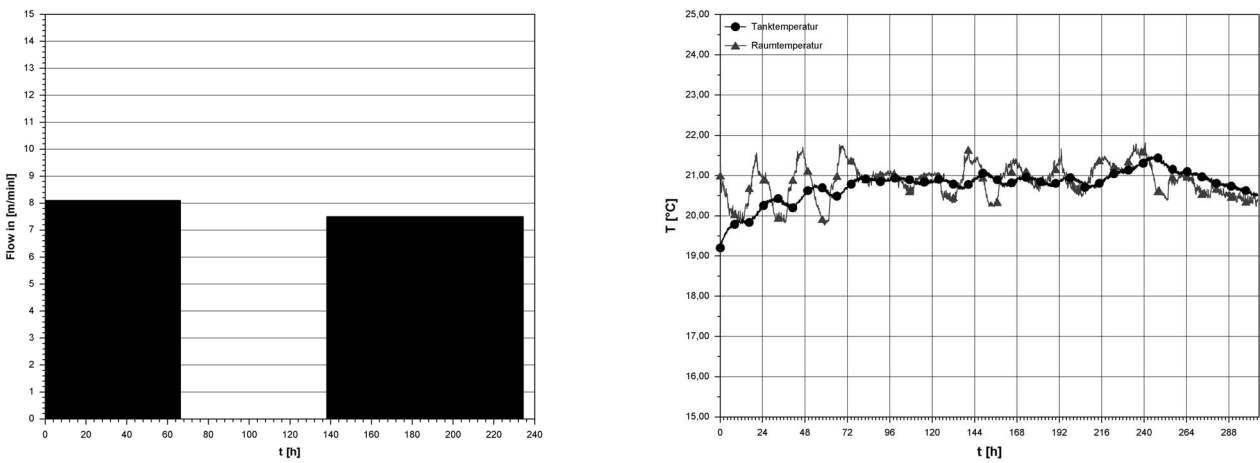


Abb. A30: Gemittelte Berechnungsraten (flächige Sprühnebelberegnung) und Temperaturverlauf von Sediment- und Raumtemperatur bei Versuchreihe V3-3 a.

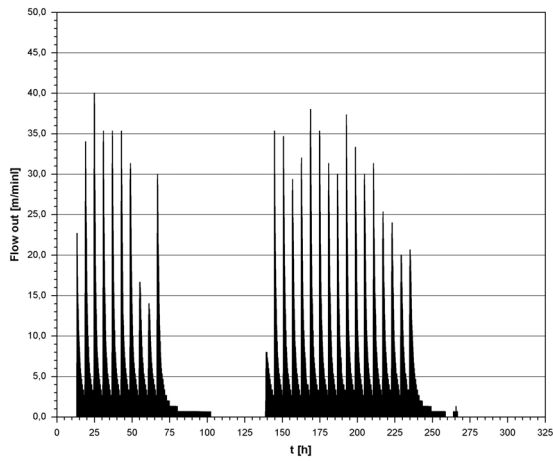


Abb. A31: Abflußmessung bei Versuchreihe V3-3 a.

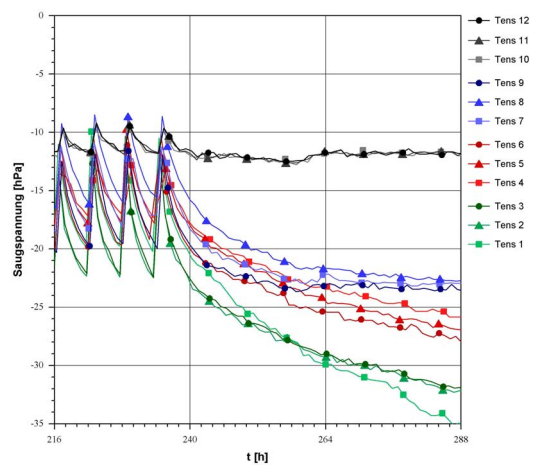
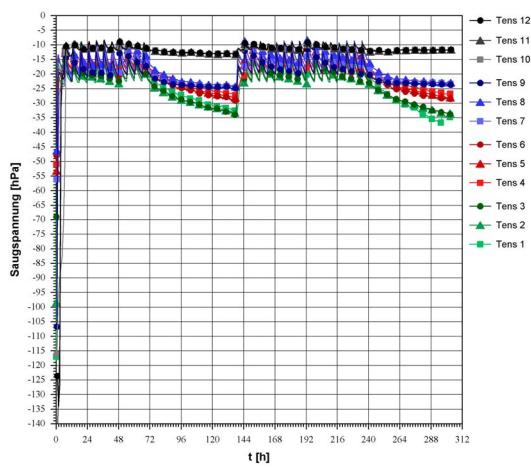


Abb. A32: Relevante Ausschnitte der Tensiometermessungen bei Versuchreihe V3-3 a.

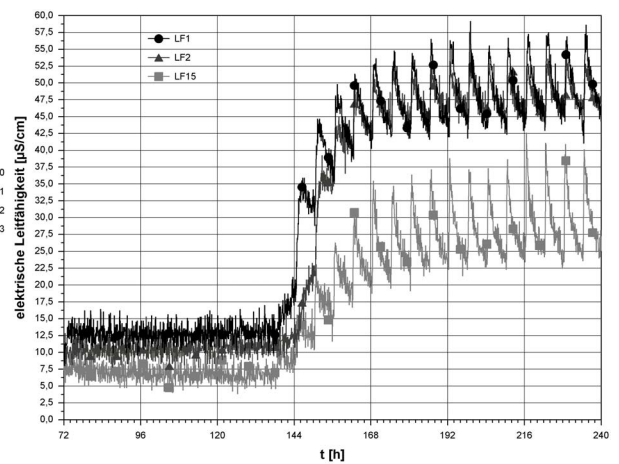
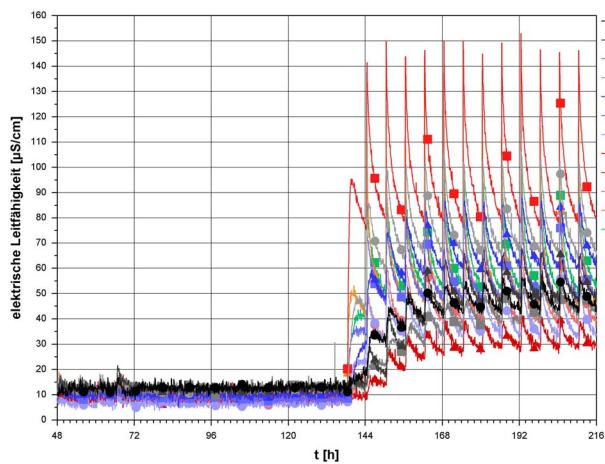


Abb. A33: Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-3 a. Horizontale (links) und vertikale (rechts) Sondenarrangement.

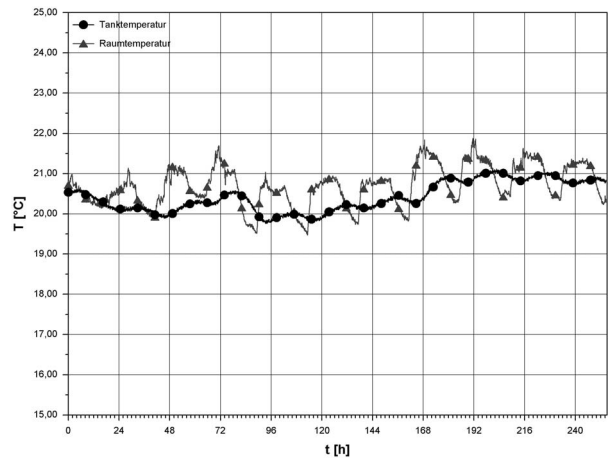
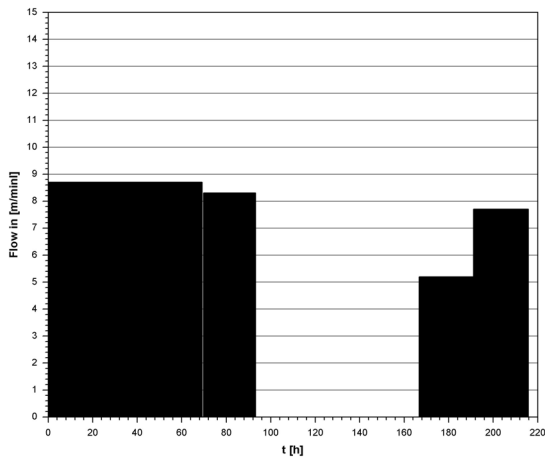


Abb. A34: Gemittelte Berechnungsraten (punktuelle Beregnung) und Temperaturverlauf von Sediment- und Raumtemperatur bei Versuchreihe V3-3 b.

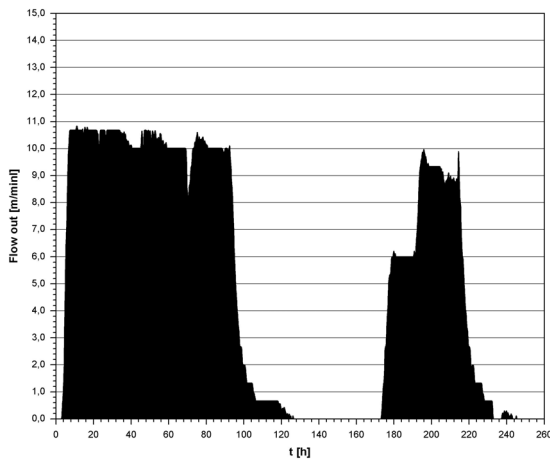


Abb. A35: Abflußmessung bei Versuchreihe V3-3 b.

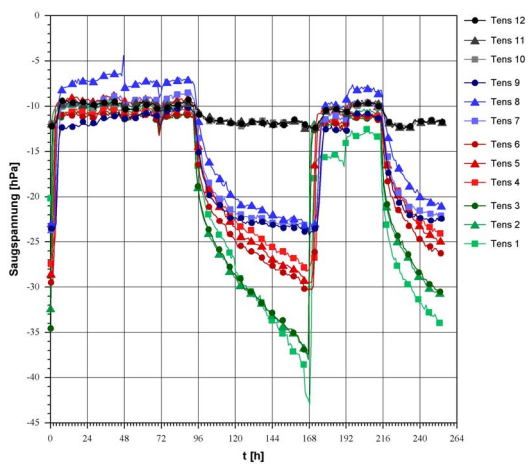


Abb. A36: Tensiometermessungen bei Versuchreihe V3-3 b.

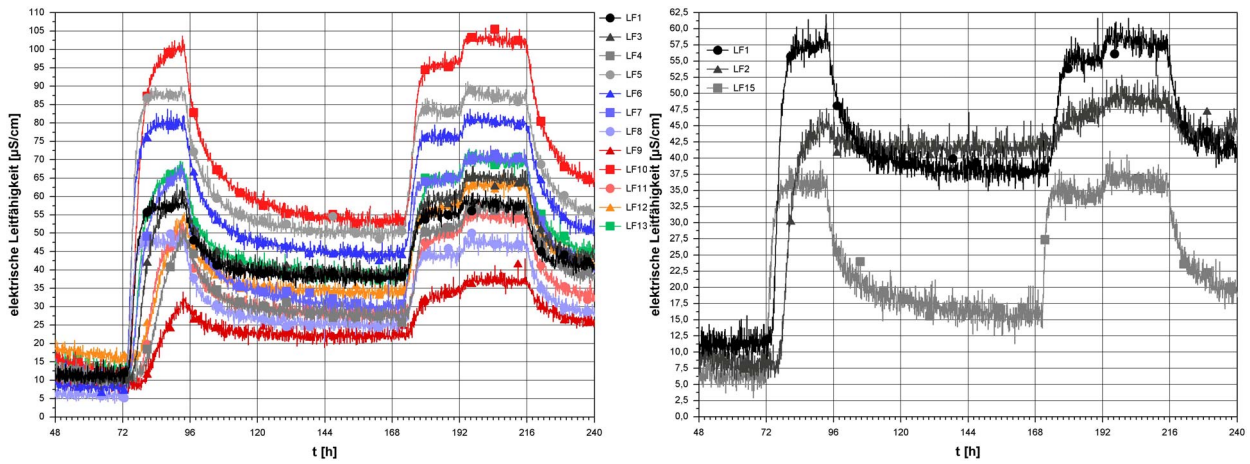


Abb. A37: Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchreihe V3-3 b. Horizontale (links) und vertikale (rechts) Sondenanordnung.

9.5.4 Messungen der Versuchreihe V3-4

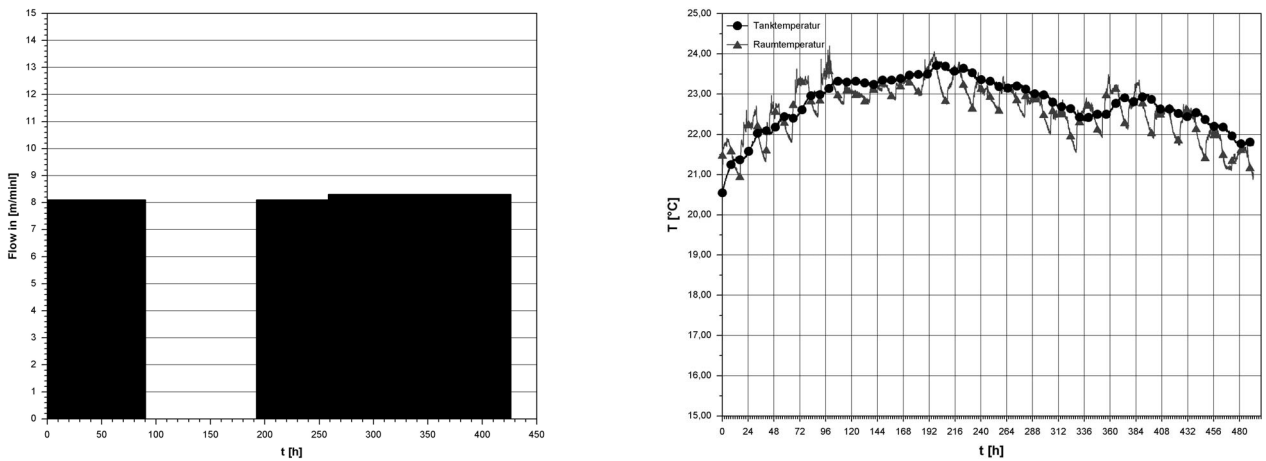


Abb. A38: Gemittelte Beregnungsraten (flächige Sprühnebelberegnung) und Temperaturverlauf von Sediment- und Raumtemperatur bei Versuchreihe V3-4 a.

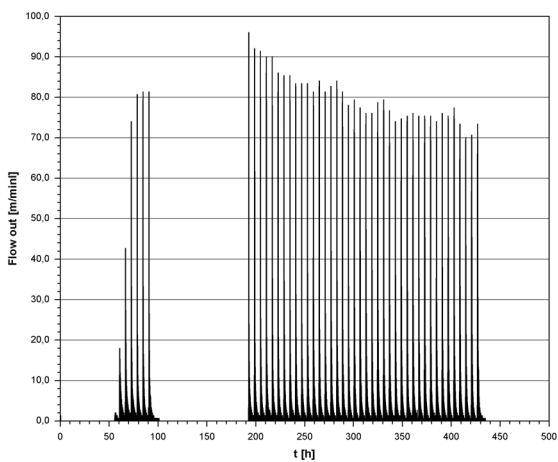


Abb. A39: Abflußmessung bei Versuchreihe V3-4 a.

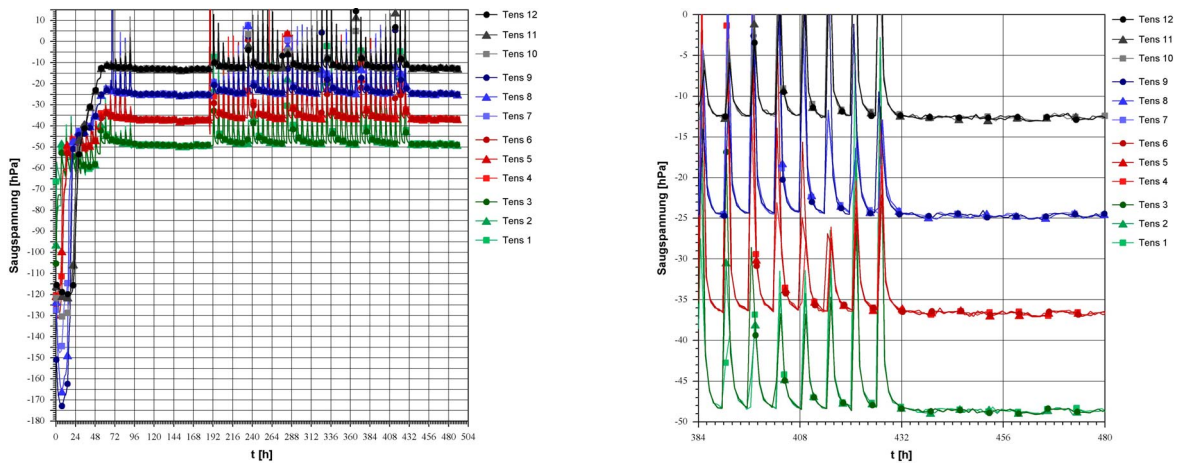


Abb. A40: Relevante Ausschnitte der Tensiometermessungen bei Versuchsreihe V3-4 a.

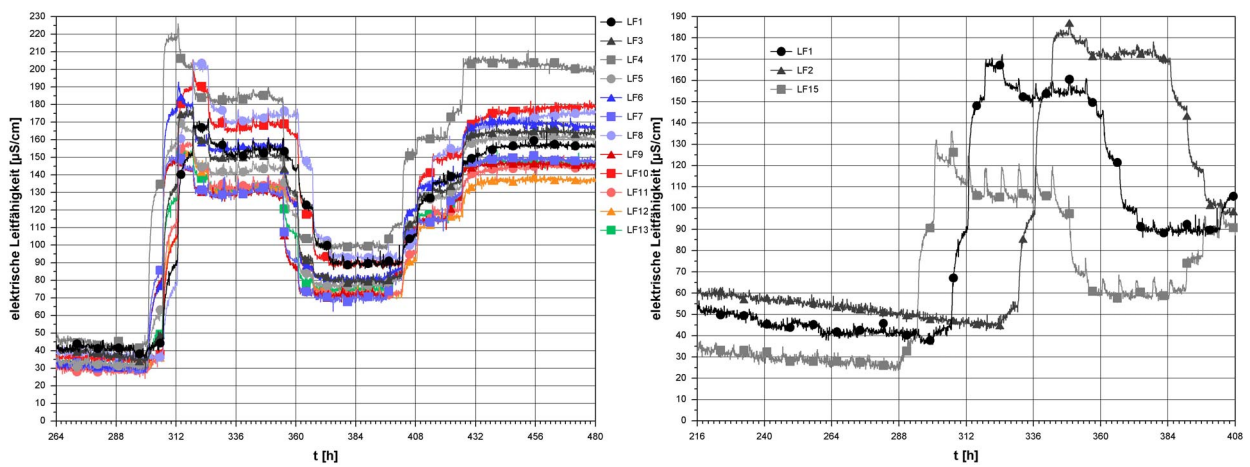


Abb. A41: Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-4 a. Horizontale (links) und vertikale (rechts) Sondenordnung.

9.5.5 Hydraulische Auswertungen der Versuchsreihe V3

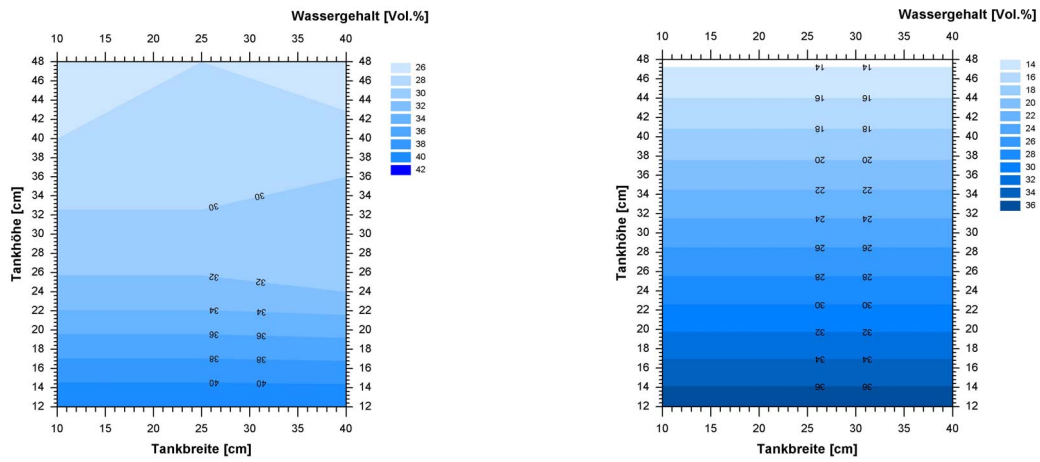


Abb. A42: Wassergehaltsberechnung bei Versuchsreihe V3-1 a. Vertikale Verteilung bei 40 h (links) und 64 h (rechts).

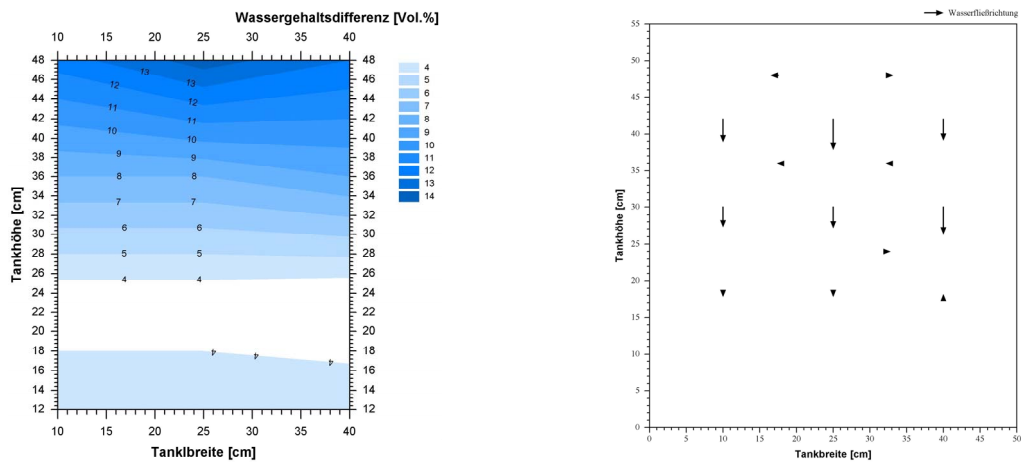


Abb. A43: Wassergehaltsdifferenz und hydraulische Gradienten bei Versuchsreihe V3-1 a nach 40 h.

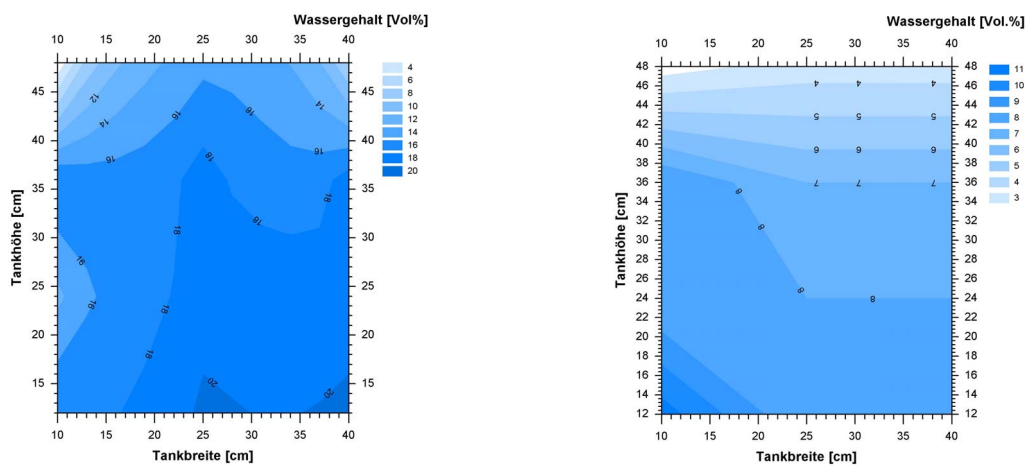


Abb. A44: Wassergehaltsberechnung bei Versuchsreihe V3-2 b. Vertikale Verteilung bei 100 h (links) und 300 h (rechts).

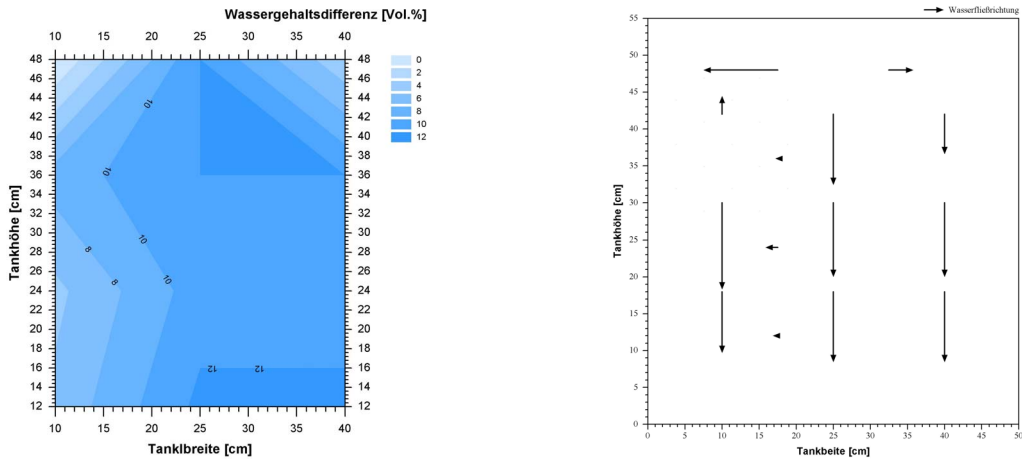


Abb. A45: Wassergehaltsdifferenz und hydraulische Gradienten bei Versuchsreihe V3-2 b nach 100 h.

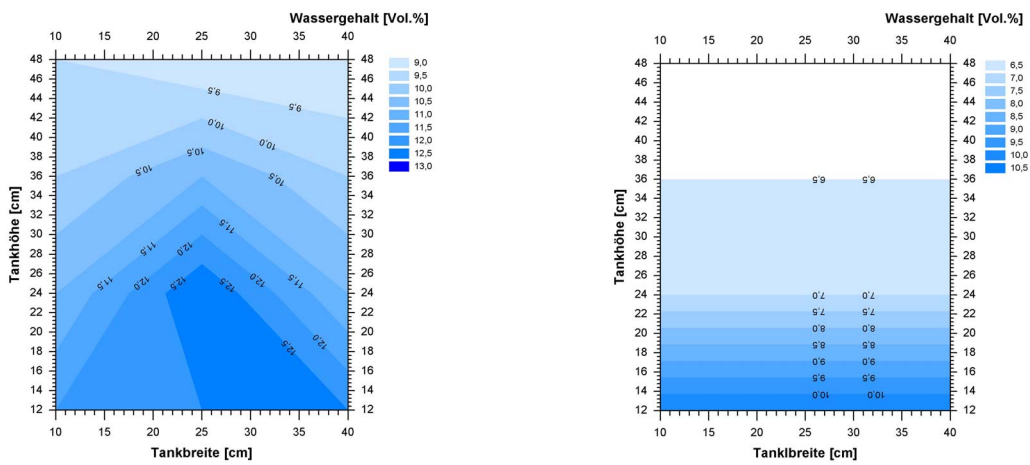


Abb. A46: Wassergehaltsberechnung bei Versuchsreihe V3-3 a. Vertikale Verteilung bei 200 h (links) und 130 h (rechts).

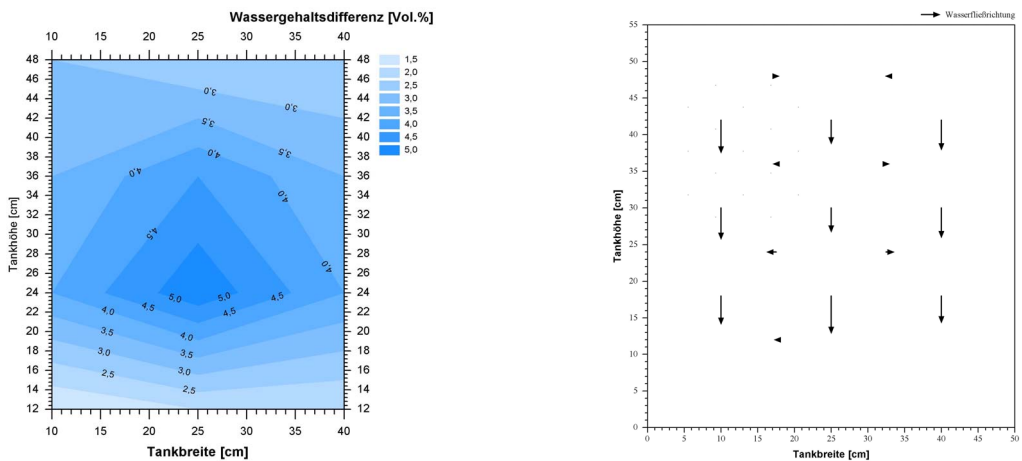


Abb. A47: Wassergehaltsdifferenz und hydraulische Gradienten bei Versuchsreihe V3-3 a nach 200 h.

9.5.6 Verteilungen der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3

Die folgenden exemplarischen Darstellungen der Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit bei Tankversuchen der Versuchsreihe V3 wurden mit Einbeziehung der Temperaturkompensation erstellt.

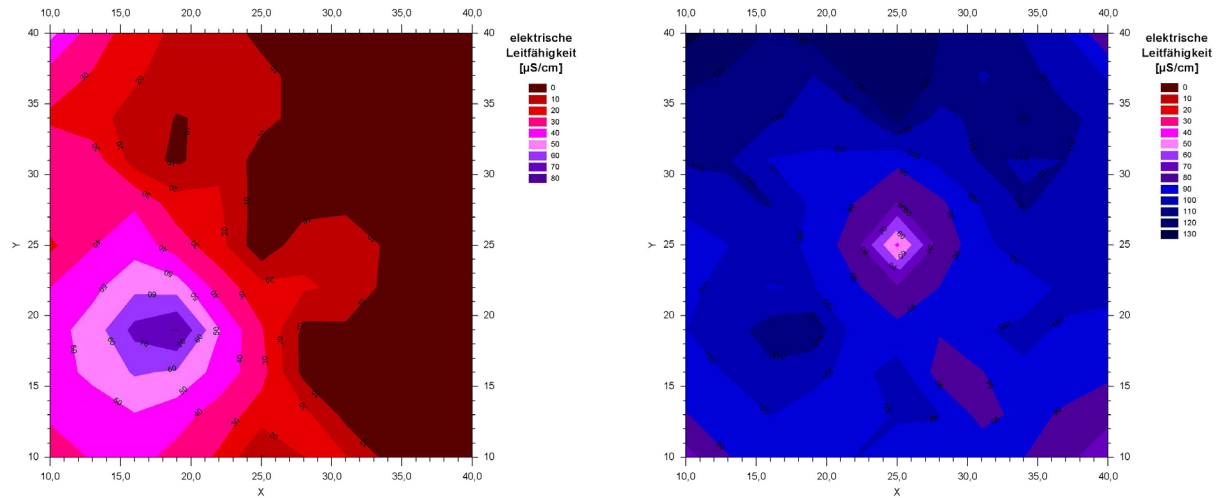


Abb. A48: Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-1 a. Verteilung nach 120 h (links) und 200 h (rechts). Der Ausfall eines Sensors ist zu sehen.

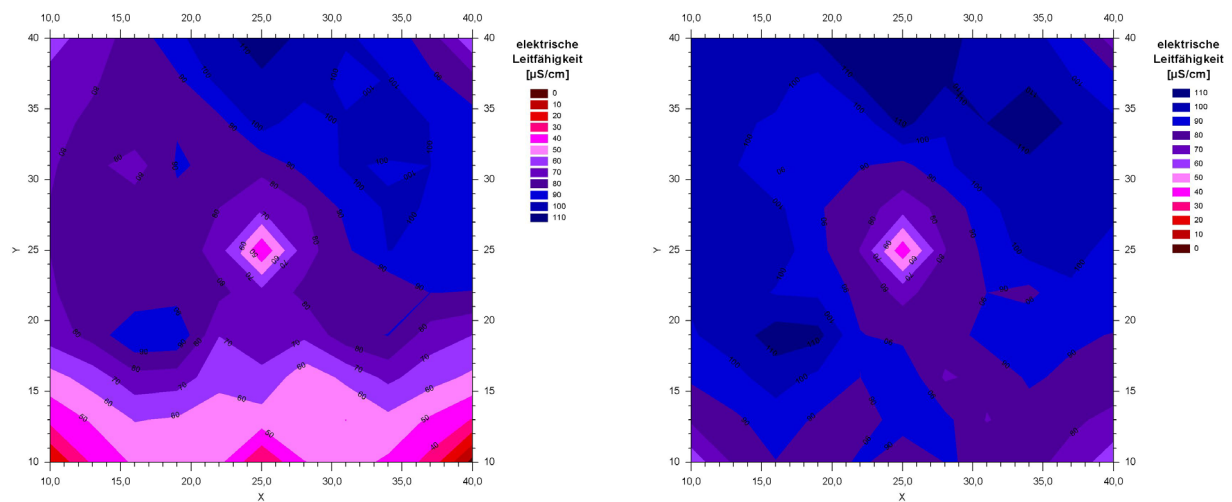


Abb. A49: Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-1 b. Verteilung nach 200 h (links) und 400 h (rechts). Der Ausfall eines Sensors ist zu sehen.

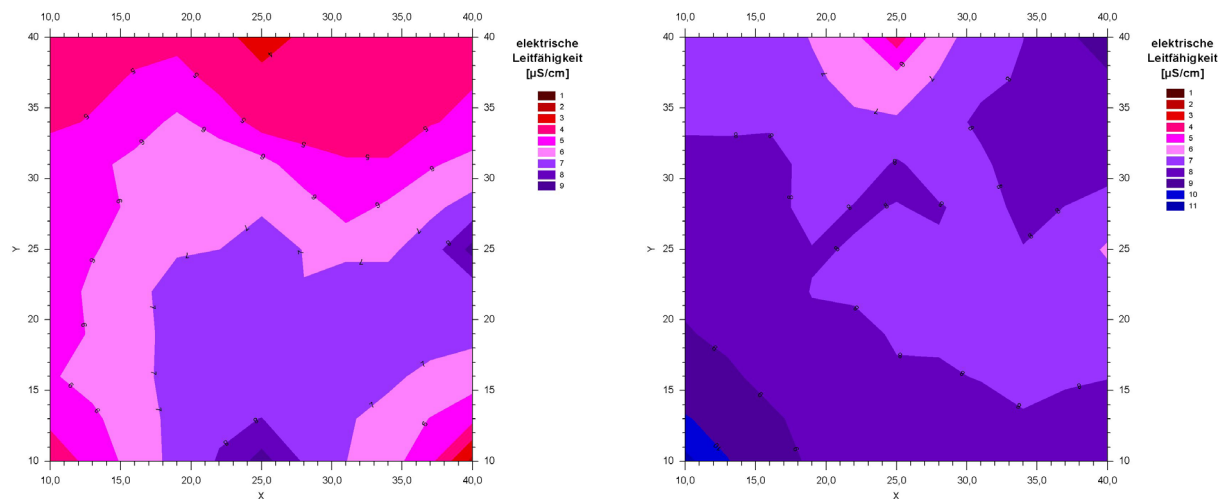


Abb. A50: Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-2 a. Verteilung nach 152 h (links) und 251 h (rechts).

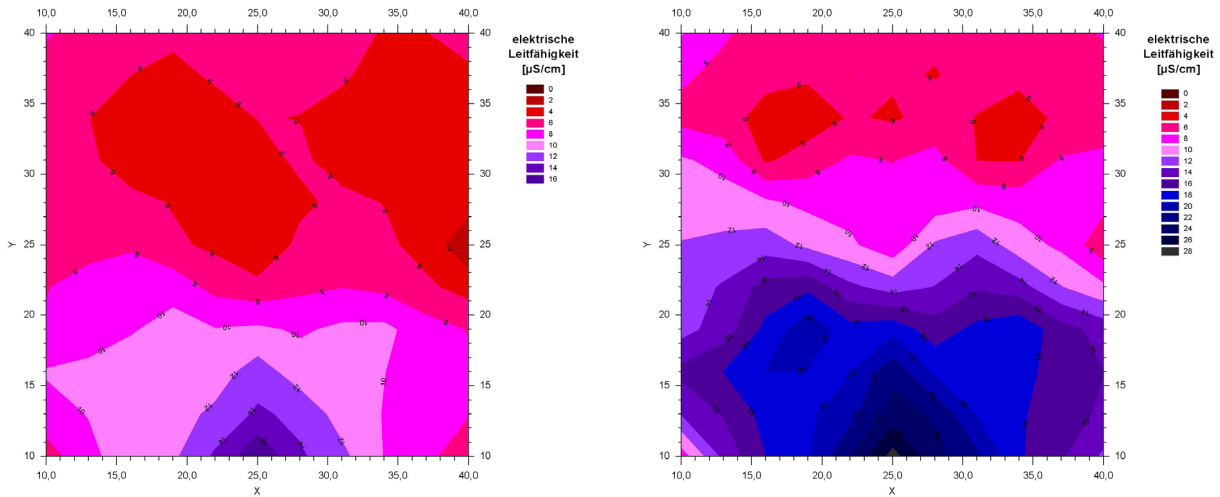


Abb. A51: Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-2 b. Verteilung nach 65 h (links) und 96 h (rechts).

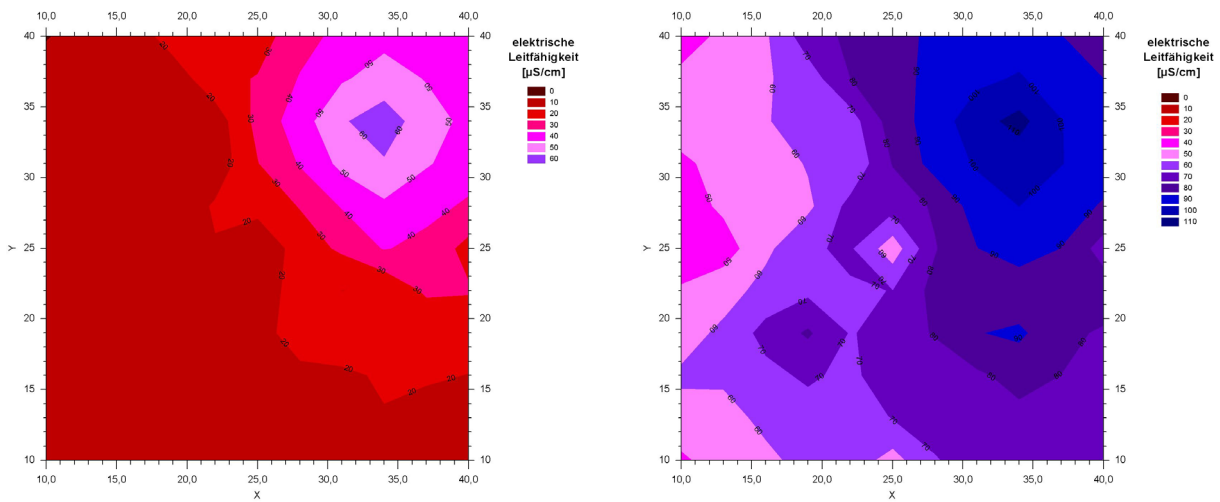


Abb. A52: Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-3 a. Verteilung nach 139 h (links) und 181 h (rechts).

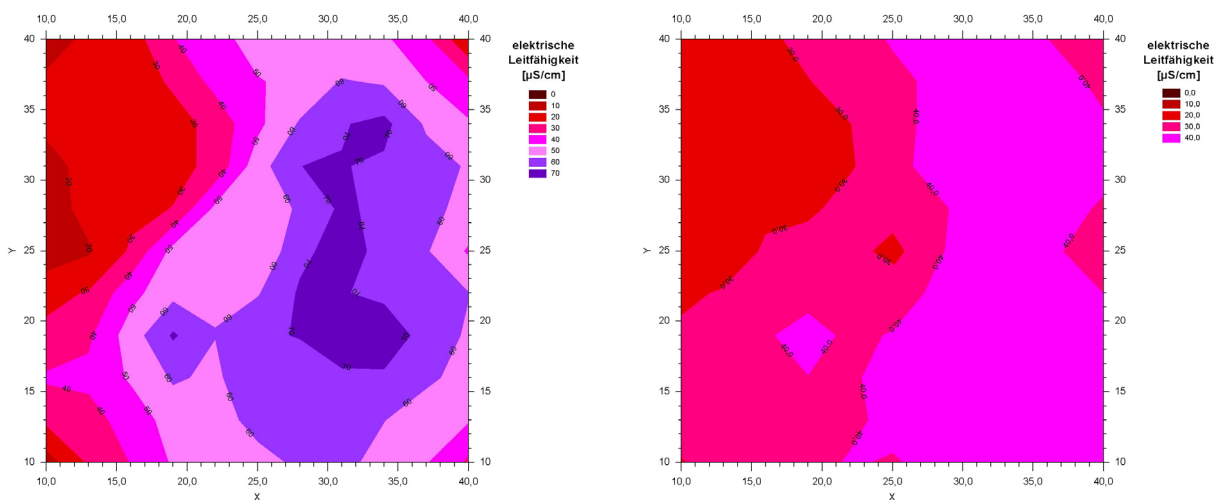


Abb. A53: Auswertung der elektrischen Leitfähigkeit bei Versuchsreihe V3-3 b. Verteilung nach 80 h (links) und 150 h (rechts).

9.6 Probenaufbereitung und Auswertung der optischen Verfahren

9.6.1 Verwendete Chemikalien für die Fixierung des Korngerüstes

Für die Fixierung wurde folgendes Polyesterharz der Fa. Voss Chemie (bezogen über Fa. Gößl + Pfaff GmbH, Karlskron) verwendet:

Tab. A4: Eigenschaften des GTS- Polyesterharzes zur Fixierung der Proben. Die Viskosität beträgt bei 25 °C etwa 600 MPa*s.

Bezeichnung:	GTS - Polyesterharz
Lieferform	flüssig
Farbe	klar
Mischungsverhältnis Polyesterharz/Härter	100 : 1
Dichte [g/cm ³ bei 20 °C]	1,12
Viskosität [mPa*s bei 20 °C]	1000 ± 100
Flammpunkt nach DIN 51584 [°C]	34
Styrolgehalt [Gewichtsprozent]	35 ± 1
Brechungsindex	1,54
Lagerung (verschlossen, unter 15 °C)	3 – 6 Monate
Schlagzähigkeit nach DIN 53453 [kJ/m ²]	9
Reißfestigkeit nach DIN 53455 [MPa]	55
Biegefestigkeit nach DIN53452 [MPa]	80
Elastizitätsmodul nach DIN53457 [MPa]	3700
Wärmeformbeständigkeit nach Martens [°C]	50
Schrumpfung nach Härtung [%]	7

Die Befüllung des getrockneten, sedimentgefüllten Probenzylinders erfolgte von oben in einem evakuierten Glasbehälter. So konnten Lufteinschlüsse verhindert werden. Für kiesige Sedimente wurden Kunststoff-Probenzylinder mit 215 ml Volumen, für feinkörnigere Materialien mit 50 ml Volumen eingesetzt.

Als Färbemittel wurde eine blaue Polyesterfarbe der Fa. Voss Chemie (bezogen über Fa. Gößl + Pfaff GmbH, Karlskron) beigemischt. Die Farbpartikel dringen nicht in die Sedimentpartikel ein.

9.6.2 Digitalisierung der Sedimentstruktur

Zur Digitalisierung der Probenanschliffe und Dünnschliffe wurden verschiedene Technologien eingesetzt, da die CCD-Kameras des Bildanalysegerätes in Verbindung mit dem Mikroskop nur eine begrenzte Auflösung und Kontrasteinstellung boten. Für die Auswertung mit dem Bildanalysegerät LECO 2003 wurden kontrastreiche Vergrößerungen von Einem Agfa Ortho 25 Kleinbildfilm auf Fotopapier hergestellt.

Für die Auswertung mit Photoshop 4.0 wurden im Auflichtverfahren direkte Scans des befeuchteten Anschliffes mit einem Agfa 7200 dpi-Flachbettscanner an einem Apple MacIntosh G3 hergestellt. Die Bildauflösung beträgt dabei mit 283,5 Punkten pro Millimeter in der Diagonalen 5 µm. Die Probe B wurde mit einem Durchlichtaufsatz gescannt.

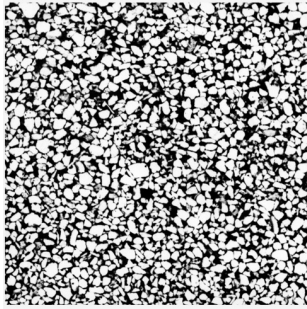
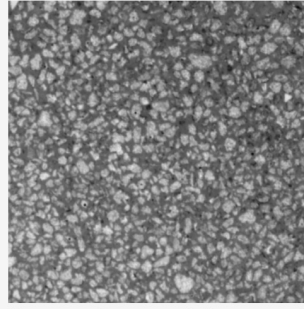


Foto Probe B, Bildkante = 10 mm



Scan Probe B, Bildkante = 10 mm

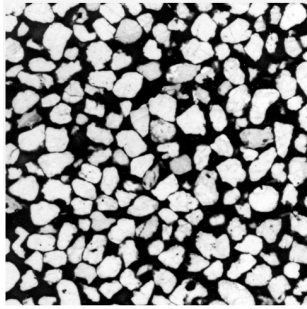
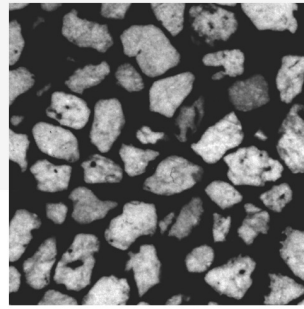


Foto Probe F, Bildkante = 20 mm



Scan Probe F, Bildkante = 10 mm

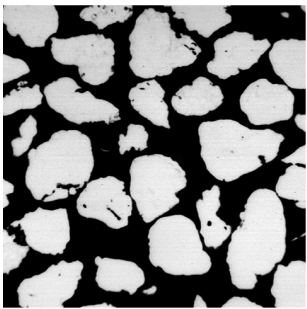
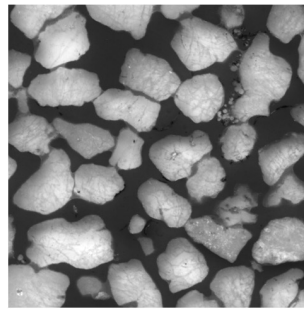


Foto Probe G, Bildkante = 10 mm



Scan Probe G, Bildkante = 10 mm

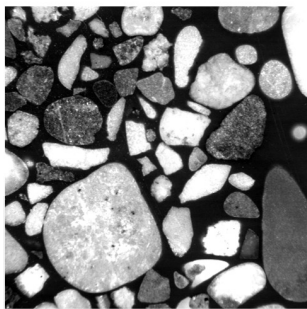
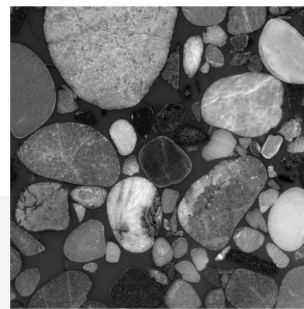


Foto Probe H, Bildkante = 30 mm



Scan Probe H, Bildkante = 30 mm

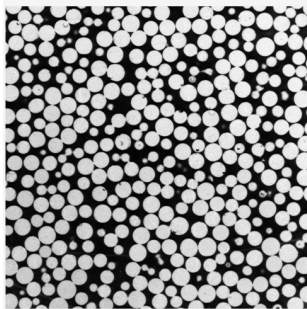
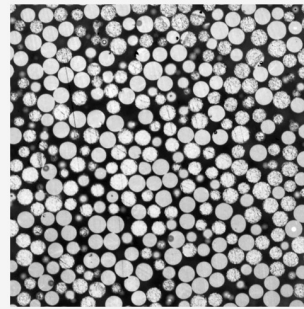


Foto Probe K, Bildkante = 20 mm



Scan Probe K, Bildkante = 20 mm

Abb. A54: Vollständige Reihe der Digitalisierung mittels Fotos und durch direkte Scans der Proben B, F, G, H und K.

9.6.3 Angaben zum verwendeten Tomographen

Verwendeter Computer-Tomograph des Klinikum Innenstadt der LMU München.

Tab. A5: Angaben zum verwendeten Computer-Tomographen.

Bezeichnung:	Spiral-CT
Art	Röntgentomograph
Modell	PQ 5000
Hersteller	Picker International, Cleveland, Ohio, USA
Verfahren	Schichtaufnahme, Spiralaufnahme oder Einzelschicht
Standort	CT-Abteilung des Klinikum Innenstadt der LMU München
Einstellung	3 g/cm ³
Brennweite Zoom-Objektiv	18 – 108 mm
Auswertung	3D-mode (Dichteverteilung), 4D-mode (Illumination-Rendering)
Bildauflösung	5,4 Pixel/mm, 8 Bit - Grauwert
Bilddatenexport	TIFF, via FTP

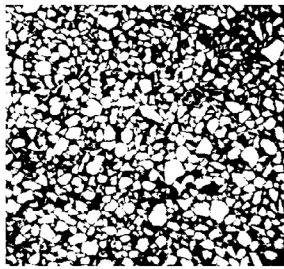
9.6.4 Angaben zur Bildanalyse und Auswertung

Die Analyse der Fotos wurde mit dem Bildanalysegerät LECO 2003 (Fa. LECO) durchgeführt.

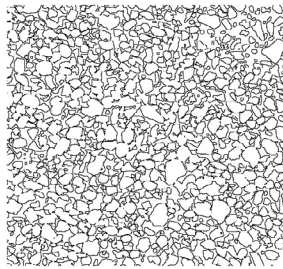
Tab. A6: Technische Angaben und Bezeichnungen zum Bildanalysegerät LECO 2003 der Fa. LECO.

Bezeichnung:	LECO 2003
CPU	80486
Bildprozessoren	LECO
Festplatte	120 MB SCSI, 17 ms
Laufwerk	128 MB MO, 30 ms
Monitore	2 Variscan 14", 60 Hz
Makrostand	RS2
Brennweite Zoom-Objektiv	18 – 108 mm
Beleuchtungseinrichtung	RB2
CCD-Schwarz-Weiß-Kamera	LECO CCD
Auflösung	768 * 493 Punkte
CCD-Farbkamera	DXC – 151 P
Sensor	2/3" IT CCD
Auflösung	756 * 581 Punkte
Empfindlichkeit bei 2000 Lux	F4
Auswertungssoftware	LC 2003

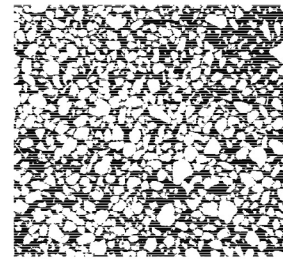
Eine zweite Analyse wurde mit den direkten Scans mittels Photoshop 4.0 (Fa. Adobe) auf einem PowerMac 8600 (Fa. Apple Computers) mit einem 17"-Monitor (Fa. Apple Computers, Sony Triniton-Röhre) durchgeführt. Ein deutlicher Vorteil liegt hier in der besseren Kontrastnachbearbeitung.



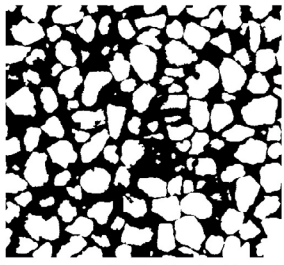
Porenraumfläche Probe B



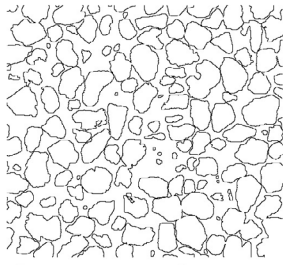
Phasengrenzen Probe B



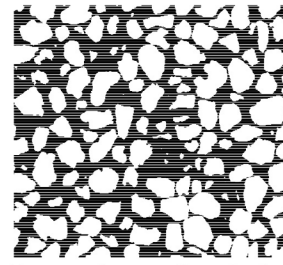
Porengrößenverteilung Probe B



Porenraumfläche Probe F



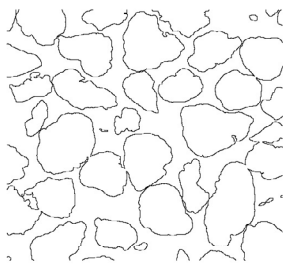
Phasengrenzen Probe F



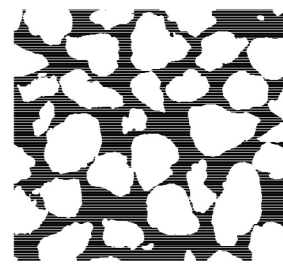
Porengrößenverteilung Probe F



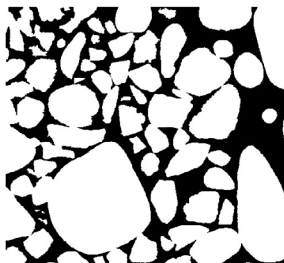
Porenraumfläche Probe G



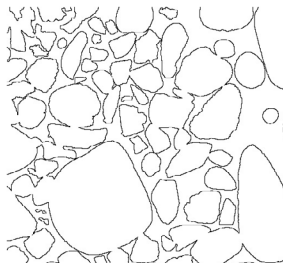
Phasengrenzen Probe G



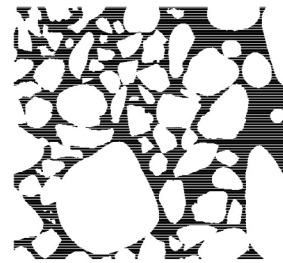
Porengrößenverteilung Probe G



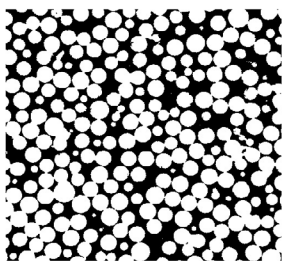
Porenraumfläche Probe H



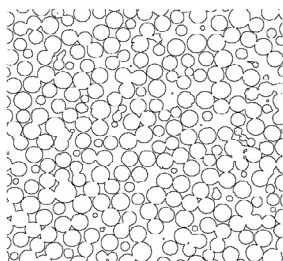
Phasengrenzen Probe H



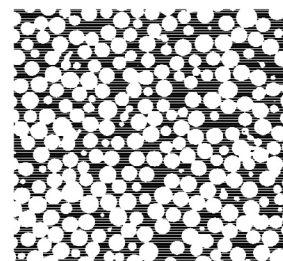
Porengrößenverteilung Probe H



Porenraumfläche Probe K



Phasengrenzen Probe K



Porengrößenverteilung Probe K

Abb. A55: Vollständige Reihe der bildanalytischen Auswertung der Proben B, F, G, H und K. Mit der ersten Spalte wurde der volumetrische Porenanteil, mit der zweiten Spalte die Größe der Phasengrenzfläche und mit der dritten Spalte die Porengrößenverteilung bestimmt, wobei die Linien in verschiedenen Richtungen erzeugt wurden.

Abbildungen der bildanalytischen Auswertung mit dem einfachen Verfahren der Porenlängenstatistik.

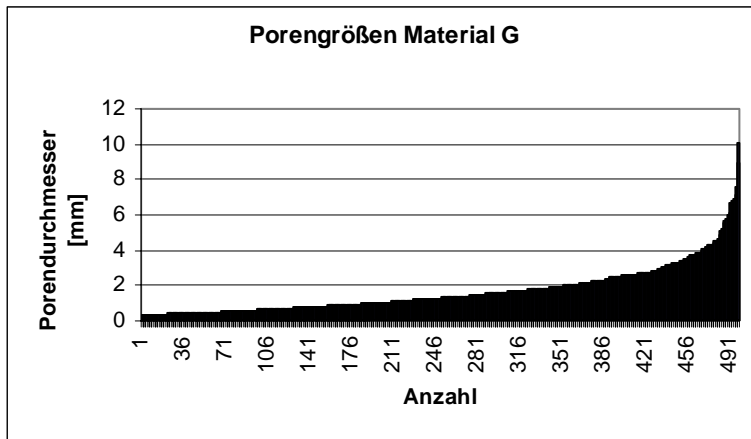


Abb. A56: Bildanalytische Auswertung der Porenraumdurchmesser bei Material G.

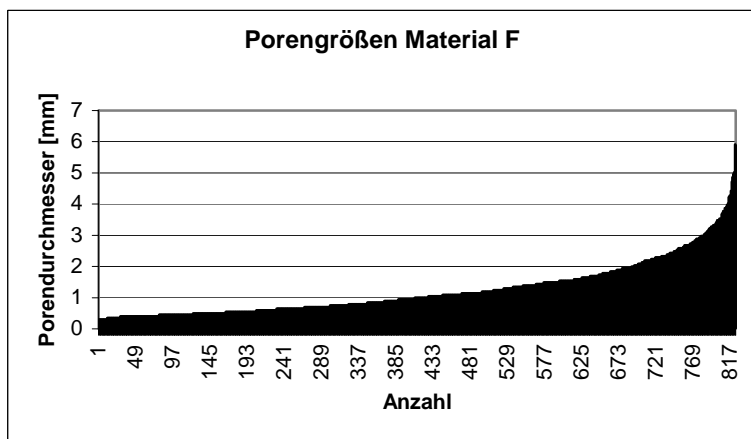


Abb. A57: Bildanalytische Auswertung der Porenraumdurchmesser bei Material F.

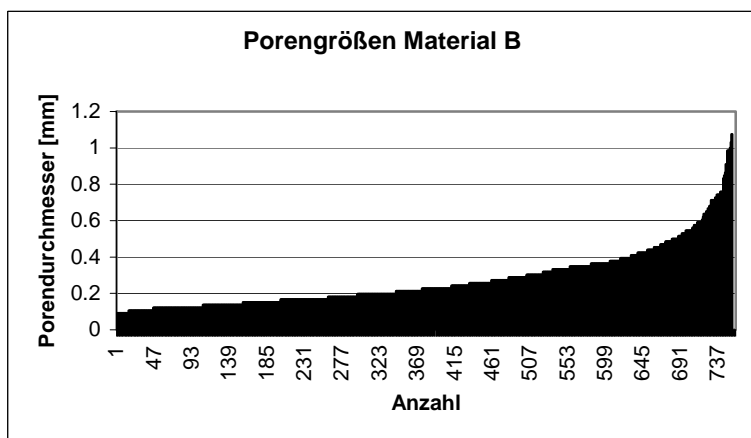


Abb. A58: Bildanalytische Auswertung der Porenraumdurchmesser bei Material B.

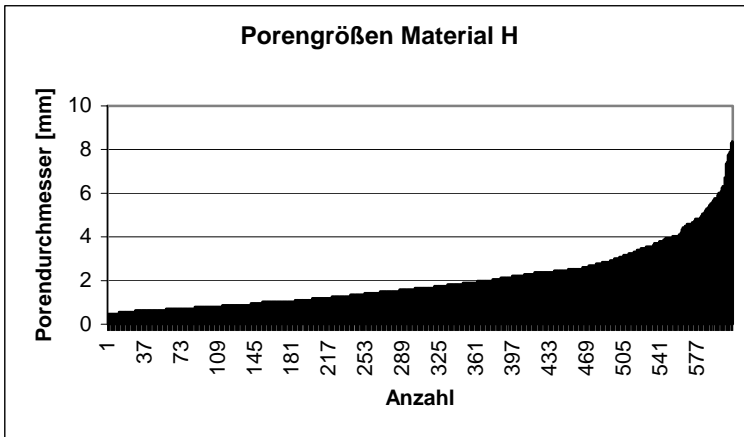


Abb. A59: Bildanalytische Auswertung der Porenraumdurchmesser bei Material H.

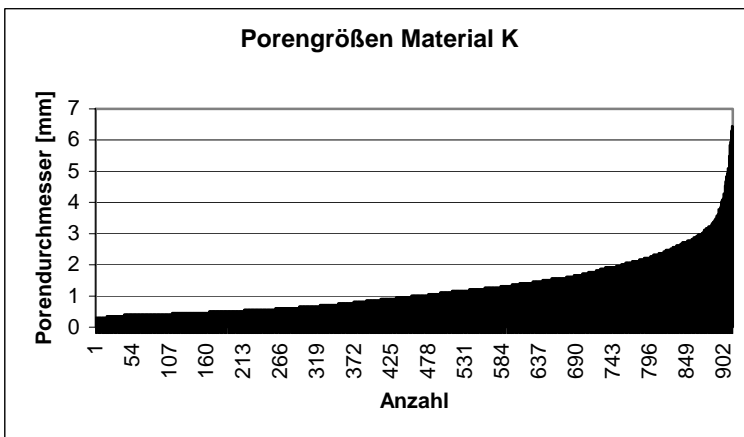


Abb. A60: Bildanalytische Auswertung der Porenraumdurchmesser bei Material K.

LEBENS LAUF

Name: Jens Michael Kuckelkorn
Geburtsdatum: 27.02.65
Geburtsort: Köln
Familienstand: verheiratet, 3 Kinder

09/1971-06/1975 Grundschule Großburgwedel
08/1975-05/1979 Gymnasium Großburgwedel
05/1979-12/1979 Colegio Alexander v. Humboldt, Lima, Perú
03/1980-12/1980 Universitätsschule ESEP E. Middendorf, Lima, Perú
02/1981-06/1984 Gymnasium Großburgwedel
06/1984 Abitur

10/1984-09/1985 Wehrdienst, Luftfahrzeugtechnik

11/1985-09/1987 Grundstudium Geologie/Paläontologie, Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU)
12/1987 Vordiplom Geologie/Paläontologie
10/1987-03/1992 Hauptstudium Geologie, LMU München
12/1991 Diplom Geologie, Diplomarbeit: "Tektogenese der Bull River Area, British Columbia, Kanada"
10/1992 Sommeruniversität Bremen, "Computer-Modelle zur Grundwasser-Hydraulik und zum Stofftransport"

08/1988-10/1988 Sampler, Geodata GmbH, Kontinentale Tiefbohrung Oberpfalz
10/1992-04/1993 Hilfwissenschaftler, AG Hydrogeologie und Umweltgeologie (AGH), Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie (IAAG), LMU München

05/1993-01/1999 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, AGH, IAAG, LMU München
04/1999-01/2001 Consultant, freiberufliche Tätigkeit
02/2001-10/2002 Consultant, Fa. Dezentral Bayern, Riegsee
02/2003-04/2003 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), Abt. Energieumwandlung und -speicherung, Garching
05/2003- Wissenschaftlicher Mitarbeiter, ZAE Bayern, Abt. Solarthermie und Biomasse, Garching

München, 20.09.04
J. M. Kuckelkorn