

Wassertransport in Kapillarsperren

Markierungsversuche im Labormaßstab

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

Katrin Osterkamp

30.09.2004

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Stefan Wohnlich
2. Berichterstatter: Prof. Dr. Ludwig Masch

Tag der mündlichen Prüfung: 23.03.2005

Kurzfassung

Die Kapillarsperre stellt ein alternatives Oberflächenabdichtungssystem für Deponien dar. Sie besteht aus einem geneigten Schichtenverbund, bei dem die feinkörnige Kapillarschicht (KS) von der gröberkörnigen Kapillarbruchschicht (KBS) unterlagert wird. Unter ungesättigten Bedingungen führt der ausgeprägte Texturunterschied an der Schichtgrenze zu einer Behinderung der vertikalen Wasserbewegung. Erst bei Überschreiten der lateralen Dränkapazität der KS setzt ein Wasserübertritt in die KBS ein. Bei Rückgang der Belastung regeneriert sich das System.

Zur Untersuchung des Wassertransports in der KS wurden in einem Versuchstank zum einen Markierungsversuche mit einem Cocktail aus den Fluoreszenztracern Na-Naphthionat (Na), Uranin (U), Pyranin (P) und Sulforhodamin B (SRB) durchgeführt, wobei die Tracereingabe als momentane Eingabe in Form eines Dirac-Impulses erfolgte (Tm-Versuche). Zum anderen wurde eine Lösung aus dem Fluoreszenztracer U und NaBr als Salztracer mittels kontinuierlicher Eingabe zugeführt (Tk-Versuche). Die Berechnungsraten betragen jeweils 20 l/d bis 80 l/d. Zur Abschätzung des Sorptions- und Transportverhaltens der Tracer erfolgten ergänzend Batch-Versuche (Schüttelversuche) sowie Säulenversuche unter ungesättigten Bedingungen mit Durchflussraten zwischen 2 l/d und 80 l/d. Die Tracereingabe bei den Säulenversuchen wurde analog zu den Tankversuchen ausgeführt (Sm- bzw. Sk-Versuche).

In den Batch-Versuchen zeigt U eine geringe Sorptivität mit Verteilungskoeffizienten K_d bis max. $0,08 \text{ cm}^3/\text{g}$, während die K_d -Werte von P (bis $1,18 \text{ cm}^3/\text{g}$) und SRB ($0,83 \text{ cm}^3/\text{g}$ bis $2,92 \text{ cm}^3/\text{g}$) auf eine ausgeprägte Sorptionsneigung dieser beiden Fluoreszenzfarbstoffe hindeuten. Für Na ist keine messbare Wechselwirkung mit dem KS-Material festzustellen, so dass dieser Tracer als Referenz bei der Beurteilung des Transportverhaltens der Stoffe verwendet wird.

Das in den Säulenversuchen mit momentaner Eingabe (Sm) ermittelte Transportverhalten der Fluoreszenztracer entspricht den Ergebnissen der Batch-Versuche. Die höchsten Retardationsfaktoren R_D im Vergleich zu Na zeigt SRB mit 1,6 bis 2,3, gefolgt von P mit 1,2 bis 1,6 und U mit max. 1,15. Die Rückgewinnung der Tracer beträgt nahezu 100%, so dass eine irreversible Sorption ausgeschlossen werden kann. Die Auswertung der Sm-Versuche mit dem Programm FIELD (Version 5, MALOSZEWSKI 2000) ergibt eine Aufspaltung des Tracerdurchgangs in drei bis sechs Teilkurven. Ursache ist eine vermutlich durch die mangelhafte Funktion der eingesetzten Verteilerplatte hervorgerufene Ungleichverteilung des Wassergehalts in der Säule, die experimentell nachgewiesen werden konnte.

Die Säulenversuche mit kontinuierlicher Eingabe (Sk) zeigen als wichtigstes Ergebnis ein nahezu identisches Verhalten von U und NaBr. Daher wird NaBr als geeignet für den Einsatz in den nachfolgenden Tankversuchen angesehen.

Auch in den Tankversuchen mit momentaner Eingabe (Tm-Versuche) ist bei der Modellierung mit FIELD eine Aufspaltung des Tracerdurchgangs in bis zu zehn Teilkurven festzustellen. Ursache ist in diesem Fall die für eine Kapillarsperre typische Wassergehaltsverteilung in der KS, die durch eine Zunahme des Wassergehalts zur Schichtgrenze hin sowie hangabwärts charakterisiert ist. Das Transportverhalten der Fluoreszenzfarbstoffe ergibt ein ähnliches Bild wie in den Sm-Versuchen. U weist mit einem Retardationsfaktor von max. 1,12 eine geringe Sorptivität auf, die ebenso wie die Transportverzögerung von P mit R_D -Werten zwischen 1,07 und 1,41 den Werten aus den Sm-Versuche entspricht. Lediglich SRB zeigt eine deutlich erhöhte Retardation, die R_D -Werte liegen zwischen 2,67 und 4,38. Die Rückgewinnung beträgt für Na und U ca. 100%, dagegen erreichen P und SRB aufgrund des ausgeprägten Tailings der Durchgangskurven nur Werte von 98 % bzw. 96 %.

Bei den Tankversuchen mit kontinuierlicher Tracereingabe (Tk-Versuche) erlaubt der Einbau von Leitfähigkeitssonden, die Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit nach der Zugabe des Salztracers NaBr in einer vertikalen Ebene zu beobachten. Es ist ein wenige Zentimeter mächtiger Hauptfließweg direkt über der Schichtgrenze zu erkennen, in dem die höchsten Fließgeschwindigkeiten beobachtet werden. Tensio- metermessungen deuten auf das Vorhandensein nahezu gesättigter Verhältnisse in diesem Bereich hin, die zu maximalen Fließgeschwindigkeiten führen.

Abstract

Capillary barriers are alternative means for surface capping of landfills. Consisting of fine (KS)-over-coarse (KBS) soil layers vertical flow of soil water under unsaturated conditions is prevented by a sharp interface between the two layers. Downward seeping water is held in the fine capillary layer by capillary forces. To enable lateral drainage of the soil water in the sand layer, a certain slope inclination of the interface is necessary. These simple system works as long as the material specific capacity of the sand is not exceeded. Overloading the diversion capacity causes certain percolation through the barrier. However, a following reduction of seepage water leads to the regeneration of the barrier system recovering its full efficiency.

In an experimental tank unsaturated flow in the KS under different hydraulic conditions was investigated by tracer tests with varying hydraulic loading (water infiltration rates from 20 l/d to 80 l/d). Two types of tracer tests were carried out, which differ in the method of tracer injection. For the Tm-tests a cocktail of the fluorescent dyes uranine (U), sulforhodamine B (SRB), sodium-naphthionate (Na) and pyranine (P) is injected by Dirac-impulse, whereas for the Tk-tests U and sodium bromide (NaBr) are applied by step-function. Batch studies and column tests under unsaturated conditions (flow rates from 2 l/d to 80 l/d) were carried out to estimate the adsorption and transport behaviour of the tracers. Tracer injection for the column tests corresponds to the proceeding of the tank tests (Sm-tests and Sk-tests).

The results obtained from the batch studies show low distribution coefficients of U (K_d value max. $0.08 \text{ cm}^3/\text{g}$) and higher K_d values of P (up to $1.18 \text{ cm}^3/\text{g}$) and SRB ($0.83 \text{ cm}^3/\text{g}$ to $2.92 \text{ cm}^3/\text{g}$). For Na no sorptive influence of the testing material can be found, so that Na is used as reference concerning the transport behaviour of the dyes

The transport behaviour found in column tests carried out with pulse input of the fluorescent dyes cocktail (Sm-tests) corresponds to the results of the batch studies. The highest retardation factors R in comparison to Na are observed for SRB with values from 1.6 to 2.3, followed by P (1.2 to 1.6) and U (maximum value of 1.15). Tracer recovery reaches nearly 100 %, so that irreversible sorption of the dyes can be excluded. The evaluation of the breakthrough curves by the FIELD model (version 5, MALOSZEWSKI 2000) shows a splitting into three to six partial curves. Cause of this is an unsteady distribution of water content in the column, which is experimentally proved and is probably induced by a deficient function of the used water distribution plate.

The column tests with step input of U and sodium bromide (Sk-tests) demonstrate as a main result a nearly identical behaviour of the two tracers. So the suitability of sodium bromide for the following tank tests is indicated.

The results of the Tm-type tank experiments with pulse input of the fluorescent dyes cocktail evaluated by the FIELD model show also a splitting of the breakthrough curves, up to ten partial curves can be observed. In this case this is caused by the typical water content distribution in a capillary barrier, which is characterized by an increase of water content from the surface of the KS to the interface between KS and KBS as well as downwards following the slope inclination. The observed transport behaviour of the fluorescent dyes is similar to that found in the Sm-tests. U shows, with a retardation factor R_D of max. 1.12, a low sorptivity, which corresponds as well as the transport delay of P (R_D values between 1.07 and 1.41) with the results of the Sm-tests. Only SRB evinces an obviously increased retardation (R_D values from 2.67 to 4.38). Tracer recovery amounts about 100 % for U and Na, while P and SRB reach only 98 % and 96 %, respectively cause of the distinct tailings of their breakthrough curves.

During the Tk-tests with step input of U and sodium bromide conductivity probes in the KS allow to observe the changes in electrical conductivity after injection of the salt tracer NaBr. Highest flow velocities are found in a few centimeters thick main zone of water flow directly above the interface between KS and KBS. Tensiometric data prefigure nearly full saturation at that fringe, so that maximum flow velocities can occur.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
Symbole	XI
Abkürzungen	XIII
Danksagung	XIV
1 Einleitung	1
2 Kapillarsperren	3
2.1 Technische Anwendung	4
2.2 Einflussfaktoren.....	4
2.2.1 Materialeigenschaften.....	4
2.2.2 Hangneigung	5
3 Wasser- und Stofftransport in der ungesättigten Zone	7
3.1 Porosität und Wassersättigung	7
3.2 Potentialkonzept	7
3.3 Bodenwassercharakteristik	8
3.3.1 Einfluss der Körnung.....	8
3.3.2 Einfluss der Porengrößen	8
3.3.3 Hysterese	9
3.3.4 Parametrisierung der pF-Kurve	10
3.4 Wassertransport.....	10
3.5 Fingering	11
3.6 Temperatureinfluss	12
3.7 Stofftransport.....	13
3.7.1 Dispersion.....	13
3.7.2 Diffusion.....	13
3.7.3 Sorption	13
3.8 Modellierung von Markierungsversuchen.....	14
4 Laborversuche	17
4.1 Versuchsmaterialien	17
4.1.1 Korngrößenverteilung nach DIN 18 123	17
4.1.2 Filterstabilität.....	18
4.1.3 Korndichte	18
4.1.4 Dichte bei lockerster und dichtester Lagerung nach DIN 18 126	19
4.1.5 Wasserdurchlässigkeitsbeiwert nach DIN 18 130-1	19
4.1.6 Bodenwassercharakteristik	19
4.1.7 Kapillarer Aufstieg	19
4.1.8 Ungesättigte Wasserdurchlässigkeit.....	21

4.2	Markierungsstoffe.....	22
4.2.1	Fluoreszenzfarbstoffe	22
4.2.2	Salztracer	22
4.2.3	Fluoreszenzanalytik.....	23
4.3	Batch-Versuche	24
4.3.1	Durchführung	24
4.3.2	Ergebnisse.....	24
4.3.3	Diskussion der Batch-Versuche.....	26
4.4	Säulenversuche	27
4.4.1	Versuchsaufbau der Säulenversuche	27
4.4.2	Einbau des Versuchsmaterials	28
4.4.3	Durchführung der Tracerversuche in der Versuchssäule.....	28
4.4.4	Auswertung der Säulenversuche	29
4.4.5	Hydraulische Verhältnisse in der Versuchssäule.....	31
4.4.6	Ergebnisse der Säulenversuche mit kontinuierlicher Tracereingabe.....	32
4.4.7	Ergebnisse der Säulenversuche mit momentaner Tracereingabe.....	35
4.4.8	Interpretation der Säulenversuche	40
4.5	Tankversuche.....	45
4.5.1	Versuchsaufbau der Tankversuche	45
4.5.2	Messtechnik	46
4.5.3	Einbau der Kapillarsperre	48
4.5.4	Durchführung der Tracerversuche im Versuchstank	48
4.5.5	Auswertung der Tankversuche	49
4.5.6	Hydraulische Verhältnisse im Versuchstank	50
4.5.7	Ergebnisse der Tankversuche mit kontinuierlicher Tracereingabe.....	52
4.5.8	Ergebnisse der Tankversuche mit momentaner Tracereingabe	56
4.5.9	Interpretation der Tankversuche	60
5	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse.....	65
6	Literatur	69
7	Anhang	77
7.1	Testmaterialien	77
7.1.1	Bodenphysikalische Kennwerte	77
7.1.2	Kleinsäulenversuche - Einbauparameter	78
7.1.3	VAN GENUCHTEN-Parameter	78
7.2	Analytik	78
7.2.1	Fluoreszenzspektralphotometer Shimadzu RF-5000	78
7.2.2	Feldfluorimeter GGUN-FL.....	79
7.3	Batch-Versuche	79
7.3.1	Ergebnisse Uranin.....	79
7.3.2	Ergebnisse Pyranin	79
7.3.3	Ergebnisse Sulforhodamin B	79
7.4	Versuchsanlage Säule	80
7.4.1	Verwendete Materialien/Geräte.....	80
7.4.2	Einbauparameter.....	80
7.5	Säulenversuche mit momentaner Eingabe	81
7.5.1	Sm021	81
7.5.2	Sm022	81
7.5.3	Sm023	82
7.5.4	Sm051	82
7.5.5	Sm052.....	83

7.5.6	Sm053	83
7.5.7	Sm101	84
7.5.8	Sm102	84
7.5.9	Sm103	85
7.5.10	Sm201	85
7.5.11	Sm202	86
7.5.12	Sm203	86
7.5.13	Sm204	87
7.5.14	Sm205	87
7.5.15	Sm206	88
7.5.16	Sm401	88
7.5.17	Sm402	89
7.5.18	Sm403	89
7.5.19	Sm601	90
7.5.20	Sm602	90
7.5.21	Sm603	91
7.5.22	Sm801	91
7.5.23	Sm802	92
7.5.24	Sm803	92
7.6	Versuchsanlage Tank	93
7.6.1	Verwendete Materialien und Geräte	93
7.6.2	Einbauparameter	94
7.7	Tankversuche mit kontinuierlicher Eingabe	95
7.7.1	Tk20	95
7.7.2	Tk40	98
7.7.3	Tk60	101
7.7.4	Tk80	104
7.8	Tankversuche mit momentaner Eingabe	107
7.8.1	Tm20	107
7.8.2	Tm40	109
7.8.3	Tm60	111
7.8.4	Tm80	113
7.8.5	Tm20-2	115
7.8.6	Tm40-2	117
7.8.7	Tm80-2	119

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Funktionsschema einer Kapillarsperre	3
Abb. 2: Fließverhalten in einer Kapillarsperre	3
Abb. 3: Regelaufbau eines Oberflächenabdichtungssystems (Deponieklasse II) nach TASI	4
Abb. 4: Einfluss der Körnung auf die pF-Kurve	8
Abb. 5: Hysterese der pF-Kurve	10
Abb. 6: Temperaturabhängigkeit von Dichte, Viskosität und Oberflächenspannung von Wassers	12
Abb. 7: Gesamtdurchgang eines nicht-reaktiven Tracers als Ergebnis der Superposition dreier Teilkurven T1-T3	15
Abb. 8: Schrittweise Anpassung der Modellkurven T1-T3 an den Gesamtdurchgang eines nicht-reaktiven Tracers	15
Abb. 9: Korngrößenverteilung der Versuchsmaterialien KS_v und KBS_v . Grau unterlegt: Körnungsbänder der für den Aufbau einer Kapillarsperre geeigneten Materialien	18
Abb. 10: Versuchsaufbau der Kleinsäulenversuche	20
Abb. 11: Bewässerungs- und Entwässerungskurven der Kleinsäulenversuche für KBS_v und KS_v	20
Abb. 12: pF-Kurve der Versuchsmaterialien	21
Abb. 13: Berechnete ungesättigte Durchlässigkeit nach VAN GENUCHTEN (1980)	21
Abb. 14: K_d -Werte (Mittelwerte) der Tracer Na, U, P und SRB in Abhängigkeit von der Ausgangskonzentration C_0	25
Abb. 15: Sorbierte Tracermasse C_2 der Tracer U, P und SRB in Abhängigkeit von der Gleichgewichtskonzentration in Lösung	26
Abb. 16: Versuchsaufbau der Säulenversuche	27
Abb. 17: Schematische Darstellung der Auswertung der Sk-Versuche am Beispiel des Tracers Uranin ...	29
Abb. 18: FIELD-Modellierung des Tracerdurchgangs mit einer Fitkurve sowie als Summenkurve aus vier Teilkurven am Beispiel von Versuch Sm201-Na	30
Abb. 19: Relative Wassersättigung Θ in der Versuchssäule während der Markierungsversuche in Abhängigkeit der verschiedenen Durchflussraten	31
Abb. 20: Vertikale Sättigungsverteilung in der Versuchssäule bei Versuchsende	31
Abb. 21: Relative Wassersättigung Θ in Abhängigkeit von der Durchflussrate Q für die Sk-Versuche ...	32
Abb. 22: Mittlere Fließgeschwindigkeiten v_0 in Abhängigkeit von der Durchflussrate Q für die Sk-Versuche	32
Abb. 23: Tracerdurchgangskurven der Versuche Sk20, Sk40, Sk60 und Sk80 für die Tracer U (C/C_0) und NaBr (LF)	33
Abb. 24: Tatsächliche und berechnete Eingabedauer t_{pulse} für die Sk-Versuche	34
Abb. 25: Tatsächlicher und berechneter wassererfüllter Porenanteil n_w für die Sk-Versuche	34
Abb. 26: Relative Rückgewinnung R von U für die Sk-Versuche	34
Abb. 27: Anzahl der Teilkurven T_x und deren prozentuale Rückgewinnung R_{fit} (Anteil am Gesamtdurchgang)	35
Abb. 28: Zusammenhang zwischen Durchflussrate Q und Wassersättigung Θ für die Sm-Versuche	36
Abb. 29: Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit v_0 der Teilkurven T1-T4 von der Durchflussrate Q für die Sm-Versuche	37

Abb. 30: Abhängigkeit der longitudinalen Dispersivität α_L der Teilkurven T1-T4 von der Fließgeschwindigkeit v_0 für die Sm-Versuche.....	38
Abb. 31: Rückgewinnung der Tracer Na, U, P und SRB für die Sm-Versuche.....	39
Abb. 32: Retardationsfaktoren von U, P und SRB gegenüber Na, berechnet aus den Teilkurven T1 der Tracerdurchgänge bei den Sm-Versuchen.....	40
Abb. 33: Modellvorstellung zur Entstehung der Teilkurven beim Tracerdurchgang der Sm-Versuche.....	41
Abb. 34: Vergleich des Konzentrationsrückgangs von U zwischen Sk- und Sm-Versuchen am Beispiel von Sk40 und Sk403.....	42
Abb. 35: Horizontale und vertikale Wassergehaltsverteilung in zwei Testsäulen nach Durchflussraten von 8,9 l/d und 59,8 l/d.....	43
Abb. 36: Versuchstank – Seitenansicht.....	45
Abb. 37: Versuchsaufbau der Tankversuche.....	45
Abb. 38: Anordnung der Tensiometer (P), Leitfähigkeitssonden (LF) und der Temperatursonde (T) in der Kapillarsperre (Seitenansicht bei einer Neigung von 15,6°).....	46
Abb. 39: Doppelschlauchsystem der Tensiometeranlage.....	47
Abb. 40: Horizontierte Sättigungsverteilung in der KS beim Ausbau des Tanks (Durchmesser der Kreise und Zahlenwerte: Wassersättigung Θ [%]).....	49
Abb. 41: Wasserbilanzen der Tankversuche.....	51
Abb. 42: Ersteinsatz der LF-Erhöhung nach Tracereingabe für die Sonden LF1 bis LF14.....	52
Abb. 43: Mittlere Fließgeschwindigkeit v_0 für die Sonden LF1-LF5, LF9, LF12 und LF14.....	53
Abb. 44: Tatsächliche und berechnete Eingabedauer t_{pulse} für die Tk-Versuche.....	53
Abb. 45: Tracerdurchgangskurven der Versuche Tk20, Tk40, Tk60 und Tk80 für den Tracer U (C/C_0) und NaBr (LF).....	54
Abb. 46: Vol. Wassergehalt θ und wassererfülltes Volumen V_w in Abhängigkeit von der Durchflussrate Q für die Tk-Versuche.....	55
Abb. 47: Mittlere Fließgeschwindigkeiten v_0 in Abhängigkeit von der Durchflussrate Q für die Tk-Versuche.....	55
Abb. 48: Relative Rückgewinnung R von U für die Tk-Versuche.....	56
Abb. 49: Anzahl der Teilkurven bei der Modellierung des Tracerdurchgangs der Tm-Versuche mit FIELD.....	56
Abb. 50: Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit v_0 der Teilkurven T1-T4 von der Durchflussrate Q für die Tm-Versuche.....	57
Abb. 51: Abhängigkeit der longitudinalen Dispersivität α_L der Teilkurven T1-T4 von der Fließgeschwindigkeit v_0 für die Tm-Versuche.....	58
Abb. 52: Vergleich der für Na ermittelten Dispersivitäten (T1 und T2) mit denen für U in Abhängigkeit von der Durchflussrate Q	59
Abb. 53: Rückgewinnung der Tracer Na, U, P und SRB für die Tm-Versuche.....	59
Abb. 54: Retardationsfaktoren von U, P und SRB gegenüber Na, berechnet aus den Teilkurven T1 der Tracerdurchgänge bei den Tm-Versuchen.....	60
Abb. 55: Fließwege im Versuchstank.....	61
Abb. 56: Vergleich der Tracerdurchgänge der Tk- und Tm-Versuche am Beispiel von Tk60 und Tm60.....	63

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Auswahlkriterien für Kapillarsperrenmaterialien.....	5
Tab. 2: Einteilung der Porengrößen.....	9
Tab. 3: Filterstabilität der Testmaterialien nach TERZAGHI und SN 670 125	18
Tab. 4: Berechnete und nach DIN 18 130 (1998) ermittelte k_f -Werte für die Versuchsmaterialien	19
Tab. 5: Konzentrationen der Ausgangslösungen für die Batch-Versuche.....	24
Tab. 6: Eingabemassen der Tracer für die Säulenversuche	28
Tab. 7: Reihenfolge der Säulenversuche	29
Tab. 8: Eingabemassen der Tracer für die Tankversuche.....	48
Tab. 9: Reihenfolge der Tankversuche.....	49

Symbole

Symbol	Bedeutung [Dimension]
α_L	longitudinale Dispersivität [L]
α_R	Randwinkel [°]
α_T	transversale Dispersivität [L]
α_{VG}	VAN GENUCHTEN-Parameter [1/L]
Δt	i-te Einzelmessung der Tracerkonzentration [T]
γ	Oberflächenspannung [(ML/T ²)/L]
Θ	relative Wassersättigung [L ³ /L ³]
θ	volumetrischer Wassergehalt [L ³ /L ³]
θ_r	volumetrischer Residualwassergehalt [L ³ /L ³]
θ_s	volumetrischer Sättigungswassergehalt [L ³ /L ³]
ρ	Dichte einer Flüssigkeit [M/L ³]
ρ_d	Trockendichte [M/L ³]
ρ_s	Korndichte [M/L ³]
ψ	Wasserspannung [L]
ψ_a	Lufttrittswert [L]
ψ_h	hydraulisches Potential
ψ_m	Matrixpotential
ψ_x	Potential allgemein
ψ_z	Gravitationspotential
C^*	Wasserkapazität [1/L]
C	Tracerkonzentration [M/L ³]
C_i	Tracerkonzentration bei der i-ten Einzelmessung [M/L ³]
C_0	Ausgangskonzentration eines gelösten Stoffes [M/L ³]
C_1	Konzentration einer Lösung nach Gleichgewichtseinstellung [M/L ³]
C_2	Menge des sorbierten Stoffes pro Feststoffmasse [M/M]
C_c	Krümmungszahl [L ² /L ²]
D_L	longitudinaler Dispersionskoeffizient []
D_T	transversaler Dispersionskoeffizient []
E	Effizienz der Modellierung [%]
f	Korngrößenverteilungsindex nach BLOEMEN [-]
g	Erdbeschleunigung [9,81 m/s ²]
h	Höhe über Bezugsniveau [L]
h_{kap}	kapillare Steighöhe [L]

K_d	Verteilungskoeffizient [L^3/M]
k_f	Gesättigter Wasserdurchlässigkeitsbeiwert [L/T]
k_r	Relativer Wasserdurchlässigkeitsbeiwert [-]
k_u	Ungesättigter Wasserdurchlässigkeitsbeiwert [L/T]
LF_{Max}	maximale elektrische Leitfähigkeit
LF_{Start}	Ausgangswert der elektrischen Leitfähigkeit
M	Masse des injizierten Tracers [M]
M_d	Medianwert der Korngrößenverteilung [L]
m	Trockenmasse eines Feststoffes [M]
m_B	Trockenmasse des Feststoffes für den Batch-Versuch [M]
m_{VG}	VAN GENUCHTEN-Parameter [-]
$\max n$	Porenanteil bei lockerster Lagerung [-]
$\min n$	Porenanteil bei dichtester Lagerung [-]
n	Gesamtporosität [L^3/L^3]
n_w	wassererfüllter Porenanteil [-]
n^*	Anzahl der Teilkurven eines Tracerdurchgangs [-]
n_{VG}	VAN GENUCHTEN-Parameter [-]
P_D	Dispersionsparameter [-]
p	relativer Anteil einer Teilkurve an der Rückgewinnung des Tracers [-]
pF	dekadischer Logarithmus der Wasserspannung [-]
Q	Durchflussrate [L^3/T]
Q_{max}	laterale Dränkapazität einer Kapillarsperre [$L^3/(LT)$]
q	Darcy-Fluss [L/T]
R	Rückgewinnung des Gesamtdurchgangs [%] oder [-]
R'	Rückgewinnung einer Teilkurve [%] oder [-]
R^*	der Restkurve entsprechende Rückgewinnung [%]
R_D	Retardationsfaktor [-]
R_{fit}	modellierte Rückgewinnung [%]
r_{kap}	Kapillarradius [L]
S	sorbierte Anteil eines gelösten Stoffes im Verhältnis zur Ausgangskonzentration C_0 [%]
spez. el. LF	spezifische elektrische Leitfähigkeit; Einheit [$\mu S/cm$]
t	Zeit [T]
t_0	mittlere Verweilzeit [T]
t_{max}	Erstaufreten eines Tracers [T]
U	Ungleichförmigkeitszahl [-]
V	Volumen [L^3]
V_B	Volumen der Batch-Lösung [L^3]
V_{ges}	Gesamtvolumen eines Probenkörpers [L^3]

V_p	Porenvolumen eines Probenkörpers [L^3]
V_w	wassererfülltes Porenvolumen eines Probenkörpers [L^3]
v_a	Abstandsgeschwindigkeit von Wasser [L/T]
v_0	Abstandsgeschwindigkeit [L/T]
v_T	Transportgeschwindigkeit eines Stoffes [L/T]
w	gravimetrischer Wassergehalt [M/M]
x	Ortskoordinate [L]
z	Ortsvariable [L]

Abkürzungen

GDA	früher: Geotechnik der Deponien und Altlasten, heute: Arbeitskreis Geotechnik der Deponiebauwerke der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT)
KBS	Kapillarbruchschicht
KS	Kapillarschicht
KS_v	Versuchsmaterial Kapillarschicht
LF	elektrische Leitfähigkeit
Na	Natrium-Naphthionat
P	Pyranin
T _x	x-te Teilkurve des Tracerdurchgangs bei den Markierungsversuchen mit momentaner Eingabe
SRB	Sulforhodamin B
U	Uranin

Danksagung

Die experimentellen Untersuchungen zu dieser Arbeit wurden zwischen Dezember 2001 und Juli 2003 in der Arbeitsgruppe Hydrogeologie und Umweltgeologie der Ludwig-Maximilians-Universität München durchgeführt. Viele Leute haben einen Teil dazu beigetragen, dass diese Arbeit in der hier vorliegenden Form entstanden ist. Im Einzelnen möchte ich mich bedanken bei

Prof. Dr. S. Wohnlich für die Anregung dieser Arbeit und das Interesse an ihrem Fortgang sowie für die mir gewährte Möglichkeit, bei der Erstellung multimedialer Lernumgebungen im Rahmen des BMBF-Projektes „FLUWU“ ganz neue und sehr interessante Erfahrungen zu machen,

Prof. Dr. Dr. h.c. H. Miller für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie für die Möglichkeit zur Nutzung der Einrichtungen des Lehrstuhls für Allgemeine und Angewandte Geologie,

Prof. Dr. P. Maloszewski für die Diskussionsbereitschaft und Hilfestellung und für Überlassung der Programme FIELD und DIFFER zur Modellierung des Tracerdurchgangs,

Dr. H. Behrens für die Einführung in die Fluoreszenzanalytik,

meinen Kollegen Holger Alstetter für den Bau der Messtechnikanlage sowie der Unterstützung beim Bau des automatischen Probenehmers, Dr. Christoph Barth für die Programmierung des Messprogramms für die Tankversuche,

Dr. Steffen Bender (Danke auch für die hilfreiche Durchsicht des Manuskripts) und Dr. Klaus Dorsch für ein offenes Ohr bei diversen Fragen und die notwendige Entspannung in der Cappuccino-Runde, zu der später auch Kai Zosseder gehörte und die oftmals das Highlight des Tages darstellte,

den weiteren Kollegen Dr. Thomas R. Rude, Barbara Kainzmaier, Bernd Kottke, Christine Vornehm, Thomas Hanauer, Dr. Stefan Hülmeyer, Dr. Adrian Huber, Dr. Berhanu Gizaw und Carla Krutzsch für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die Hilfe bei Problemen verschiedenster Art,

Monika Witt, der Sekretärin und „guten Seele“ der Arbeitsgruppe,

Frau Roeske vom Dekanat der Fakultät für Geowissenschaften,

meinen Eltern, die mich immer unterstützt haben

und nicht zuletzt bei meinem Mann Frank, der mir immer Kraft und Mut gegeben hat und mich besonders in der letzten Phase der Erstellung dieser Arbeit mit großem Einsatz beim Babysitten entlastet hat.

1 Einleitung

Die Kapillarsperre als alternative Oberflächenabdichtung für Deponien ist bereits seit über zwanzig Jahren Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Eine Vielzahl von Labor- und Felduntersuchungen unterschiedlicher Dimension beschäftigt sich mit der Aufstellung von Auswahlkriterien für die verwendeten Materialien und der hydraulischen Bemessung von Kapillarsperren (u.a. KÄMPF et al. 1998, KÄMPF 2000, BAUER 2001, HUDE 1999, HUDE & HOPPE 2000) sowie der geotechnischen Stabilität und der bautechnischen Durchführung von Kapillarsperrensystemen (u.a. AMANN & MENDOZA 1999, ROTH 1999, KUNTSCHKE 1999, HUDE, KATZENBACH & NEFF 1999). Die GDA-Empfehlung E2-33 „Kapillarsperren als Oberflächenabdichtungssystem“ (Entwurf) in GARTUNG & NEFF 2000 fasst den derzeitigen Stand der Technik für Planung und Ausführung von Kapillarsperren zusammen.

Die Möglichkeiten, die Markierungsversuche zur quantitativen Untersuchung des Fließregimes in einer Kapillarsperre bieten, wurden bisher jedoch kaum genutzt. ZISCHAK & HÖTZL (1997) prüften mit Hilfe der einmaligen Eingabe von vier Fluoreszenztracern (Eosin, Na-Naphthionat, Uranin, Pyranin) ein Lysimeter-Testfeld auf der Deponie Karlsruhe-West auf Randumläufigkeiten. Im Zuge dieses Tests wurden Fließgeschwindigkeiten in der Kapillarschicht anhand der Na-Naphthionat-Durchgangskurve ermittelt. In Hamburg (STEINERT et al. 1997, STEINERT 1999) wurde in einem Rinnenversuch die Kapillarsperre an einem Profil an verschiedenen Punkten mit einem Farbtracer eingefärbt und die Verlagerung des Farbstoffes über eine Sichtscheibe beobachtet. Eine quantitative Auswertung dieses Versuchs erfolgte nicht. WOHNLICH führte 1991 halb-quantitative Markierungsversuche zur Abschätzung von Fließwegen und -zeiten mit dem Fluoreszenztracer Uranin in einem Kapillarsperrenaufbau durch.

In der vorliegenden Arbeit soll im Labormaßstab der ungesättigte Wassertransport in der Kapillarsperre mit Hilfe des Einsatzes von Markierungsstoffen untersucht werden. Als Tracer dienen hier mit Na-Naphthionat, Uranin, Pyranin und Sulforhodamin B zum einen vier Fluoreszenzfarbstoffe, zum anderen wird NaBr als Salztracer verwendet. Neben der Betrachtung des Wasserflusses bietet sich zusätzlich die Möglichkeit, das Verhalten der verschiedenen Tracer unter definierten Laborbedingungen in einem homogenen, feinkornarmen Material unter ungesättigten Bedingungen zu vergleichen. Das Versuchsmaterial, dessen bodenmechanische und -physikalische Eigenschaften durch eine Vielzahl an Untersuchungen charakterisiert wird, stammt von einem Kapillarsperren-Testfeld auf der Deponie Bayreuth, das in den Jahren 1998-2002 von der Arbeitsgruppe Hydrogeologie des Instituts für Geologie der Universität München betrieben und wissenschaftlich betreut wurde (BARTH 2004)

Die Untersuchungen sind in drei Teilbereiche untergliedert. In Batch-Versuchen, die als Schüttelversuche angelegt sind, wird die Wechselwirkung der Fluoreszenztracer mit dem Kapillarschichtmaterial betrachtet. Säulenversuche dienen zur Bestimmung des Transportverhaltens der Markierungsstoffe und in einem Versuchstank wird der Wassertransport in dem Kapillarsperrenaufbau untersucht. Bei Säulen- und Tankversuchen werden jeweils Tracerversuche mit momentaner Eingabe eines Cocktails aus den vier Fluoreszenztracern sowie Versuche mit kontinuierlicher Eingabe von NaBr und Uranin durchgeführt.

Der Tracerdurchgang der Versuche mit momentaner Eingabe wird mit dem Programm FIELD (Version 5, MALOSZEWSKI 2000) modelliert, das die mittlere Fließgeschwindigkeit v_0 , mittlere Fließzeit t_0 und die longitudinale Dispersivität α_L liefert. Die Versuche mit kontinuierlicher Eingabe dagegen werden mit einem einfachen Verfahren zur Bestimmung der mittleren Fließzeit ausgewertet und daraus die mittlere Fließgeschwindigkeit berechnet.

2 Kapillarsperren

Generell bezeichnet man als Kapillarsperre eine Fein-Über-Grob-Lagerung von Lockermaterialien. Unter gesättigten Verhältnissen bildet diese Kombination ein hoch wasserdurchlässiges System. Liegen allerdings ungesättigte Bedingungen vor, kommt es aufgrund des ausgeprägten Texturunterschiedes an der Schichtgrenze zu einer Behinderung der vertikalen Wasserbewegung, wie bereits MILLER & GARDNER (1962), HILLEL (1980) und MIYAZAKI (1987) feststellten. Dieses Phänomen tritt auch in Böden mit geogenem oder pedogenem Körnungsunterschied auf, was in fein- und mittelporenen Horizonten oberhalb eines grobkörnigen Bereichs oftmals zu Haftnässe führt. Ein Beispiel dafür sind Böden im Tertiären Hügelland Bayerns, die aus einer Lößauflage über sandig-kiesigen Tertiärsedimenten entstanden sind. Auch in Lockersedimenten, die stets eine gewisse Inhomogenität hinsichtlich der Körnung aufweisen, lassen sich Anzeichen dieses Kapillarsperreneffektes etwa in Form von Ausfällungen von Fe-Oxiden beobachten.

Im Folgenden wird unter Kapillarsperre in einer etwas engeren Definition ein geneigter Schichtenverbund unter ungesättigten Bedingungen verstanden, bei dem eine grobkörnige Schicht, hier als Kapillarbruchschicht (KBS) von einer feinkörnigen Schicht, der Kapillarschicht (KS), überlagert wird. Von oben zusickerndes Wasser wird aufgrund der höheren Kapillarkräfte in der KS entgegen der Schwerkraft gehalten und entsprechend der ungesättigten Leitfähigkeit des Materials lateral dem Gefälle folgend abgeführt (Abb. 1). An der Unterseite der KS bildet sich ein hängender Kapillarsaum aus, ein Wasserübertritt in die luftgefüllten Grobporen der KBS erfolgt zunächst nicht. Lediglich ein Wassertransport über Filmfluss an den Oberflächen benachbarter Körner ist möglich, dessen Ausmaß jedoch nur sehr gering ist (LU et al. 1994a). Erst wenn die Wasserspannung durch Aufsättigung der KS so gering wird, dass auch die Grobporen der KBS bewässert werden, kommt es durch Porenfluss zu einer Wasserabsickerung in die KBS. Dies ist der Fall, wenn das maximale kapillare Haltevermögen und damit die maximale Höhe des Kapillarsaums erreicht werden. Voraussetzung für eine solche Aufsättigung ist, dass der Wasserzufluss in die KS höher ist als deren laterale Dränkapazität Q_{max} , die maximal lateral abführbare Wassermenge. Gründe dafür können zu hohe Sickerwasserraten oder eine Akkumulation des lateral abfließenden Wassers in den unteren Hangbereichen sein. Bei einem Durchbruchereignis tritt das überschüssige Wasser in die KBS über, während der KS-Abfluss nahezu konstant dem Maximalabfluss entspricht (Abb. 2). Geht die hydraulische Belastung des Systems wieder zurück, führt das zu einer Regeneration der Kapillarsperre.

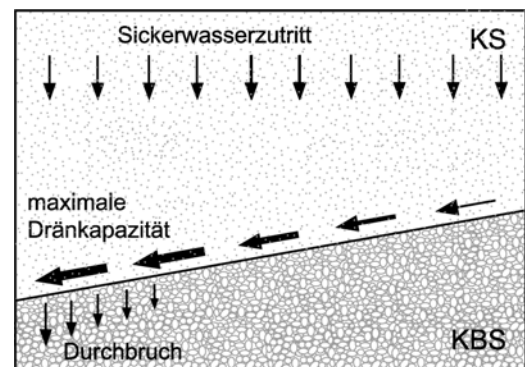


Abb. 1: Funktionsschema einer Kapillarsperre

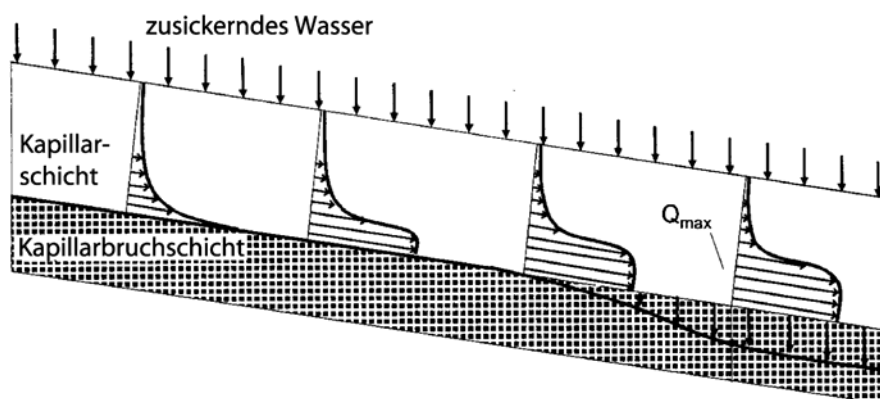


Abb. 2: Fließverhalten in einer Kapillarsperre (nach KÄMPF 2000)

2.1 Technische Anwendung

Die abdichtende Wirkung dieses im Grunde sehr einfachen Systems macht man sich in Oberflächenabdichtungen von Deponien zu Nutze. Seit den ersten Veröffentlichungen über Kapillarsperren als Abdichtungssystem (RANÇON 1980, MADSEN 1983) wurden bereits ab Mitte der 80er Jahre in verschiedenen Ländern erste Deponieabdichtungen mit Kapillarsperren ausgeführt (Schweiz: COLOMBI 1986, CSD 1990, BRATSCHI & MATTER 1994) bzw. Testfelder eingerichtet (Dänemark: ANDERSEN & MADSEN 1985; Deutschland: u.a. MELCHIOR & MIEHLICH 1987, JELINEK & HUDE 1994, JELINEK 1993, USA: u.a. NYHAN 1990, BENSON et al. 1994, STORMONT 1996).

In Deutschland ist mit Inkrafttreten der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TASi) im Jahre 1991 der Einsatz von alternativen, von der Regelabdichtung abweichenden Dichtungssystemen unter Voraussetzung eines Gleichwertigkeitsnachweises (u. a. KINDSMÜLLER 1999, WOHLNICH et al. 2000) in Deutschland ausdrücklich zugelassen. Für Oberflächenabdichtungssysteme, deren Regelaufbau für Deponieklasse II in Abb. 3 dargestellt ist, ist der Einsatz einer Kapillarsperre denkbar und wird seit einigen Jahren auf Testfeldern erprobt, bzw. bereits in die Tat umgesetzt (u.a. JELINEK 1996, ZISCHAK 1997, HUDE et al. 1999, KÄMPF 2000, BDS 2003, BARTH 2004).

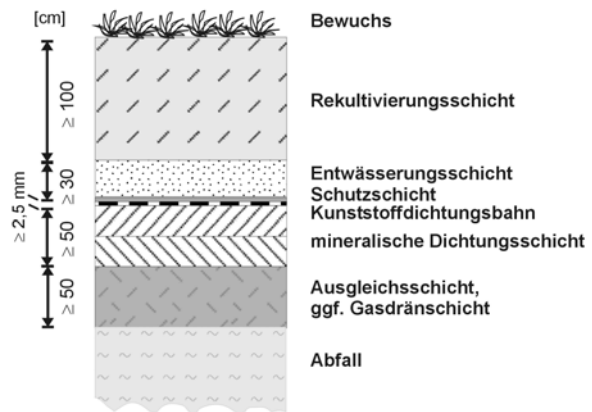


Abb. 3: Regelaufbau eines Oberflächenabdichtungssystems (Deponieklasse II) nach TASi

2.2 Einflussfaktoren

Aus dem dargestellten Funktionsmechanismus der Kapillarsperre ergibt sich, dass die Materialeigenschaften der KS, besonders hinsichtlich des Kapillarverhaltens und der ungesättigten Leitfähigkeit, den größten Einfluss auf den Wirkungsgrad der Kapillarsperre haben. Daneben spielt die Hangneigung mit ihren Auswirkungen auf die laterale Abflussleistung eine große Rolle. Beide Einflussfaktoren werden hinsichtlich der Dimensionierung von Kapillarsperre bei einem technischen Einsatz in Oberflächenabdichtungen von Deponien nachfolgend näher beschrieben.

2.2.1 Materialeigenschaften

Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit einer Kapillarsperre ist das Vorhandensein eines deutlichen Porengrößensprungs an der Schichtgrenze, um einen ausreichend großen hydraulischen Unterschied zwischen beiden Materialien zu erzielen. Damit spielt die Auswahl einer geeigneten Materialkombination eine entscheidende Rolle für die Leistungsfähigkeit.

Von besonderer Bedeutung ist dabei das Material der KS, an das deutlich höhere Anforderungen als an die KBS zu stellen sind: Einerseits muss eine hohe kapillare Steighöhe erzielt werden, andererseits ist auf eine ausreichend hohe ungesättigte Wasserleitfähigkeit zu achten – zwei Eigenschaften, die sich im Grunde gegenseitig ausschließen. Daher muss in jedem Fall ein Kompromiss eingegangen werden, der von Sanden mit einer steilen Kornsummenkurve in optimaler Weise erfüllt wird. Zur Feststellung der Eignung sind eine Vielzahl von bodenmechanischen und bodenphysikalischen Versuchen sowie Berechnungen durchzuführen. Sie werden bei der Charakterisierung der im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen verwendeten Materialien in Kapitel 4.1 vorgestellt.

Die KBS dient in erster Linie als Auflager für die KS unter Erzeugung eines Porengrößensprungs an der Schichtgrenze. Dabei ist darauf zu achten, dass die Filterstabilität beider Materialien gegeben ist, um ein „Aufweichen“ der erforderlichen scharfen Schichtgrenze durch Eintrag von Feinteilchen aus der KS in die KBS zu verhindern.

BAUER (2001) schlägt nach umfangreichen Säulen- und Tankversuchen die in Tab. 1 aufgeführten Auswahlkriterien für Kapillarsperrenmaterialien vor. Die Mächtigkeiten von KS und KBS im Schichtaufbau

orientieren sich an der kapillaren Steighöhe plus Sicherheitszuschlag (KS) sowie an der bautechnischen Ausführbarkeit (KBS).

Tab. 1: Auswahlkriterien für Kapillarsperrenmaterialien (nach BAUER 2001)

Kriterium	KS	KBS
Korngrößenverteilung	0,06 - 2,0 mm	filterstabil zu KS
Korndichte	$\geq 2,6 \text{ g/cm}^3$	$\geq 2,6 \text{ g/cm}^3$
Ungleichförmigkeit (d_{60}/d_{10})	≤ 3	≤ 3
Bodengruppe nach DIN 18 196 (1988)	SE	GE
k_f -Wert berechnet nach BEYER (1964)	$> 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	10^{-3} m/s
k_u -Wert bei $\psi_m = -100 \text{ cmWS}$ nach BLOEMEN (1980)	$> 10^{-8}$	$< 10^{-10}$
Luft Eintrittswert ψ_a	$-44 < \psi_a < -10 \text{ cm WS}$	1
Wasseraufnahmefähigkeit nach DIN 52 103 (1972)	1 Gew. %	1 Gew. %
Anteil schaumiger und glasiger Stücke nach DIN 4301(1981)	--	$\leq 5 \text{ Gew. %}$
Rundungsgrad	gut bis sehr gut gerundet	gut bis sehr gut gerundet
Zuordnungswert nach LAGA bei Reststoffen (1995)	Z 0 bis Z 1.1	Z 1.2 bis Z 2
Mächtigkeit	ca. 40 cm	ca. 25 cm
Neigung	$> 10 \%$	

Zur einwandfreien Trennung von KS und KBS kann besonders im Hinblick auf die bautechnische Herstellung der Kapillarsperre der Einsatz eines Geotextils hilfreich sein (WOHNLICH & BAUER 1999). Dessen Eigenschaften sind auf die verwendeten Bodenmaterialien abzustimmen, wobei trotz der Verwendung eines geotextilen Filters die Filterstabilität der mineralischen Materialien gegeben sein muss. Als günstig ist die Verwendung eines hydrophoben Geotextils anzusehen. Dessen Benetzungswiderstand bewirkt eine Erhöhung der kritischen hydraulischen Druckhöhe, bei deren Überschreiten es zu einem Wasserdurchbruch kommt. Außerdem ist in Tankversuchen eine schnellere Regeneration der Kapillarsperre nach einem Durchbruch zu beobachten (BALZ et al. 1999, BAUER 2001).

2.2.2 Hangneigung

Zwischen den Größen Hangneigung und Haltungslänge (Länge des zu entwässernden Hangs) besteht eine wechselseitige Abhängigkeit hinsichtlich des Leistungsvermögens einer Kapillarsperre. Bei einer vorgegebenen Materialkombination nimmt die Leistungsfähigkeit sowohl mit zunehmender Hangneigung als auch mit abnehmender Hanglänge zu. Im ersten Falle führt das höhere Gefälle zu einem beschleunigten lateralen Wassertransport, wodurch auftretende Belastungsspitzen schneller abgeführt werden. Die Verkürzung der Haltungslänge verhindert eine zu starke Akkumulation des Sickerwassers in der KS und verringert so das Risiko eines Wasserdurchbruchs im unteren Bereich des Hanges (bzw. vor einer Zwischendränage). Derzeit wird als Untergrenze der wirksamen Hangneigung eine Neigung von 8° angesehen (GARTUNG & NEFF 2000), die Obergrenze wird durch die Standsicherheit der verwendeten Materialkombination vorgegeben.

3 Wasser- und Stofftransport in der ungesättigten Zone

Die ungesättigte Zone stellt ein Drei-Phasen-System aus Festsubstanz, Wasser und Bodenluft dar. Bei den hier ausschließlich betrachteten Lockergesteinen bilden die Festpartikel das Korngerüst, die dazwischen liegenden Hohlräume (Poren) sind in wechselnden Anteilen mit Wasser und Luft gefüllt. Im Folgenden wird der Begriff Boden nicht im bodenkundlichen Sinne, sondern allgemein als ungesättigter Lockergesteinskörper verwendet.

Das Wasser in der ungesättigten Zone unterliegt nicht nur der Gravitation, sondern erfährt verschiedene Wechselwirkungen mit der festen Bodenmatrix. Entsprechend dieser Interaktionen wird das Bodenwasser nach DIN 4049-3 (1994) unterteilt in *Sickerwasser*, das überwiegend der Schwerkraft folgend im Sickerraum abwärts verlagert wird (Perkolation), und *Haftwasser*, welches überwiegend durch Adsorptionskräfte an Kornoberflächen (*Adsorptionswasser*) oder durch Kapillarkräfte im Porenraum (*Kapillarwasser*) entgegen der Schwerkraft im Boden gehalten wird. Der Anteil von Adsorptions- und Kapillarwasser an der gesamten Haftwassermenge ist abhängig vom Wassergehalt im Boden: je geringer der Wassergehalt ist, desto mehr überwiegt die adsorptive gegenüber der kapillaren Bindung (SCHACHTSCHABEL et al. 1992). Die maximale Haftwassermenge wiederum hängt von der Körnung des Bodens ab: je feinkörniger das Material ist, desto größer ist die spezifische, adsorbierende Oberfläche. Zusätzlich führt ein zunehmender Anteil an Feinporen zu einer Erhöhung der Kornkontakte und damit zu einer höheren kapillaren Bindung von Wasser.

3.1 Porosität und Wassersättigung

Eine quantitative Beschreibung des Drei-Phasen-Systems Boden erfolgt anhand der Größen Porosität und Wassergehalt bzw. Sättigung.

Die Porosität n gibt das Verhältnis des Porenraums V_p zum Gesamtvolumen V_{ges} des Probenkörpers an:

$$\text{Gleichung 1} \quad n = \frac{V_p}{V_{ges}}$$

Ein Maß für die Wasserfüllung des Porenraums sind der volumetrische Wassergehalt θ und die relative Sättigung Θ . Der Anteil des wassererfüllten Porenraums n_w wird beim volumetrischen Wassergehalt auf das Gesamtprobenvolumen, bei der Sättigung auf das Gesamtporenvolumen bezogen.

Der Sättigungswassergehalt θ_s stellt den Maximalwassergehalt bei vollständiger Füllung des Porenraums mit Wasser dar. Für den Residualwassergehalt θ_r , der den minimalen Wassergehalt eines Bodens bezeichnet, existiert keine einheitliche Definition in der Literatur, auch fehlt eine Vorgabe zu dessen Bestimmung. Beide Extremwerte stehen mit der Sättigung in dem in Gleichung 2 angegebenen Zusammenhang. Vollsättigung mit $\Theta = 1$ besteht demnach bei $\theta = \theta_s$.

$$\text{Gleichung 2} \quad \Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

3.2 Potentialkonzept

Um die auf das Bodenwasser einwirkenden Kräfte, die die Wasserbewegung beeinflussen, erfassen zu können, wurde 1907 von BUCKINGHAM der Begriff des Potentials eingeführt. Ein Potential ψ bezeichnet die Arbeit, die erforderlich ist, um eine bestimmte Wassermenge von einem bestimmten Punkt in einem Kraftfeld zu einem Bezugspunkt zu transportieren und wird nach folgender Gleichung beschrieben (SCHACHTSCHABEL et al. 1992):

$$\text{Gleichung 3} \quad \psi_x = m \cdot g \cdot h$$

Je nach physikalischer Bezugsgröße (Masse, Volumen oder Gewicht) ergeben sich unterschiedliche Dimensionen für das Potential ($[L^2/T^2]$, $[M/(T^2 L)]$ oder $[L]$).

Die wichtigsten Einflüsse auf den Wassertransport in der ungesättigten Zone sind die Gravitation sowie Kapillar- und Adsorptionskräfte. Weitere Kräfte, die durch Auflast, veränderten Gas- oder Wasserdruck

oder den Einfluss gelöster Salze entstehen, spielen bei den hier betrachteten Zusammenhängen keine Rolle und werden daher nicht weiter erläutert.

HARTGE & HORN (1991) definieren das Gravitationspotential ψ_z als die Arbeit, die verrichtet werden muss, um eine Mengeneinheit Bodenlösung zu einer gegebenen Höhe zu transportieren. Liegt diese Höhe oberhalb der gewählten Bezugshöhe, so erhält das Gravitationspotential ein positives Vorzeichen.

Den Einfluss der Bodenmatrix spiegelt das Matrixpotential ψ_m wider. Es umfasst alle durch die Festphase auf das Bodenwasser ausgeübten Kräfte, vor allem die adsorptiven und kapillaren Ursprungs. Das Potential entspricht nach HARTGE & HORN (1991) der Arbeit, die verrichtet werden muss, um eine Mengeneinheit Bodenlösung dem Boden in einer bestimmten Höhe zu entziehen. Da das Matrixpotential dem Gravitationspotential entgegenwirkt, erhält es ein negatives Vorzeichen. Als Wasserspannung ψ oder Saugspannung wird der Betrag des Matrixpotentials bezeichnet. Besonders in der Bodenkunde gebräuchlich ist auch der sog. pF-Wert, der dekadische Logarithmus der Wasserspannung:

$$\text{Gleichung 4} \quad \text{pF} = \log(\psi)$$

Das Matrixpotential in einem Boden ist abhängig vom Wassergehalt: je geringer der Wassergehalt ist, desto stärker ist das Bodenwasser an der Matrix gebunden, desto negativer wird also das Matrixpotential. Analog dazu erhöht sich bei abnehmendem Wassergehalt die Wasserspannung. Diesen materialspezifischen Zusammenhang zwischen Matrixpotential bzw. Wasserspannung und dem Wassergehalt gibt die pF-Kurve (auch als Wasserspannungskurve, Retentionskurve oder Bodenwassercharakteristik bezeichnet) wieder. Zur Beurteilung der Wasserbewegung im Boden werden Gravitations- und Matrixpotential zum hydraulischen Potential ψ_h zusammengefasst:

$$\text{Gleichung 5} \quad \psi_h = \psi_z + \psi_m$$

Ist das hydraulische Potential an allen Stellen gleich groß, so tritt keine Wasserbewegung auf, es herrscht ein statisches Gleichgewicht. Meistens jedoch existieren Potentialdifferenzen, die zu einem Wasserfluss vom hohen in Richtung des niedrigeren Potentials führen.

3.3 Bodenwassercharakteristik

Die Bodenwassercharakteristik oder auch pF-Kurve stellt den Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Wasserspannung bzw. pF-Wert eines Bodenmaterials dar.

Abgesehen von der für ein bestimmtes Material als konstant anzusehenden Korngrößenverteilung (und Kornform) wird der Verlauf der Kurve stark beeinflusst vom Bodengefüge und der damit verbundenen Porengrößenverteilung sowie der Richtung der Wassergehaltsänderung.

3.3.1 Einfluss der Körnung

Abb. 4 zeigt den Zusammenhang zwischen der Körnung eines Bodens und dessen pF-Kurve. Generell gilt: je höher der Feinanteil, desto größer ist die adsorbierende Oberfläche und desto größer ist der Anteil an Feinporen, die das Bodenwasser kapillar binden. Daher entwässert das Sandmaterial bereits bei relativ geringen Wasserspannungen, während der Ton noch bei großen Wasserspannungen hohe Wassergehalte aufweist.

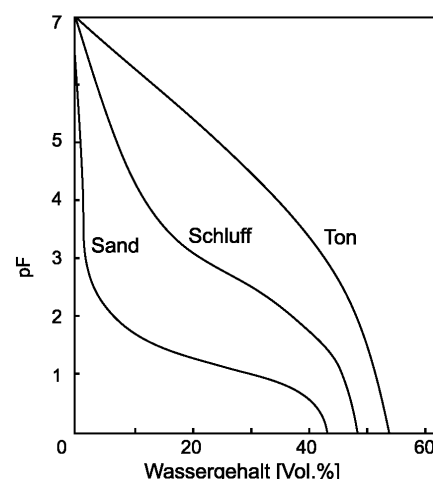


Abb. 4: Einfluss der Körnung auf die pF-Kurve (nach SCHACHTSCHABEL 1992)

3.3.2 Einfluss der Porengrößen

Letztendlich kann die pF-Kurve als Ausdruck der Porengrößenverteilung eines Materials angesehen werden. Voraussetzung dafür ist die Annahme eines starren Korngerüsts, das bei Böden ohne quellfähige Komponenten als quasi gegeben angesehen werden kann (HARTGE & HORN 1991). Da die Poren im Bo-

den strukturell von „idealen“, d.h. zylindrischen Kapillaren abweichen, werden Äquivalentdurchmesser für Bodenporen angegeben. Sie umfassen alle Poren, die dieselbe Aufstiegshöhe aufweisen wie eine Kapillare diesen Durchmessers (SCHACHTSCHABEL et al. 1992).

Die Gleichung zur Berechnung des kapillaren Aufstiegs einer Flüssigkeit in kreiszylindrischen Kapillaren (Gleichung 6) zeigt, dass die Kapillarkräfte, die auf das Bodenwasser einwirken und auf denen das Prinzip der Kapillarsperre basiert, von den Eigenschaften des Wassers (Oberflächenspannung γ , Dichte ρ), deren Wechselwirkungen mit der Bodenmatrix (Randwinkel α_R) sowie vom Porenradius (r_{kap}) abhängig ist. Oberflächenspannung, Dichte und Randwinkel und damit auch die kapillare Steighöhe h_{kap} sind dabei temperaturabhängig.

Gleichung 6
$$h_{kap} = \frac{2\gamma}{r_{kap} \cdot \rho \cdot g} \cdot \cos \alpha_R$$

Wird für die Wasserspannung die physikalische Bezugsgröße Gewicht gewählt, erhält sie die Dimension einer Länge (z.B. cm WS), die auch als kapillare Aufstiegshöhe aufgefasst werden kann. So lässt sich aus Gleichung 6 der Äquivalentdurchmesser für jede Wasserspannung berechnen. Tab. 2 stellt eine so berechnete und seit langem in der Bodenkunde gebräuchliche Einteilung der Porengrößen und ihre Funktion im Boden dar.

Tab. 2: Einteilung der Porengrößen (verändert nach REHFUESS 1990 und KUNTZE et al. 1994)

Bezeichnung	Äquivalentdurchmesser [µm]	Wasserspannung		Funktion
		[cm WS]	[pF]	
weite Grobporen	> 50	1 - 60	0 - 1,8	schnell dränend
enge Grobporen	50 - 1	60 - 300	1,8 - 2,5	langsam dränend
weite Mittelporen	10 - 0,2	300 - 1 000	2,5 - 3	langsam dränend
enge Mittelporen	3 - 0,2	1 000 - 15 000	3 - 4,2	pflanzenverfügbar
Feinporen	< 0,2	> 15 000	> 4,2	Totwasser

Die Porengrößenverteilung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Wasserbewegung in der ungesättigten Zone. Dabei spielen neben der Größe auch die Kontinuität der Poren sowie deren Anordnung bei der Betrachtung des Wasserflusses eine Rolle.

Beeinflusst wird das als räumliche Anordnung der Festpartikel und Hohlräume in einem Boden (SCHLICHTING et al. 1995) definierte Bodengefüge durch die Lagerungsdichte: Bei einer höheren Lagerungsdichte tritt automatisch eine Verringerung des Gesamtporenvolumens und damit verbunden auch eine Veränderung der Porengrößenverteilung in einem Bodenmaterial auf. Außerdem können zusätzlich zu den körnungsbedingten Primärporen beispielsweise durch Schrumpfungsvorgänge, Wurzelwachstum oder Tieraktivitäten sog. Sekundärporen entstehen. Sie zeichnen sich im Vergleich mit den Primärporen meist durch größere Äquivalentdurchmesser und eine höhere Kontinuität aus. LUXMOORE et al. (1990) verwenden bei der Betrachtung des Wasserflusses im Boden eine porengrößenunabhängige Klassifikation in texturale Poren, die kleinskalig vernetzt sind und durch die Körnung bestimmt werden, und strukturalen Poren mit großskaliger Vernetzung, die durch Bodenbildungsprozesse entstanden sind.

3.3.3 Hysterese

Eine weitere Einflussgröße auf Ausprägung der Bodenwassercharakteristik stellt die Art der Wassergehaltsänderung dar: je nachdem, ob eine Bewässerung eines trockenen oder die Entwässerung eines gesättigten Materials betrachtet wird, bilden sich unterschiedliche Kurvenverläufe aus. Abb. 5 veranschaulicht dieses als Hysterese bezeichnete Verhalten:

Die primäre Entwässerungskurve ergibt sich bei der ersten Entwässerung einer vollgesättigten Probe. Sie ist nicht reproduzierbar, da bei wiederholter Bewässerung aufgrund von Lufteinschlüssen keine vollständige Sättigung mehr erreicht wird. Die Entwässerung erfolgt bis

zu einem nicht unterschreitbaren Residualwassergehalt θ_r . Eine nachfolgende Bewässerung erfolgt bis zum Erreichen des Grenzwassergehalts θ_s , wobei die Wassergehalte stets unter denen der Hauptentwässerungskurve liegen. Als Gründe dafür werden in der Literatur (z.B. HILLEL 1980, MIYAZAKI 1993, LU et al. 1991) verschiedene Phänomene angegeben: die unregelmäßige Form von Bodenporen, die Unterschiede im Be- und Entwässerungsverhalten zur Folge haben („ink-bottle-effekt“), unterschiedliche Randwinkel beim Vorrücken bzw. beim Rückzug des Wassers in einer Pore (Randwinkelhysterese), Filmfluss über Porenzwickelwasser bei nicht vollständiger Austrocknung sowie Luftfeinschlüsse bei der Bewässerung.

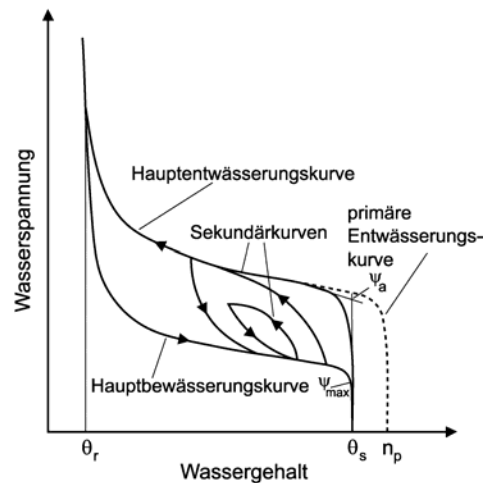


Abb. 5: Hysterese der pF-Kurve (KÄMPF 2000)

3.3.4 Parametrisierung der pF-Kurve

Ein weit verbreitetes Verfahren zur mathematischen Beschreibung der pF-Kurve stellt das auf dem Ansatz von MUALEM (1976, zit. in VAN GENUCHTEN 1980) basierende Verfahren von VAN GENUCHTEN (1980) dar. Zwischen dem volumetrischen Wassergehalt θ und der Wasserspannung ψ besteht danach folgender Zusammenhang:

$$\text{Gleichung 7} \quad \theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left\{1 + (\alpha \cdot \psi)^{n_{VG}}\right\}^{m_{VG}}}$$

Die sog. VAN GENUCHTEN-Parameter α_{VG} , n_{VG} und m_{VG} ($m_{VG} = 1 - 1/n_{VG}$) sind rein mathematische Parameter, deren Bestimmung entweder aus der gemessenen pF-Kurve näherungsweise graphisch oder mittels numerischer Verfahren durch Anpassen einer Modellkurve (Fitkurve) an die Messkurve erfolgen kann. VAN GENUCHTEN et al. (1991) entwickelten dazu das Programm RETC (*RETention Curve*), das eine nichtlineare Methode der kleinsten Quadrate zur Abschätzung der unbekanntenen Modellparameter aus der pF-Kurve verwendet. Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung der VAN GENUCHTEN-Parameter bietet das Programm SOILPROP (Vers. 2.1, 1990; Environmental Systems & Technologies, Inc.), das auf einer Auswertung der Korngrößenverteilung eines Bodenmaterials beruht. Dabei ist zu bedenken, dass schon die Parametrisierung einer pF-Kurve und die daraus berechnete ungesättigte Leitfähigkeit mit größeren Unsicherheiten behaftet sind (DURNER 1998). Dies gilt erst recht bei der Verwendung von aus der Korngrößenverteilung bestimmten Parametern, besonders bei heterogenen Materialien.

3.4 Wassertransport

Geht man davon aus, dass unter ungesättigten Bedingungen zwar ein verringerter Fließquerschnitt für die Wasserbewegung zur Verfügung steht, die Mechanismen der Wasserbewegung sich im Vergleich zum gesättigten Zustand prinzipiell jedoch nicht ändern, so kann die bekannte DARCY-Gleichung für gesättigten Wasserfluss unter Verwendung einer Erweiterung auch auf ungesättigte Bedingungen angewendet werden (BUCKINGHAM-DARCY-Gleichung für den eindimensionalen Fall):

$$\text{Gleichung 8} \quad q = -k_u(\psi) \cdot \frac{\partial \psi_h}{\partial z} = -k_u(\psi) \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right)$$

Der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert k_f der DARCY-Gleichung wird dabei ersetzt durch den ungesättigten Beiwert k_u , dessen Größe abhängig von der Wasserspannung ψ und damit auch vom Wassergehalt θ des teilgesättigten Bodens ist.

Unter instationären Bedingungen kann es zu Differenzen zwischen Wasserzu- und -abfluss eines Kontrollvolumens kommen. Zum Ausgleich der Massenbilanz müssen daher Wassergehaltsänderungen inner-

halb des Kontrollvolumens auftreten. Dies beschreibt die Kontinuitätsgleichung, hier dargestellt für den eindimensionalen Fall:

$$\text{Gleichung 9} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z}$$

Die RICHARDS-Gleichung als allgemeine Bewegungsgleichung für Wasser in der ungesättigten Zone kombiniert die BUCKINGHAM-DARCY-Gleichung mit der Kontinuitätsgleichung. Gleichung 10 stellt die RICHARDS-Gleichung in ihrer Druckform dar, d.h. in Abhängigkeit von der Wasserspannung ψ :

$$\text{Gleichung 10} \quad C^* \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k_u(\psi) \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right]$$

Dabei ist die Wasserkapazität C^* definiert als die Änderung des Wassergehalts gegen die Änderung der Wasserspannung, d.h. als Ableitung der pF-Kurve nach der Wasserspannung:

$$\text{Gleichung 11} \quad C^* = \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$$

Um die RICHARDS-Gleichung lösen zu können, muss demnach sowohl der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Wasserspannung (pF-Kurve) sowie die Abhängigkeit der ungesättigten Durchlässigkeit von der Wasserspannung und somit vom Wassergehalt bekannt sein.

Die experimentelle Bestimmung der $k_u(\theta)$ - oder $k_u(\psi)$ -Funktion ist sehr aufwändig und mit großen Schwierigkeiten behaftet. Daher wurden verschiedene Methoden zur Abschätzung der k_u -Kurve aus anderen, leichter zu bestimmenden Parametern entwickelt. Einige Verfahren verwenden die Korngrößenverteilung und weitere Bodeneigenschaften zur Bestimmung der ungesättigten Durchlässigkeit (z.B. BLOEMEN 1980, WÖSTEN & VAN GENUCHTEN 1988), andere basieren auf der Auswertung der pF-Kurve (z.B. RUSSO 1988, ROSSI & NIMMO 1994, ASSOULINE 2001, CHAN & GOVINDARAJU 2003). Dazu gehört auch das empirisch ermittelte Verfahren von VAN GENUCHTEN (1980), das weite Verbreitung gefunden hat. Danach lässt sich die ungesättigte Durchlässigkeit basierend auf dem MUALEM-Modell (1976) und der oben beschriebenen Parametrisierung der pF-Kurve folgendermaßen berechnen:

$$\text{Gleichung 12} \quad k_r(\psi) = \frac{\left\{ 1 - (\alpha \cdot \psi)^{n_{\text{VG}}-1} \left[1 + (\alpha \cdot \psi)^{n_{\text{VG}}} \right]^{-m_{\text{VG}}} \right\}^2}{\left\{ 1 + (\alpha \cdot \psi)^{n_{\text{VG}}} \right\}^{0,5 m_{\text{VG}}}}$$

Aus der relativen Durchlässigkeit k_r erhält man unter Berücksichtigung der gesättigten Durchlässigkeit k_f die ungesättigte Durchlässigkeit k_u :

$$\text{Gleichung 13} \quad k_u(\psi) = k_f \cdot k_r(\psi)$$

Allerdings wird nach GRÄSLE & HORN (1998) bei einer Berechnung der ungesättigten Durchlässigkeit aus den VAN GENUCHTEN-Parametern und der gesättigten Durchlässigkeit die Leistungsfähigkeit einer Kapillarsperre oftmals deutlich überschätzt, so dass die ermittelten Werte lediglich als Anhaltspunkte dienen sollten. Für eine numerische Modellierung ist daher eine direkte Bestimmung der ungesättigten Durchlässigkeit erforderlich. Beispiele hierzu liefern SCHEIBKE et al. (1991), PLAGGE (1991) und BARTH (2004).

3.5 Fingering

Bei der Infiltration von Wasser an der Schichtgrenze zwischen feinkörnigem über grobkörnigem Material können Instabilitäten der Infiltrationsfront auftreten. Sie führen an der Schichtgrenze zur Bildung von präferentiellen Fließwegen in fingerartiger Form („Fingering“). Durch die Infiltration von oben verringert sich die Wasserspannung in der feinkörnigen Schicht allmählich, deren Wassergehalt nimmt zu und es bildet sich ein hängender Kapillarsaum an der Schichtgrenze aus. Zu einem Wasserübertritt in die grobkörnige Schicht kommt es jedoch erst, wenn die Wasserspannung klein genug ist, dass die kleinsten Poren in der größeren Schicht bewässert werden (Kapillarsperren-Effekt). Sie leiten das Wasser rasch nach un-

ten und verhindern so, dass der Wassergehalt oberhalb der Schichtgrenze weiter ansteigt. Dadurch wird eine Bewässerung der größeren Poren in der unterliegenden Schicht behindert und der Wasserfluss erfolgt weiterhin über die Finger. Untersuchungen zu diesem Phänomen finden sich bei HILL & PARLANGE 1972, WHITE et al. 1977, HILLEL & BAKER 1988, GLASS et al. 1989, BAKER & HILLEL 1990, SELKER et al. 1992a, 1992b, LIU et al. 1994a, 1994b, LU et al. 1994b u.a.

Fingerbildung wird nur bei Infiltration in trockenem Ausgangsmaterial (Grobmaterial) beobachtet. Ist das Material zu Beginn der Bewässerung bereits feucht, bleibt die Infiltrationsfront stabil. Der Wasserfilm, der sich über die Grenzfläche hinweg zieht und Wassertransport als Filmfluss ermöglicht, hebt in diesem Fall die hydraulische Trennung zwischen beiden Schichten auf. Einmal gebildete Finger sind während anhaltender Infiltration aufgrund von Hysterese-Effekten stabil und überdauern auch nachfolgende Bewässerungszyklen.

Fingering tritt nicht nur in einer Fein-über-Grob-Lagerung auf, sondern auch innerhalb eines homogenen Materials (z.B. TAMAI et al. 1987, WOHLNICH 1991, DEXTER 1993, RITSEMA & DEKKER 1994). Als Gründe hierfür werden Luftinklusionen unterhalb der Infiltrationsfront, ungleichmäßige Bewässerung oder auch durch organische Substanzen hervorgerufene schlechte Benetzbarkeit des Bodens angeführt.

3.6 Temperatureinfluss

Die Temperaturabhängigkeit der Wassereigenschaften Dichte, Viskosität (beide aus GRIGULL et al. 1990; Dichte berechnet aus dem spezifischen Volumen) und Oberflächenspannung (LANGGUTH & VOIGT 1980) ist in Abb. 6 dargestellt. Sie beeinflussen bei Temperaturänderungen den Wassertransport in flüssiger Phase, indem sie die gesättigte und ungesättigte Durchlässigkeit, die Bodenwassercharakteristik sowie das Kapillarverhalten im Boden verändern.

Unter ungesättigten Verhältnissen führt eine Temperaturerhöhung wegen der Verringerung der adsorptiven Kräfte zu einer Abnahme des Wassergehalts, die mit der Abnahme der Oberflächenspannung einhergeht (HOPMANS & DANE 1986, LIU & DANE 1993, VIELHABER 1995). Dies führt zu einer Reduzierung der ungesättigten Durchlässigkeit. Gleichzeitig bewirkt die abnehmende Viskosität eine Erhöhung der Durchlässigkeit aufgrund des verringerten Reibungswiderstands. Nach BAUER (2001) heben sich diese beiden Effekte bei niedrigen Matrixpotentialen teilweise auf.

Betrachtet man die Bodenwassercharakteristik eines Materials, so reagiert der Bewässerungsast nur wenig, die Entwässerungsphase dagegen stark auf Temperaturveränderungen (SHE & SLEEP 1998). Somit ergibt sich eine verstärkte Hysterese. Bei einem Temperaturanstieg nimmt das Retentionsvermögen des Bodens aufgrund der reduzierten Oberflächenspannung ab. Ebenso verringert sich die kapillare Steighöhe (Gleichung 6).

Verschiedene experimentelle Untersuchungen (CONSTANTZ 1982, HOPMANS & DANE 1986, LIU & DANE 1993 u.a.) zeigen, dass die tatsächlich gemessenen Veränderungen teilweise deutlich über den aus der Änderung von Viskosität und Oberflächenspannung berechneten Werten liegen. Als Gründe werden temperaturbedingte Veränderungen des Bodenluftvolumens, eine durch gelöste Stoffe im Vergleich zu reinem Wasser verringerte Oberflächenspannung und Viskosität der Bodenlösung sowie - bezüglich der Erhöhung des Wassertransports - die temperaturinduzierte Wasserdampfdiffusion angesehen.

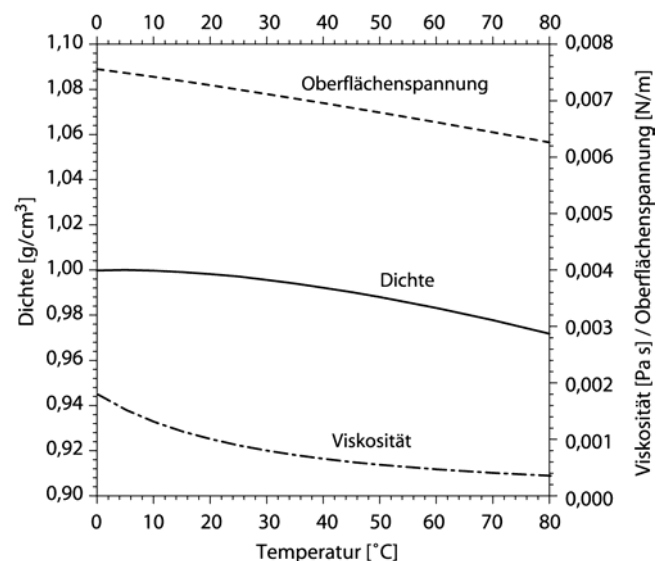


Abb. 6: Temperaturabhängigkeit von Dichte, Viskosität und Oberflächenspannung von Wassers

Für Kapillarsperren wird nach Labor- und Feldbeobachtungen eine Beeinflussung der Dichtwirkung durch anisotherme Verhältnisse vermutet, die auf Wasserdampfdiffusion zurückzuführen ist. Nähere Ausführungen dazu finden sich bei KÄMPF 1993, BALZ 1997 und ZISCHAK 1997.

3.7 Stofftransport

Den Idealfall des Stofftransports stellt die Advektion, d.h. der Transport eines Stoffes mit der Strömung, in Strömungsrichtung und mit Strömungsgeschwindigkeit ohne Veränderung der Konzentrationsverteilung im Zeitverlauf, dar. Dies tritt in der Natur jedoch in dieser Form praktisch nicht auf. Aufgrund von strukturellen Heterogenitäten, inhomogenen Stoffverteilungen und Wechselwirkungen zwischen Inhaltsstoffen der wässrigen und der festen Phase beeinflussen Dispersion, Diffusion und Sorption den Stofftransport.

Weitere Einflussfaktoren wie (bio-)chemischer Abbau, radioaktiver Zerfall und biologische Degradation werden hier nicht betrachtet, da sie für die nachfolgend vorgestellten Untersuchungen keine Rolle spielen.

3.7.1 Dispersion

Die hydromechanische Dispersion führt aufgrund unterschiedlicher Geschwindigkeitsverteilungen zu einer Aufweitung der Konzentrationsverteilung im zeitlichen Verlauf des Stofftransports. Die Ursachen der Dispersion sind skalenabhängig zu betrachten. Die Mikrodispersion (Porenskala) wird durch unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten sowohl innerhalb eines Porenkanals als auch in unterschiedlich weiten Poren und durch unterschiedlich lange Fließwege hervorgerufen. Bei der gröberskaligen Makrodispersion spielen in erster Linie Inhomogenitäten der Durchlässigkeitsverteilung des betrachteten porösen Mediums eine Rolle. Es wird unterschieden zwischen der um ein Vielfaches stärker ausgeprägten longitudinalen Dispersion in Strömungsrichtung und der transversalen Dispersion senkrecht zur Strömungsrichtung (SCHEIDEGGER 1961).

Die von der Fließgeschwindigkeit v abhängigen Dispersionskoeffizienten D_L (longitudinal) und D_T (transversal) sind definiert als

$$\text{Gleichung 14} \quad D_L = \alpha_L \cdot v \text{ bzw. } D_T = \alpha_T \cdot v,$$

wobei α_L und α_T die longitudinale bzw. transversale Dispersivität darstellen.

Einflussfaktoren auf das Ausmaß der Dispersion sind die Korngrößenverteilung sowie Kornform und -rundung des durchflossenen porösen Mediums und die damit verbundene Porosität, die Fließgeschwindigkeit und der Wassergehalt.

3.7.2 Diffusion

Konzentrationsunterschiede bilden den Antrieb für Diffusionsvorgänge. Sie führen zu einem Ausgleich der Unterschiede, wobei der Stofftransport von der höheren in Richtung der niedrigeren Konzentration stattfindet. Dieser Prozess trägt nur bei sehr geringen Fließgeschwindigkeiten entscheidend zum Stofftransport bei, bei größeren Geschwindigkeiten wird dieser von der wesentlich stärker ausgeprägten Dispersion bestimmt. Da sich diffusiver und dispersiver Fluss makroskopisch nicht trennen lassen, werden sie häufig unter dem Begriff „hydrodynamische Dispersion“ zusammengefasst.

Da die Diffusion bei den in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuchen vernachlässigbar ist, wird hier nicht weiter auf diesen Aspekt des Stofftransports eingegangen.

3.7.3 Sorption

Beim Durchströmen eines Korngerüsts kann es zu physikalischen und chemischen Wechselwirkungen unterschiedlichster Art zwischen den mobilen Wasserinhaltsstoffen und der immobilen Festphase kommen, die zu einer Verzögerung des Stofftransportes führen. Zusammengefasst werden diese Vorgänge unter dem Begriff der Sorption.

In einem Tracerexperiment macht sich ein sorptives Verhalten des Markierungsstoffs durch ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes Tailing der Durchgangskurve bemerkbar. Die Art der Sorption (reversibel, irreversibel, sofortige Gleichgewichtseinstellung oder kinetische Reaktionen) bestimmt dabei die Kurven-

form und den Verlauf der Tracerrückgewinnung, näheres dazu findet sich bei MALOSZEWSKI (1987) und SCHWEICH & SARDIN (1981). Hier soll lediglich die reversible Sorption mit sofortiger Gleichgewichtseinstellung betrachtet werden.

Das Sorptionsverhalten von Tracern wird durch den Verteilungskoeffizient K_d und den Retardationsfaktor R_D charakterisiert. Die Bestimmung dieser beiden Sorptionsparameter erfolgt üblicherweise mit Hilfe von Batch- und Säulenversuchen. Voraussetzung für die Gültigkeit der unten angegebenen Gleichungen ist, dass es sich bei der Sorption um einen reversiblen Vorgang handelt und die Verteilungskoeffizienten für die Sorption und Desorption gleich sind (KLOTZ 1991).

Der Verteilungskoeffizient K_d gibt die Gleichgewichtsverteilung zwischen der Konzentration eines in Wasser gelösten Stoffes (C_1) und dessen an Feststoffoberflächen sorbierten Anteils (C_2) an (KLOTZ 1982):

$$\text{Gleichung 15} \quad K_d = \frac{C_2}{C_1} = \frac{V_B}{m_B} \cdot \frac{1}{C_1} \cdot (C_0 - C_1)$$

Der prozentuale Anteil S des sorbierten Anteil eines Stoffes im Verhältnis zu seiner Ausgangskonzentration (C_0) ergibt sich aus:

$$\text{Gleichung 16} \quad S = \left(1 - \frac{C_1}{C_0}\right) \cdot 100$$

Für einen idealen Tracer ergibt sich für den K_d -Wert sowie für S ein Wert von Null, d.h. der Stoff geht keinerlei Wechselwirkungen mit der Matrix ein, die seine Konzentration in der Lösung verringern.

Ermittelt wird der K_d -Wert durch Batch-Versuche (Umlaufsäulenversuch oder Schüttelversuch), bei denen eine definierte Ausgangslösung eines Stoffes mit einer definierten Feststoffmenge reagiert und nach Einstellung des Sorptionsgleichgewichts die in der Lösung verbliebene Stoffkonzentration bestimmt wird.

Aus der Sorption eines Stoffes am Korngerüst ergibt sich insgesamt eine Verlangsamung seiner Transportgeschwindigkeit v_T im Vergleich zur Fließgeschwindigkeit des Wassers v_a , da jeweils nur der in der Lösung befindliche Anteil am Transportgeschehen teilnehmen kann. Für den Retardationsfaktor R_D , der diesen Prozess charakterisiert, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\text{Gleichung 17} \quad R_D = \frac{v_a}{v_T}$$

R_D wird mit Hilfe von Durchlauf-Säulenversuchen bestimmt, wobei die Abstandsgeschwindigkeit durch einen als ideal angesehenen Tracer als Referenz ermittelt wird. Nach KÄSS (1992) deuten R_D -Werte > 3 darauf hin, dass es sich bei den beobachteten Prozessen nicht mehr um reversible Sorptions-Desorptionsvorgänge, sondern um irreversible Vorgänge wie z.B. Ionenaustausch oder Lösungs-/Fällungsvorgänge handelt.

3.8 Modellierung von Markierungsversuchen

Die allgemeine Transportgleichung für den Stofftransport in der gesättigten Zone berücksichtigt lediglich Konvektion und Dispersion als die den Transport eines idealen Tracers bestimmenden Mechanismen. Aus Gründen der Vereinfachung beschränken sich die nachfolgenden Ausführungen auf den eindimensionalen (1D-)Fall, der beispielsweise für Säulenversuche gegeben ist, wenn der Tracer über die gesamte Grundfläche der Säule mit einem Dirac-Impuls (momentane Tracereingabe) eingegeben wird und die Fließrichtung der x-Achse des gewählten Koordinatensystems entspricht. In diesem Fall muss nur die longitudinale Dispersion berücksichtigt werden und die Transportgleichung vereinfacht sich folgendermaßen (MALOSZEWSKI 1991):

$$\text{Gleichung 18} \quad D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

Die Lösung der Transportgleichung lautet dann:

Gleichung 19
$$C(x, t) = \frac{M}{Q} \frac{x}{\sqrt{4\pi D_L t^3}} \exp \left[-\frac{(x - vt)^2}{4D_L t} \right]$$

Die prozentuale Rückgewinnung R des eingesetzten Tracers errechnet sich wie folgt (nach HUBER 2002):

Gleichung 20
$$R = 100 \cdot \frac{Q}{M} \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=1}^n C_i$$

Das Programm FIELD (Version 5, MALOSZEWSKI 2000) ermöglicht die Modellierung des Tracerdurchgangs im 1D- und 2D-Fall für ideale Tracer bei Eingabe mit Dirac-Impuls. Bestimmt werden die Parameter mittlere Fließgeschwindigkeit v_0 , mittlere Verweilzeit t_0 und die longitudinale Dispersivität α_L . Die Ermittlung der Anpassungsparameter v_0 und α_L erfolgt sowohl über Abschätzungen mittels der Momentenmethode und der Summenkurvenmethode als auch durch Anpassung der theoretischen Outputkonzentration an die gemessene Tracerdurchgangskurve mit der Methode der kleinsten Quadrate (MALOSZEWSKI 1981). Da letzteres Verfahren im Allgemeinen die zuverlässigsten Werte liefert, erfolgt die Auswertung der durchgeführten Säulen- und Tankversuche mit momentaner Tracereingabe auf diese Weise.

Bei konstanter Durchflussrate Q kann aus der mittleren Fließzeit t_0 eines idealen Tracers das markierte Wasservolumen V_w und damit der wassererfüllte Porenraum n_w berechnet werden:

Gleichung 21
$$n_w = \frac{V_w}{V_{\text{ges}}} = \frac{Q \cdot t_0}{V_{\text{ges}}}$$

Zeigt die Tracerdurchgangskurve eines nicht-reaktiven Tracers einen untypischen Verlauf (z.B. ein ausgeprägtes Tailing), so kann dies durch die Superposition mehrerer Teilkurven T verursacht sein, die unterschiedliche Fließwege oder Fließbedingungen repräsentieren. Abb. 7 veranschaulicht dies am Beispiel einer Durchgangskurve eines nicht-reaktiven Tracers, die aus der Überlagerung von drei Teilkurven (T_1 , T_2 , T_3) entstanden ist.

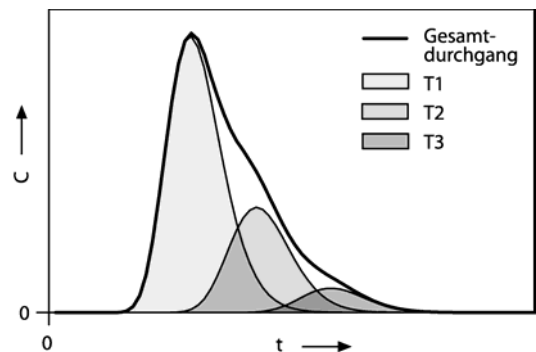


Abb. 7: Gesamtdurchgang eines nicht-reaktiven Tracers als Ergebnis der Superposition dreier Teilkurven T_1 - T_3

Die Abtrennung der einzelnen Teilkurven macht eine schrittweise Anpassung des Modells an die Messkurve erforderlich. In Abb. 8 ist die entsprechende Vorgehensweise am oben beschriebenen Beispiel dargestellt. Zunächst wird die erste Teilkurve T_1 angepasst und anschließend von der Messkurve des Gesamtdurchgangs subtrahiert. An die so erhaltene Restkurve Rest1 wird nun die zweite Teilkurve T_2 angepasst. Durch Subtraktion Rest1- T_2 erhält man die Restkurve Rest2. Im Idealfall entspricht diese vollständig der dritten Teilkurve T_3 . Schwierig ist die Situation, wenn reaktive Tracer betrachtet werden, da eine eindeutige Unterscheidung der einzelnen Teilkurven aufgrund des sorptionsbedingten Tailings nicht möglich ist. Weitere Ausführungen hierzu finden sich in Kapitel 4.4.4.

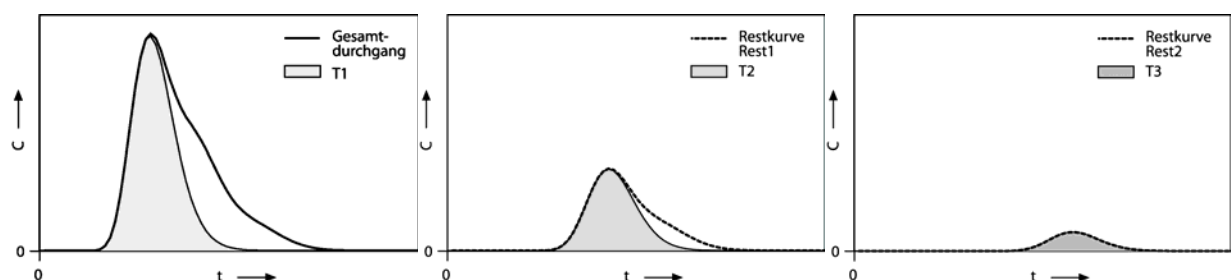


Abb. 8: Schrittweise Anpassung der Modellkurven T_1 - T_3 an den Gesamtdurchgang eines nicht-reaktiven Tracers

Der Anteil p der einzelnen Teilkurven am Gesamtdurchgang ergibt sich aus dem Verhältnis der relativen Tracerrückgewinnung R' der Teilkurve zur relativen Rückgewinnung R aus dem Gesamtdurchgang:

$$\text{Gleichung 22} \quad p = \frac{R'}{R}$$

Die Berechnung von n_w erfolgt dann unter Berücksichtigung der entsprechend des Kurvenanteils gewichteten Durchflussanteile Q' der einzelnen Teilkurven (Anzahl n^*):

$$\text{Gleichung 23} \quad n_w = \frac{\sum_{i=1}^{n^*} Q'_i \cdot (t_0)_i}{V_{\text{ges}}} \quad \text{mit} \quad Q' = p \cdot Q$$

Für die Wassersättigung Θ ergibt sich jeweils

$$\text{Gleichung 24} \quad \Theta = \frac{n_w}{n}.$$

4 Laborversuche

Ein Ziel der Arbeit ist es, das Transportverhalten von vier verschiedenen Fluoreszenzfarbstoffe sowie eines Salztracers unter ungesättigten Verhältnissen bei definierten Laborbedingungen zu untersuchen. Dazu werden Batch-Versuche sowie Säulenversuche mit kontinuierlicher und momentaner Tracereingabe durchgeführt. Als Kontaktmaterial dient in allen Fällen das Material der KS, das ebenso wie das Material der KBS hinsichtlich seiner bodenmechanischen und –physikalischen Parameter eingehend untersucht wurde.

Für die Untersuchung des Wassertransports unter den ungesättigten Verhältnissen in einer Kapillarsperre, die ein weiteres Ziel dieser Arbeit darstellt, steht ein Kapillarsperrenaufbau in einem Versuchstank zur Verfügung. In diesem werden Markierungsversuche mit den Salz- und Fluoreszenztracern, analog zu den Säulenversuchen, ebenfalls mit kontinuierlicher und momentaner Tracereingabe durchgeführt.

4.1 Versuchsmaterialien

Bei sämtlichen Untersuchungen wurden die Materialien eingesetzt, die auf dem Kapillarsperren-Testfeld der Deponie Heinersgrund, Bayreuth, Verwendung fanden (BARTH 2004). Bei dem Material der Kapillarschicht (KS_v) handelt es sich um einen fluvial umgelagerten Granitzersatz, die Kapillarbruchschicht (KBS_v) ist aus Basaltbruchmaterial aufgebaut.

Zur Charakterisierung der Kapillarsperrenmaterialien wurden verschiedene bodenmechanische und bodenphysikalische Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse nachfolgend dargestellt werden. Die Tabelle in Anhang 7.1.1 zeigt zudem die wichtigsten Ergebnisse im Überblick.

Entscheidend für die im Rahmen dieser Arbeit erfolgten Untersuchungen zum Wassertransport in der Kapillarsperre ist das Material der KS, daher ist die Kenntnis seiner charakteristischen Eigenschaften von großer Bedeutung. Die KBS spielt dagegen eine untergeordnete Rolle: neben ihrer kapillarbrechenden Funktion dient sie in erster Linie als Auflager für die KS. Die Anforderungen beschränken sich daher hauptsächlich auf die Korngrößenverteilung, die filterstabil zur überlagernden KS sein muss. Zudem darf das KBS-Material nur einen geringen Anteil an Feinkorn aufweisen, damit an der Schichtgrenze ein ausreichend großer Porensprung erzielt wird und direkte Porenübergänge vermieden werden.

4.1.1 Korngrößenverteilung nach DIN 18 123 (1996)

Die Korngrößenverteilungen der Kapillarsperrenmaterialien wurden nach DIN 18 123-5 durch Trockensiebung ermittelt, da in den Materialien keine nennenswerten Anteile von Korngrößen $< 0,063$ mm enthalten sind (KS_v ca. 0,9 % $< 0,063$ mm, KBS_v ca. 0,2 % $< 0,125$ mm in Form von Gesteinsmehl aus dem Brechvorgang, das an den Kornoberflächen haftet). Eine detaillierte Auflistung der Siebergebnisse ist in Anhang 7.1.1 dargestellt.

Wie Abb. 9 zeigt, liegen beide Materialien im Bereich der von BRUNSCHLIK et al. (1994) als optimal angesehenen Körnungsbänder für Kapillarsperren (grau unterlegt). Allerdings wird das Ungleichförmigkeitskriterium für das KS_v -Material von $U < 2,5$ nach GARTUNG & NEFF (2000), bzw. $U \leq 3$ bei BAUER (2001) überschritten ($U_{KS_v} = 4,1$). Daher wäre ein steilerer Verlauf der Körnungslinie des Materials wünschenswert gewesen. Das KBS-Material liegt auf der grobseitigen Grenze des Eignungsbandes und zeigt eine deutlich steilere Kornverteilungskurve als das KS_v -Material. Die Ungleichförmigkeit ist daher deutlich geringer und liegt mit $U = 3,1$ nur unwesentlich über dem von BAUER (2001) geforderten Wert von 3,0. Weitere Ausführungen zur Korngrößenverteilung der Materialien finden sich bei BARTH (2004).

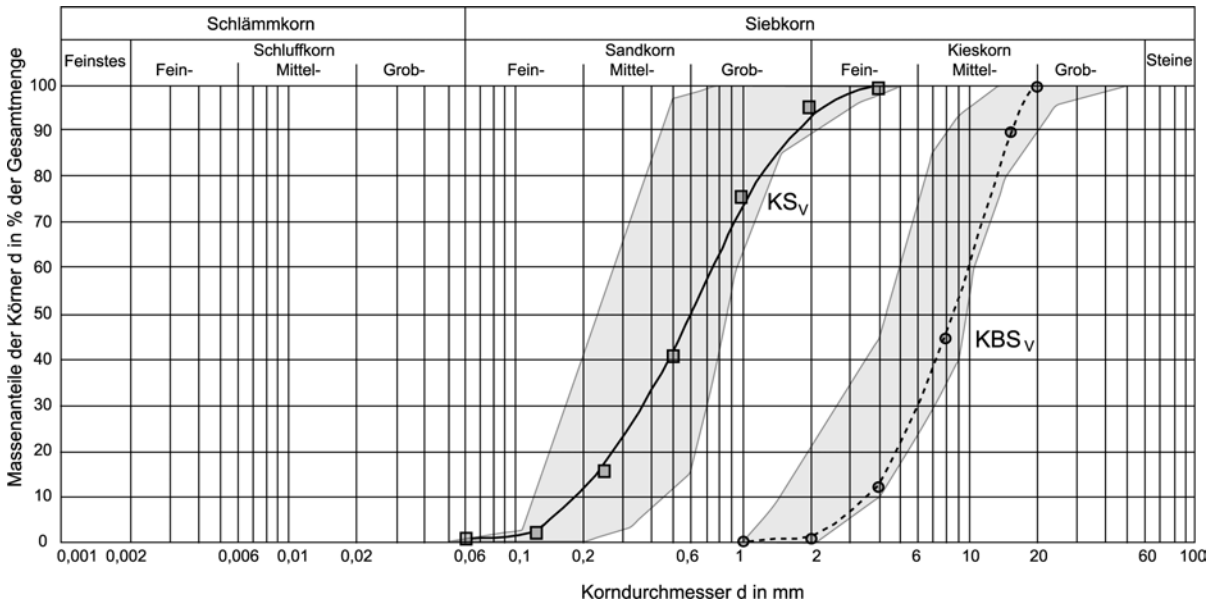


Abb. 9: Korngrößenverteilung der Versuchsmaterialien KS_v und KBS_v. Grau unterlegt: Körnungsbänder (nach BRUNSCHLIK et al. 1994) der für den Aufbau einer Kapillarsperre geeigneten Materialien.

4.1.2 Filterstabilität

Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit einer Kapillarsperre ist die Filterstabilität der Materialkombination, die gewährleistet, dass der erforderliche Porensprung an der Schichtgrenze dauerhaft erhalten bleibt. Die erweiterte Filterregel nach TERZAGHI (zitiert in PRINZ 1991) sowie die Schweizerische Norm SN 670 125 (1983) betrachten die Erosionssicherheit und die Durchlässigkeit unter Berücksichtigung der Ungleichförmigkeiten der Materialien auf Grundlage verschiedener Dezentilwerte. Die Kriterien sowie die Ergebnisse für die verwendete Materialkombination zeigt Tab. 3.

Tab. 3: Filterstabilität der Testmaterialien nach TERZAGHI (zit. in PRINZ 1991) und SN 670 125 (1983)

Filterkriterien		
D ₁₅ , D ₅₀ : Filtermaterial		d ₁₅ , d ₅₀ , d ₈₅ : abzufilterndes Material
Erweiterte Filterregel von TERZAGHI (zit. in PRINZ 1991)		
Regel zur Erosionssicherheit D ₁₅ / d ₈₅ ≤ 4	Durchlässigkeitsregel D ₁₅ / d ₁₅ ≥ 4	Berücksichtigung der Ungleichförmigkeit D ₅₀ / d ₅₀ ≈ 10
Schweizerische Norm SN 670 125 (1983)		
Regel zur Erosionssicherheit D ₁₅ / d ₈₅ < 5	Durchlässigkeitsregel 5 < D ₁₅ / d ₁₅ < 20	Berücksichtigung der Ungleichförmigkeit D ₅₀ / d ₅₀ < 25
Materialkombination KS _v - KBS _v		
2,8	17,3	14,2

Für beide Regeln werden alle drei Kriterien eingehalten, lediglich bei der Berücksichtigung der Ungleichförmigkeit nach TERZAGHI weicht der ermittelte Werte in einem akzeptablen Rahmen von der Vorgabe ab. Die Filterstabilität kann daher als gegeben angenommen werden. Tatsächlich konnte beim Ausbau der Kapillarsperre nach einer Gesamtlaufzeit der Tankversuche von ca. 3 Jahren keine Materialverlagerung von der KS in die KBS festgestellt werden.

4.1.3 Korndichte

Das KS_v-Material weist eine mittlere Korndichte ρ_s von 2,64 g/cm³ auf, für das KBS_v-Material wurde eine Korndichte von 3,09 g/cm³ ermittelt (Mittelwert aus 4 Bestimmungen, Standardabweichung jeweils 0,01 g/cm³). Die Bestimmung erfolgte mit dem Luftpyknometer an ofentrockenem Material.

4.1.4 Dichte bei lockerster und dichtester Lagerung nach DIN 18 126 (1996)

Die Bestimmung der Dichte bei lockerster und dichtester Lagerung nach DIN 18 126 (1996) mit dem Schlaggabelversuch wurde nur für das KS_V -Material durchgeführt. Für die lockerste Lagerung ergibt sich eine Trockendichte ρ_d von $1,45 \text{ g/cm}^3$ bei einem Porenanteil $\max n$ von 0,45. Bei dichtester Lagerung beträgt die Trockendichte $1,77 \text{ g/cm}^3$, der Porenanteil $\min n$ liegt dabei bei 0,33.

4.1.5 Wasserdurchlässigkeitsbeiwert nach DIN 18 130-1 (1998)

Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_f wurde für die Testmaterialien von BARTH (2004) nach DIN 18 130-1 (konstantes hydraulisches Gefälle) bestimmt. Tab. 4 stellt die dabei ermittelten Werte den Ergebnissen aus der Berechnung des k_f -Werts aus der Korngrößenverteilung der Materialien nach verschiedenen Methoden gegenüber.

Tab. 4: Berechnete und nach DIN 18 130 (1998) ermittelte k_f -Werte für die Versuchsmaterialien (*zit. in Hölting 1992)

Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte k_f [m/s]		
Material	KS	KBS
HAZEN * (berechnet)	3,76E-04	1,27E-01
BEYER (1964) (berechnet)	2,92E-04	9,86E-02
BIALAS * (berechnet)	1,77E-04	1,20E-01
SEELHEIM * (berechnet)	1,29E-03	2,60E-01
DIN 18 130 (BARTH 2004)	3,09E-04	5,93E-02

Für das KS_V -Material liegt insgesamt eine gute Übereinstimmung der berechneten und im Laborversuch ermittelten Durchlässigkeitswerte vor. Lediglich der nach Seelheim ermittelte Wert liegt um den Faktor 3 bis 7 über den anderen k_f -Werten. Beim KBS_V -Material liegen die berechneten Durchlässigkeiten sehr eng zusammen, der Laborwert liegt etwa um den Faktor 2 darunter.

4.1.6 Bodenwassercharakteristik

Für das KS_V -Material erstellte BARTH (2004) mittels Drucktopf-Methode an Stechzylinderproben unter sukzessiver Entwässerung eine pF-Kurve (Abb. 12). Da die Versuchsanlage aufgrund der Probenzylindergröße (100 cm^3) für grobkörniges Material nicht geeignet ist, konnte für das KBS_V -Material keine pF-Kurve ermittelt werden.

4.1.7 Kapillarer Aufstieg

Für beide Materialien wurden einfache Kleinsäulenversuche zur Abschätzung des Kapillaraufstiegs durchgeführt, wie sie auch bei BAUER (2001) beschrieben sind. Um den Hysterese-Effekt zu erfassen, wurden pro Material jeweils eine Bewässerungs- und eine Entwässerungskurve aufgenommen.

Die Versuchssäule aus Plexiglas besteht aus dem eigentlichen Probenbehälter mit einer Höhe von 60 cm, der sich über einem Wasserbehälter (Höhe 6,5 cm) befindet (Abb. 10). Der Einbau des Versuchsmaterials in den Probenbehälter erfolgte lagenweise, wobei jede Lage (ca. 3 cm Mächtigkeit) mit einem Stempel verdichtet wird. Zur Vermeidung extremer Staubbildung wurden die Materialien mit einem definierten Wassergehalt von 2 Gew.% in die Säule eingebaut. Die Einbaudaten für die Versuche sind in Anhang 7.1.2 aufgelistet.

Zur Durchführung der Bewässerungsversuche wurde über den unteren Überlauf des Vorratsbehälters der Wasserspiegel im Gleichgewicht mit der Unterkante des eingebauten Probenkörpers gehalten. Die Sorptionszeit betrug jeweils 500 h, nach BAUER (2001) kann bereits nach acht Tagen von der Einstellung eines hydraulischen Gleichgewichts ausgegangen werden. Für die Entwässerungskurve erfolgte zunächst eine Aufsättigung des eingebauten Probenmaterials von unten. Nach einer Aufsättigungsphase von 72 h mit konstantem Wasserspiegel (oberer Überlauf) wurde der Wasserspiegel auf das Niveau des unteren Überlaufs abgesenkt und auf Höhe der Probenunterkante über die Versuchsdauer von 400 h konstant gehalten.

Nach Ablauf der Versuchszeit wurde das Material in Lagen von 2 cm ausgebaut, der Wassergehalt durch Ofentrocknung (DIN 18 121-1) bestimmt und daraus der Sättigungsgrad berechnet.

Die Versuchsergebnisse für KS_v - und KBS_v -Material zeigen die beiden Diagramme in Abb. 11. Aufgetragen sind der volumetrische Wassergehalt θ (untere Abszisse) bzw. die relative Sättigung Θ (obere Abszisse) gegen die Wasserspannung ψ . Sie entspricht der jeweiligen Höhenlage über dem Wasserspiegel in der Probensäule und ist in cm Wassersäule [cmWS] angegeben.

Grundsätzlich ist das charakteristische Verhalten für ein kiesiges bzw. sandiges Bodenmaterial zu erkennen. Während Das KBS_v -Material zeigt einen sehr steilen Kurvenverlauf mit einer extrem schnellen Abnahme des Wassergehalts bereits bei kleinen Wasserspannungen. Während der Wassergehalt bei einer Wasserspannung von 1 cmWS bei 0,07 (Bewässerung) bzw. 0,11 (Entwässerung) liegt, entspricht der beobachtete Wassergehalt des Bewässerungsversuchs bereits ab einer Wasserspannung von 7 cmWS dem Einbauwassergehalt, d.h. es ist kein kapillarer Einfluss des Materials mehr feststellbar.

Dagegen weist das KS_v -Material auch noch bei größeren Wasserspannungen deutlich höhere Wassergehalte auf. Die Wassergehalte zwischen 0,37 beim Bewässerungsversuch und 0,39 der Entwässerungskurve bei einer Saugspannung von 1 cmWS verringern sich bis zur Wasserspannung von 11 cmWS auf Werte von 0,25 bzw. 0,30. Anschließend tritt eine vorübergehende Verflachung des Kurvenverlaufs auf, die bis zu Wasserspannungen von ca. 30 cmWS zu einem Wassergehaltsrückgang auf 0,04 bzw. 0,08 führt. Bei einer weiteren Wasserspannungserhöhung nähert sich die Bewässerungskurve dem Einbauwassergehalt an, der bei ca. 40 cmWS erreicht wird.

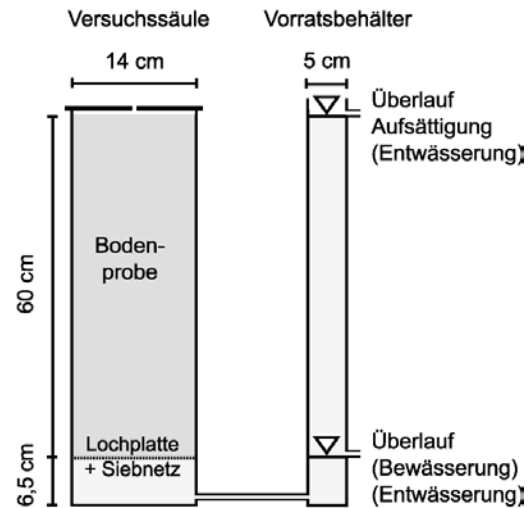


Abb. 10: Versuchsaufbau der Kleinsäulenversuche

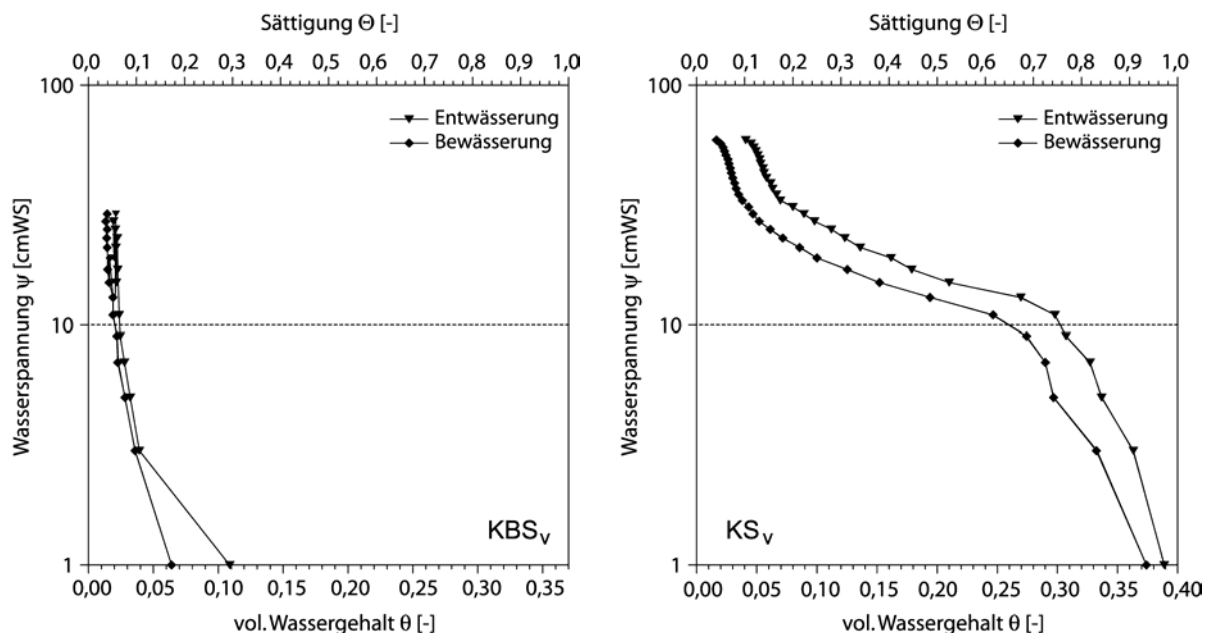


Abb. 11: Bewässerungs- und Entwässerungskurven der Kleinsäulenversuche für KBS_v (links) und KS_v (rechts)

Allerdings entsprechen die Be- und Entwässerungskurven für beide Materialien im Bereich kleiner Saugspannungen nicht dem theoretisch zu erwartenden Verlauf, die Wassergehalte sind deutlich zu gering. Die Ursache liegt im Ausbau des Probenmaterials aus der Säule: im unteren Teil der Säule kommt es zum Wasserverlust, da die dort vorhandene Wassermenge nach dem Auflockern des Korngerüsts nicht voll-

ständig kapillar gehalten werden kann (STEINERT 1999). Dies führt zu einer Unterschätzung des tatsächlichen Wassergehalts.

Die beschriebenen Kleinsäulenversuche dienen lediglich zu einer schnellen Abschätzung des Kapillarverhaltens beispielsweise im Rahmen der Materialauswahl für eine Kapillarsperre. Sie sollten jedoch nicht Grundlage für die Bestimmung der VAN GENUCHTEN-Parameter zur Berechnung der ungesättigten Leitfähigkeit sein, da sie die Bodenwassercharakteristik eines Materials nicht vollständig wiedergeben. Besonders im Bereich hoher Wasserspannungen sind die Wassergehalte der Säulenversuche im Vergleich zu denen der pF-Kurve für das KS_v -Material deutlich zu niedrig.

4.1.8 Ungesättigte Wasserdurchlässigkeit

Grundlage zur Ermittlung der VAN GENUCHTEN-Parameter α_{VG} und n_{VG} ist für das KS_v -Material die pF-Kurve (Kapitel 4.1.6). Die Auswertung der Messwerte mit dem Programm RETC (VAN GENUCHTEN et al. 1991) unter Anwendung des MUALEM-VAN GENUCHTEN-Modells ergab die in Anhang 7.1.3 aufgeführten Retentionsparameter. Die nach Gleichung 7 berechnete Retentionskurve zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Daten (Abb. 12)

Da für das KBS_v -Material keine pF-Kurve vorliegt, wurde eine Abschätzung der Parameter aus der Korngrößenverteilung mit Hilfe des Programms SOILPROP vorgenommen. Die ermittelten Parameter sind ebenfalls in Anhang 7.1.3 aufgeführt, die zugehörige Retentionskurve in Abb. 12 dargestellt.

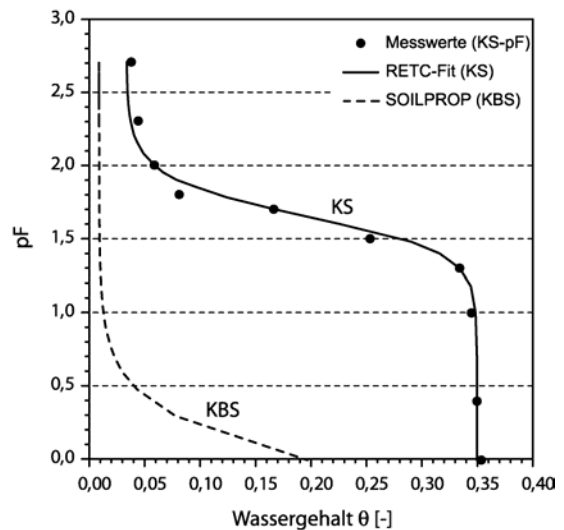


Abb. 12: pF-Kurve der Versuchsmaterialien

Die Berechnung der ungesättigten Durchlässigkeit

nach Gleichung 12 und Gleichung 13 ergibt die in Abb. 13 dargestellten $k(\psi)$ -Kurven. Der k_u -Wert für das KBS_v -Material nimmt bereits bei Wasserspannungen von wenigen cmWS rapide ab, während für das feinkörnige KS -Material erst ab einer Wasserspannung von ca. 25 cmWS eine langsame Abnahme der Durchlässigkeit zu beobachten ist. Der Unterschied der ungesättigten Durchlässigkeitswerte zwischen KS_v und KBS_v beträgt ab dieser Wasserspannung etwa neun Zehnerpotenzen. Er ist damit genügend groß, um einen Kapillarsperreneffekt an der Schichtgrenze zu erzielen, auch wenn man berücksichtigt, dass die Parameterbestimmung für das KBS_v -Material als etwas unsicher anzusehen ist.

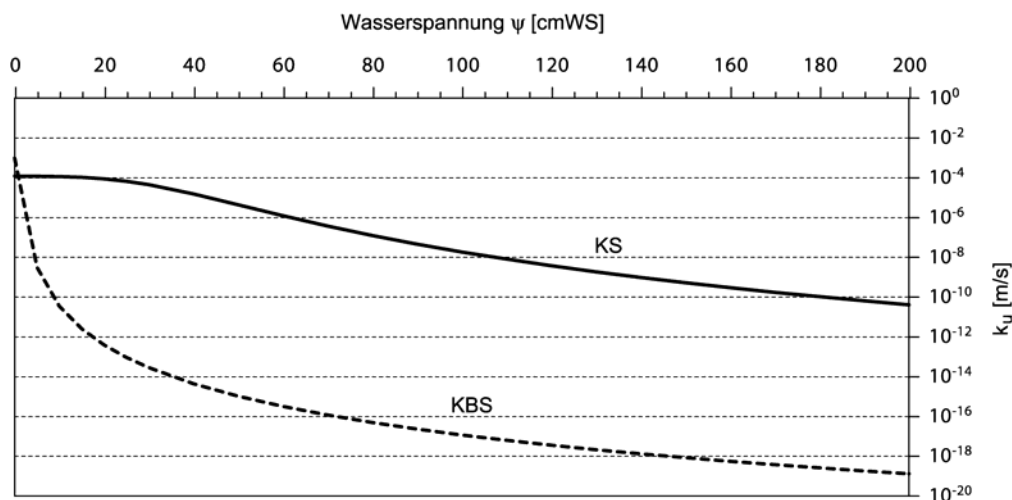


Abb. 13: Berechnete ungesättigte Durchlässigkeit nach VAN GENUCHTEN (1980)

4.2 Markierungsstoffe

Als Markierungsstoffe wurden bei den durchgeführten Säulen- und Tankversuchen in erster Linie Fluoreszenzfarbstoffe eingesetzt. Um in den Tankversuchen auch eine zweidimensionale Beobachtung des Wassertransportes zu ermöglichen, wurde in einigen Versuchen zusätzlich auch Natriumbromid (NaBr) als nahezu idealer Tracer eingegeben, dessen Ausbreitung im Versuchstank über im Sediment eingebaute Leitfähigkeitssonden verfolgt werden kann.

4.2.1 Fluoreszenzfarbstoffe

Mit Uranin (U), Sulforhodamin B (SRB), Natrium-Naphthionat (Na) und Pyranin (P) kommen vier in der Hydrologie häufig verwendete Fluoreszenzfarbstoffe zum Einsatz, deren wichtigsten Eigenschaften nachfolgend aufgeführt werden. Sie wurden, sofern nicht anders angegeben, aus KÄSS (1992) entnommen.

Uranin, das zu den Xanthenfarbstoffen gehörende Natriumsalz des Fluoreszein, zeigt die stärkste Fluoreszenz aller Stoffe und wird bereits seit über 130 Jahren zur Wassermarkierung eingesetzt. Aufgrund der hohen Fluoreszenzintensität besitzt es eine sehr geringe Nachweisgrenze. Allerdings weist nur das Uranin-Anion diese stark fluoreszierende Eigenschaft auf, während das Kation lediglich schwach fluoresziert. Daher wird die Fluoreszenz stark vom Grad der Dissoziation beeinflusst und zeigt damit eine starke pH-Abhängigkeit. Aufgrund der schwachen negativen Ladung des Tracers unter neutralen pH-Bedingungen treten kaum Wechselwirkungen mit der Gesteinsmatrix auf, so dass Uranin als quasi-idealer Tracer angesehen wird. In pH-neutralen Lösungen liegt das Anregungsmaximum bei 490 nm, das Emissionsmaximum bei 512 nm. Zu beachten ist die hohe photolytische Empfindlichkeit des Stoffes, die einen Schutz der Proben vor Lichteinfluss erforderlich macht.

Natrium-Naphthionat erreicht nur rund 1/14 der Fluoreszenzintensität von Uranin, daher ist die Nachweisgrenze deutlich höher und es muss eine größere Tracermenge eingegeben werden, um einen gut detektierbaren Durchgang zu erhalten. Aufgrund der Hauptfluoreszenz bei 320 nm (Anregung), bzw. 420 nm (Emission) lässt sich Na-Naphthionat störungsfrei neben den anderen drei eingesetzten Tracern nachweisen. KÄSS (1992) gibt eine geringe, aber nachweisbare Sorptivität im Vergleich zu Uranin an. Von REICHERT (1991) durchgeführte Säulenversuche ergaben eine signifikante Veränderung des Sorptionsverhaltens bei einer Verlängerung des Fließweges. Das bei kurzen Säulenlängen bis 1,0 m sich ideal verhaltende Na zeigte bei einer Fließlänge von 1,5 m Merkmale von reversibler Sorption mit einer durch eine verringerte Rückgewinnung angezeigte irreversible Komponente des Stoffrückhaltes. GOLDSCHIEDER et al. (2001) untersuchten das Auftreten von mikrobiologischem Abbau des Na in Wasserproben.

Pyranin zeigt eine starke pH-Abhängigkeit der Fluoreszenz, da zwei Anionen-Formen mit Gleichgewichtszustand bei pH 7,3 vorliegen. In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Analyse bei einem pH-Wert von 4,5. In diesem Fall liegt das Hauptanregungsmaximum bei 405 nm, das Emissionsmaximum bei 512 nm. Die Lichtempfindlichkeit ist im neutralen bis alkalischen Milieu gering, im sauren Bereich jedoch hoch. Das ausschließlich in anionischer Form vorliegende P zeigt ein konservatives, reaktionsinertes Verhalten (REICHERT 1991). KÄSS (1992) bezeichnet den Tracer als „wenig sorptiv“.

Das ebenfalls der Gruppe der Xanthenfarbstoffe angehörende **Sulforhodamin B** weist eine sehr gute Licht- und pH-Beständigkeit auf. Das Hauptmaximum der Anregung liegt bei 564 nm, das Emissionsmaximum bei 583 nm. Aufgrund ihres ähnlichen Wellenlängenabstand $\Delta\lambda$ von etwa 20 nm zwischen Anregungs- und Emissionsspektrum können U und SRB sehr gut gemeinsam mit dem Synchronscan-Verfahren (BEHRENS 1971, 1973) gemessen werden. Zum Sorptionsverhalten des Fluoreszenzfarbstoffs finden sich in der Literatur widersprüchliche Angaben. Als kationisch vorliegender Tracer weist SRB eine erhöhte Affinität zu den negativ geladenen Mineraloberflächen auf und zeigt daher die stärksten Wechselwirkungen mit der Gesteinsmatrix. REICHERT (1991) beobachtete sowohl eine irreversible Festlegung des Stoffes, als auch reversible Sorption mit schneller Gleichgewichtseinstellung.

4.2.2 Salztracer

Als Salztracer zur Beobachtung der Leitfähigkeitsänderungen im Sediment wurde Natriumbromid (NaBr) ausgewählt, das als nahezu idealer Tracer gilt (siehe u.a. FANK & HARUM 1994, HADI 1997).

Im Folgenden wird bei der Auswertung der Markierungsversuche mit NaBr die Bezeichnung „LF“ verwendet. Damit soll verdeutlicht werden, dass die Markierungswirkung auf einer Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit der Bodenlösung beruht und nicht Ionenkonzentrationen betrachtet wurden.

4.2.3 Fluoreszenzanalytik

Die qualitative und quantitative Bestimmung der Fluoreszenzfarbstoffe erfolgte an Wasserproben mittels Fluoreszenzspektralanalyse. Die Einstellung verschiedener pH-Werte erlaubt dabei die selektive Trennung des Farbstoffgemischs zum störungsfreien Nachweis der einzelnen Tracer (BEHRENS 1988). Zusätzlich wurde zeitweise während der Durchführung der Tracerversuche die Uranin-Konzentration online mit einem Feldfluorimeter beobachtet.

Fluoreszenzspektralanalyse/Fluoreszenzspektrometrie

Mit dem Fluoreszenzspektralphotometer RF-5000 von SHIMADZU wurden die Anregungsspektren der Fluoreszenztracer im Synchronscan-Verfahren nach BEHRENS (1971, 1973) aufgenommen (Spezifikationen in Anhang 7.2.1).

Die spektrochemische Trennung des Farbstoffgemischs erfolgte durch die Einstellung definierter pH-Werte (BEHRENS 1988): Die Messung der U- und SRB-Konzentrationen wurde bei dem natürlichen pH-Wert der Proben in einem Wellenlängenbereich des Anregungsspektrums von 425 nm – 625 nm und einem Wellenlängenabstand $\Delta\lambda$ zwischen Anregungs- und Emissionsspektrum von 25 nm vorgenommen. Für die Analyse von Na und P wurden die Wasserproben durch Zugabe von 25 μ l Na-Acetat/Essigsäure-Puffer (pH 3,8) auf einen pH-Wert von 4,5 angesäuert und anschließend das Anregungsspektrum von 240 nm – 460 nm mit $\Delta\lambda = 100$ nm aufgenommen.

Eine möglicherweise temperaturbedingte Messwertdrift im längerwelligen Bereich der U- und SRB-Messung machte eine mehrmalige Kalibrierung während einer ein- bis zweistündigen Messreihe nötig. Die Messung von Na und P erfolgte deutlich stabiler, daher war eine einmalige Kalibrierung während einer Messreihe ausreichend. Die verwendeten Standards wurden regelmäßig neu angesetzt, um Verfälschungen durch eine Alterung der Lösungen zu vermeiden.

Filterfluorimetrie

Das Feldfluorimeter GGUN-FL02 (Spezifikationen in Anhang 7.2.2) wurde zur Online-Messung der U-Konzentration des KS-Abflusses während der Tracerversuche eingesetzt. Da jedoch im Messbereich des Filterfluorimeters für U Störungen der Messungen in Form erhöhter Konzentrationen durch Überlagerung mit der SRB-Fluoreszenz beobachtet wurden, konnten lediglich die Messwerte während der Versuche verwendet werden, bei denen U zusammen mit dem Salztracer eingesetzt wurden (Säulen- und Tankversuche mit kontinuierlicher Tracerzugabe).

4.3 Batch-Versuche

Die Batch-Versuche (durchgeführt als Schüttelversuche) zur Bestimmung des Verteilungskoeffizienten K_d für die Fluoreszenzfarbstoffe wurden auf das KS-Material beschränkt, da nur in Ausnahmefällen (Wasserdurchbruch in Folge einer Überlastung der Kapillarsperre) das KBS-Material mit der Tracerlösung in Kontakt kommt und Sorptionseffekte für die Auswertung der Tankversuche daher nur eine sehr untergeordnete Rolle spielen.

4.3.1 Durchführung

In 200 ml-PE-Weithalsflaschen werden jeweils 50 g ofentrockenes Substrat mit 125 ml Tracerlösung versetzt (Verhältnis Substrat/Lösung nach ROUTSON et al. 1977: 1:2,5) und 24 h in einer Rotationsschüttelapparatur überkopf geschüttelt. Die verwendete Drehzahl von 40 Umdrehungen/Minute garantiert eine ständige Durchmischung des Probenmaterials. Aus technischen Gründen ist ein Intervallbetrieb des Überkopfschüttlers, wie er von LANG (1982) zur Vermeidung von mechanischem Abrieb und der damit verbundenen Bildung neuer sorptionsfähiger Oberflächen empfohlen wird, nicht möglich. Da dieser Effekt jedoch erst bei Versuchszeiten > 100 h nennenswerte Auswirkungen hat, kann er bei den hier durchgeführten Versuchen vernachlässigt werden.

Nach Ende der Schüttelphase werden die Proben 48 h erschütterungsfrei stengelassen, um eine Sedimentation der suspendierten Feinpartikel zu ermöglichen. Eine Filtration der Proben erfolgt nicht, um eine Verfälschung der Tracerkonzentration aufgrund möglicher Wechselwirkungen mit dem Filtermaterial auszuschließen. Der abpipettierte Überstand wird mit dem Fluoreszenzspektrometer analysiert. Aufgrund der photolytischen Empfindlichkeit der Fluoreszenztracer sind die Proben während der Versuche vor Lichteinfluss geschützt.

Die Tracerlösungen bestehen aus einem Cocktail der vier Fluoreszenzfarbstoffe U, SRB, Na und P, wobei das Mischungsverhältnis dem der Injektionslösungen für die Säulen- und Tankversuche entspricht. Die Konzentrationen der einzelnen Farbstoffe in den betrachteten Konzentrationsstufen sind in Tab. 5 aufgeführt. Von jeder der sechs Konzentrationsstufen werden drei Parallelversuche durchgeführt. Um den Einfluss der Sorption des Tracers am Flaschenmaterial zu erfassen, wird zusätzlich eine Blindprobe, bei der kein Substrat zur Tracerlösung gegeben wird, mit untersucht. Als Referenz dient eine Rückstellprobe der jeweiligen Ausgangslösung.

Tab. 5: Konzentrationen der Ausgangslösungen für die Batch-Versuche

Versuch	U [g/l]	SRB [g/l]	Na [g/l]	P [g/l]
B1	1,00E-05	4,00E-04	2,00E-04	2,00E-04
B2	5,00E-06	2,00E-04	1,00E-04	1,00E-04
B3	1,00E-06	4,00E-05	2,00E-05	2,00E-05
B4	5,00E-07	2,00E-05	1,00E-05	1,00E-05
B5	1,00E-07	4,00E-06	2,00E-06	2,00E-06
B6	5,00E-08	2,00E-06	1,00E-06	1,00E-06

4.3.2 Ergebnisse

Eine tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse der Batch-Versuche für die einzelnen Tracer findet sich in Anhang 7.3. Es kann keine Sorption der Fluoreszenztracer am Flaschenmaterial beobachtet werden. Die zwischen Rückstellprobe und Blindprobe gemessenen Konzentrationsunterschiede liegen allesamt im Bereich der Messungenauigkeit von etwa 2%. Somit sind die beobachteten Sorptionseffekte ausschließlich auf die Sorption am Probenmaterial zurückzuführen.

Abb. 14 zeigt die Verteilungskoeffizienten K_d (Mittelwert) der vier Fluoreszenztracer in Abhängigkeit von der Ausgangskonzentration C_0 .

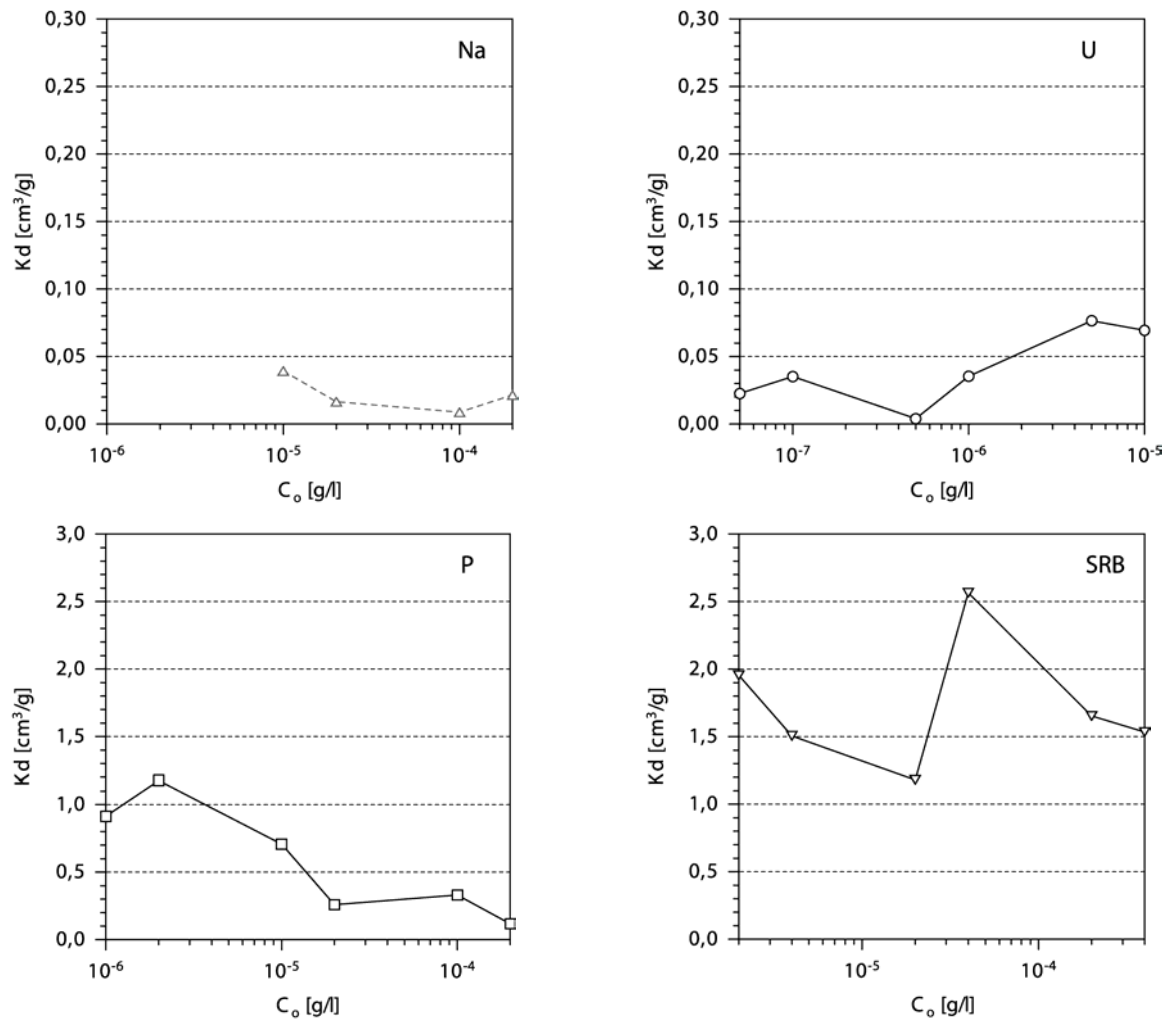


Abb. 14: K_d -Werte (Mittelwerte) der Tracer Na, U, P und SRB in Abhängigkeit von der Ausgangskonzentration C_0

Für Na kann kein sorptiver Einfluss des KS-Materials festgestellt werden: die Differenzen zwischen den Ausgangskonzentrationen und den jeweiligen Gleichgewichtskonzentrationen der Versuche B4-B1 liegen innerhalb des Messfehlers der Analytik. Für die Versuchsreihen B5 und B6 konnten keine Gleichgewichtskonzentrationen für die Tracerlösungen bestimmt werden, da die fluoreszenzspektrometrische Messung im Na-Bereich durch einen Fremdpeak gestört wurde. Mögliche Ursache dafür könnten Lichtstreuungen an Schwebstoffen in der Lösung sein, da dieses Phänomen ausschließlich in den mit Sedimentmaterial versetzten Lösungen, nicht jedoch in Blind- und Rückstellproben auftrat. Zentrifugieren oder Filtern der Lösungen schaffte keine Abhilfe. Bei den höher konzentrierten Proben B4-B1 ist die Fluoreszenz von Na bereits so hoch, dass der Störeinfluss überlagert wird und keine Rolle bei der Analytik spielt.

U zeigt mit K_d -Werten zwischen $0,004 \text{ cm}^3/\text{g}$ und knapp $0,08 \text{ cm}^3/\text{g}$ eine sehr geringe, jedoch durchaus messbare Sorption. Tendenziell ist eine Zunahme der Sorption mit steigender Konzentration der Ausgangslösung zu beobachten. Dies belegt auch Abb. 15, in der der sorbierte Traceranteil C_2 in Abhängigkeit von der Gleichgewichtskonzentration in Lösung C_1 dargestellt ist. Es ergibt sich ein positiver linearer Zusammenhang mit sehr guter Korrelation. Der sorbierte Anteil S des eingegebenen Tracers ist nur gering und beträgt maximal 3 % (Anhang 7.3.1)

P und SRB weisen im Vergleich zu U und Na eine deutlich erhöhte Sorptionsneigung auf. Die ermittelten K_d -Werte für P liegen zwischen $0,12 \text{ cm}^3/\text{g}$ und $1,18 \text{ cm}^3/\text{g}$ und lassen eine Abnahme mit steigender Ausgangskonzentration erkennen. Betrachtet man Abb. 15, so lässt sich hier kein klarer Zusammenhang zwischen C_1 und C_2 erkennen. Zwischen 4,5 % und knapp 31 % der eingegebenen Tracermasse sind an den Kornoberflächen sorbiert (Anhang 7.3.2).

SRB zeigt die höchste Sorption der vier untersuchten Fluoreszenzfarbstoffe. Die K_d -Werte liegen zwischen $0,83 \text{ cm}^3/\text{g}$ und $2,92 \text{ cm}^3/\text{g}$. Der Anteil des sorbierten Tracers C_2 steigt im Verlauf der Versuchsrei-

he von B6 bis B1 kontinuierlich an, der positive lineare Zusammenhang ist sehr gut korreliert. Auch der prozentuale Anteil des sorbierten Tracers erreicht mit 32 % bis 50 % die höchsten Werte der vier untersuchten Tracer (Anhang 7.3.3).

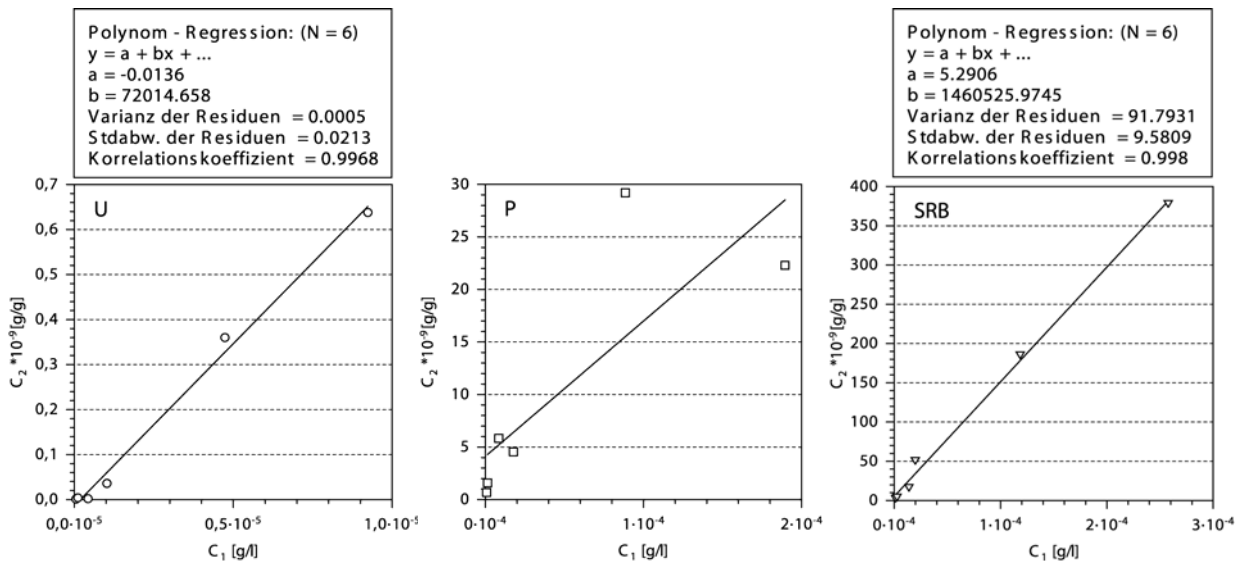


Abb. 15: Sorbierte Tracermasse C_2 der Tracer U, P und SRB in Abhängigkeit von der Gleichgewichtskonzentration in Lösung

4.3.3 Diskussion der Batch-Versuche

Die Batch-Versuche zeigen ein teilweise unerwartetes Sorptionsverhalten für Fluoreszenzfarbstoffe. Das im Vergleich zu U und Na stark reaktive Verhalten von SRB entspricht den in Kapitel 4.2.1 aufgeführten Literaturangaben. Dagegen ist die Sorptionsneigung von P stärker ausgeprägt als erwartet. Dasselbe gilt auch für U, für das ein nahezu konservatives Verhalten angenommen wurde. Für das untersuchte KS_V -Material ist nach den vorliegenden Ergebnissen Na als idealer Tracer anzusehen und wird daher als Referenz bei der Ermittlung der Retardationsfaktoren verwendet.

Die Versuchsergebnisse der Parallelversuche unterliegen starken Schwankungen, was zu großen Standardabweichungen (siehe Anhang 7.3) führt. Die Ursache hierfür dürfte in den unvermeidlichen Unterschieden in der Korngrößenverteilung der eingewogenen Probenmengen zu sehen sein, die die Versuchsergebnisse durch veränderte Anteile an Feinmaterial und damit an reaktionsfähigen Oberflächen beeinflussen können.

Insgesamt bewegen sich die errechneten K_d -Werte in sehr geringen Bereichen. Dies gilt nicht nur für die wenig sorptiven Tracer Na und U, sondern auch für die deutlich reaktiveren Stoffe P und SRB. Ein Vergleich unterschiedlicher Untersuchungen ist zwar kaum möglich, da die Sorptionsneigung eines Stoffes stark vom Substrat abhängig ist, dennoch soll als Beispiel hier MÄGDEFESSEL (1990, zit. in HADI 1992) angeführt werden, der für SRB K_d -Werte $>30 \text{ cm}^3/\text{g}$ ermittelte. Besonders höhere Gehalte an Tonmineralen und organischem Material führen zu einer verstärkten Festlegung von reaktiven Stoffen. Beide Komponenten fehlen im hier untersuchten KS -Material, was die relativ geringen K_d -Werte erklärt.

Generell sollten die Ergebnisse von Schüttelversuchen nicht überbewertet werden, da bei dieser Art der Versuchsdurchführung die Bedingungen in einem durchströmten Medium nicht richtig nachvollzogen werden. Besonders das große Lösung-Feststoff-Verhältnis und die ständige Durchmischung führen zu einer Überschätzung der Sorptionsneigung eines Stoffes unter „natürlichen“ Bedingungen (VANDERBORGHT et al. 2002, DURNER 2003).

4.4 Säulenversuche

Zur Bestimmung des Migrationsverhaltens der eingesetzten Tracer wurden Durchlauf-Säulenversuche an einer Auslaufsäule (KLOTZ 1991) unter ungesättigten Bedingungen mit dem KS_v -Material durchgeführt. Ziel ist die Bestimmung von Retardationskoeffizienten (R_D) für die einzelnen Tracer, die das Ausmaß der Transportverzögerung des Markierungsstoffes gegenüber einem Referenzstoff angeben. Die Versuche erfolgten mit momentaner (Sm-Versuche) und kontinuierlicher Tracereingabe (Sk-Versuche).

4.4.1 Versuchsaufbau der Säulenversuche

Alle Versuche wurden an einer Säule durchgeführt, um eine größtmögliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen und den Einfluss von Einbauheterogenitäten, die nicht vollständig zu vermeiden sind, auf die Versuchsergebnisse zu minimieren.

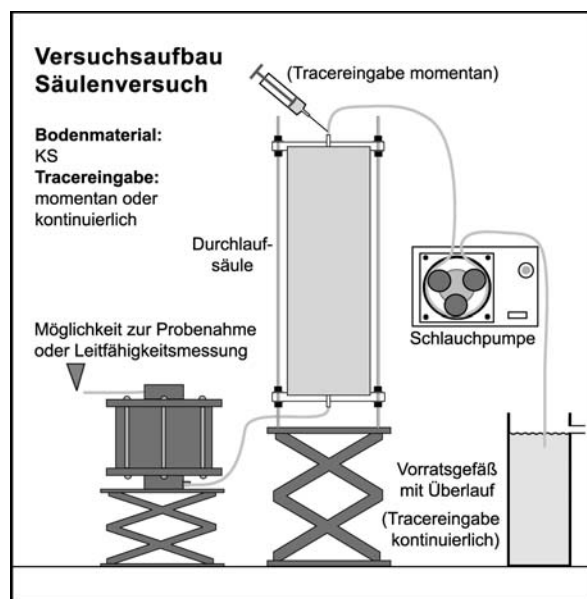


Abb. 16: Versuchsaufbau der Säulenversuche

Die verwendete Säule aus Plexiglas besitzt eine Länge von 0,50 m und einen Innendurchmesser von 0,10 m (167-fache mittlerer Korndurchmesser). Aufgrund dieser Randbedingungen kann nach KLOTZ (1991) davon ausgegangen werden, dass die hydraulischen Randeffekte den Versuchsverlauf nur minimal beeinflussen. Die Abschlussplatten, ebenfalls aus Plexiglas bestehend, sind mit einer konzentrisch auf den Ein- bzw. Auslaufpunkt zulaufenden, achtstrahligen Schlitzfräsung versehen. Dadurch soll eine gleichmäßige Wasserverteilung erzielt werden. Die auf Passung gearbeitete Ringfräsung der Platten, die innen zusätzlich mit einer dünnen Silikondichtschicht versehen ist, dient als Aufnahme für das Säulenrohr. Spannschrauben auf den vier durchgehenden Gewindestangen sorgen für eine Abdichtung der Säule durch Pressung (Abb. 16). Ein Siebnetz (Maschenweite 0,125 mm) vor der Auslaufplatte verhindert ein Verstopfen des Abflusses durch ausgeschwemmte Sedimentpartikel.

Zur Beregnung der Versuchssäule mit Durchflussraten von 2 l/d bis 80 l/d werden zwei stufenlos regelbare Schlauchpumpen eingesetzt, wovon die eine den Bereich bis zu einer Rate von ca. 20 l/d, die andere den Bereich von 20 l/d bis 80 l/d abdeckt.

Die Tracereingabe erfolgt für die Versuche mit momentaner Eingabe durch Injektion der Tracer in den Bewässerungsschlauch direkt vor dem Einlassstutzen der Säule, für die kontinuierliche Eingabe über die Aufgabe der Tracerlösung durch das Bewässerungssystem.

Das der Säule nachgeschaltete GGUN-FL02-Feldfluorimeter erlaubt eine Beobachtung des Uranin-Durchgangs wahlweise in Intervallen von 4 Minuten bzw. 10 Sekunden während der Markierungsversuche. Aufgrund der Störung der U-Messung durch SRB sind die so gewonnenen Durchflusskonzentrationen lediglich für die Auswertung der Sk-Versuche zu verwenden. Die Messung der spez. elektrischen Leitfähigkeit bei den Sk-Versuchen erfolgt mit einem LF-Messgerät (VDSF Umwelttechnik) am Abfluss des Feldfluorimeters in einem Intervall von 30 s oder 60 s, die Messwerte werden mit einem Datalogger aufgezeichnet. Für die Analyse der Fluoreszenzfarbstoffe am Laborfluorimeter werden bei den Sm-Versuchen dem Feldgerät nachgeschaltet Wasserproben mittels eines automatischen Probennehmers entnommen. Die Entnahmeintervalle sind der Durchflussrate sowie dem Versuchsverlauf angepasst.

Durch Wiegen der gesamten Säule nach Ende einer Versuchsreihe können aus den Einbauparametern und der Masse die Wassersättigung Θ sowie der wassererfüllte Anteil des Porenraums n_w in der Säule bestimmt werden.

4.4.2 Einbau des Versuchsmaterials

Das Sandmaterial wird mit einem Wassergehalt von 2 Gew.-% lagenweise eingebaut und mit einem Stempel manuell verdichtet. Für die Säule ergibt sich aus den Einbaudaten rechnerisch eine Trockendichte von $1,64 \text{ g/cm}^3$ bei einem Porenanteil von 0,38. Dies entspricht in guter Näherung den Lagerungswerten der Kapillarschicht im Tankversuch (Trockendichte: $1,60 \text{ g/cm}^3$, Porenanteil: 0,39). Die Einbauparameter sind in Anhang 7.4.2 aufgelistet.

4.4.3 Durchführung der Tracerversuche in der Versuchssäule

Grundsätzlich werden zwei Typen von Markierungsversuchen durchgeführt, die sich in den eingesetzten Tracern und der Art der Tracereingabe unterscheiden.

Bei den Versuchen mit kontinuierlicher Tracereingabe (Versuchsbezeichnung Sk) kommt eine Kombination aus Salz- und Fluoreszenztracer in Form von NaBr und U zum Einsatz. Die gewählte Salzkonzentration von 1 g/l ist unkritisch bezüglich einer dichtebedingten Beeinflussung des Strömungsverhaltens in der Säule zu sehen. Die Sk-Versuche dienen in erster Linie dazu, die Vergleichbarkeit des Transportverhaltens der beiden Tracer in Hinblick auf den späteren Einsatz von NaBr in den Tankversuchen zu testen. Um den Aufwand in der Analytik für diese Vorversuche möglichst gering zu halten, wird U als Referenztracer ausgewählt, da es mit dem Feldfluorimeter gemessen werden kann und somit die Entnahme von Proben zur Analytik im Labor entfällt. Zudem wurden die Batch-Versuche, die die bessere Eignung von Na als quasi-idealem Tracer gegenüber U ergaben, erst nach den Säulenversuchen durchgeführt.

Bei den Versuchen mit momentaner Tracereingabe (Versuchsbezeichnung Sm) wird der Säule ein Cocktail aus den vier Fluoreszenztracern U, SRB, Na und P in Form eines Dirac-Impulses zugegeben.

Die Eingabemassen der Tracer für die Versuche zeigt Tab. 6.

Tab. 6: Eingabemassen der Tracer für die Säulenversuche (Sk: kontinuierliche Tracereingabe, Sm: momentane Tracereingabe)

Säulenversuche - Tracer-Eingabemassen						
Versuchsbezeichnung	Sk		Sm			
Eingabemethode	kontinuierliche Eingabe		momentane Eingabe			
Tracer	U	NaBr	U	SRB	Na	P
Masse [mg]	0,02	6 000	0,0015	0,06	0,03	0,03
Eingabevolumen [ml]	6 000		0,915			

Nach einer mehrwöchigen Vorlaufphase zur dynamischen Konditionierung der Säule (Durchflussrate ca. 20 l/d) werden zunächst vier Sk-Versuche durchgeführt. Die anschließende viermonatige Berechnungspause führt zu einer freien Entwässerung der Säule, bevor die 24 Sm-Versuche beginnen. Die jeweiligen Durchflussraten sowie die zeitliche Abfolge der Versuche sind Tab. 7 zu entnehmen. Während bei den Sm-Versuchen zur Absicherung der Versuchsergebnisse jeweils drei Wiederholversuche pro Durchflussrate erfolgen, beschränken sich die Sk-Versuche auf jeweils einen Versuchsdurchgang. Nach jedem Sk-Versuch sowie jeder Sm-Versuchsserie mit drei Wiederholungen erfolgt eine Wägung der gesamten Säule zur Bestimmung der Wassersättigung Θ und des wassererfüllten Porenvolumens n_w .

Tab. 7: Reihenfolge der Säulenversuche (Sk: kontinuierliche Tracereingabe, Sm: momentane Tracereingabe)

Säulenversuche Sk und Sm - Abfolge				
Bezeichnung	Versuch	Eingabe	Berechnungsrate [l/d]	Berechnungsrate [ml/h]
Sk20	Sk20	kontinuierlich	17,3	720
Sk40	Sk40	kontinuierlich	40,8	1700
Sk60	Sk60	kontinuierlich	59,8	2490
Sk80	Sk80	kontinuierlich	82,8	3450
Sm20-1	Sm201	momentan	20,2	840
	Sm202	momentan	20,4	850
	Sm203	momentan	19,9	830
Sm40	Sm401	momentan	41,0	1710
	Sm402	momentan	40,1	1670
	Sm403	momentan	40,3	1680
Sm20-2	Sm204	momentan	20,4	850
	Sm205	momentan	20,4	850
	Sm206	momentan	21,1	880
Sm60	Sm601	momentan	58,6	2440
	Sm602	momentan	59,5	2480
	Sm603	momentan	58,6	2440
Sm80	Sm801	momentan	79,4	3310
	Sm802	momentan	79,2	3300
	Sm803	momentan	79,2	3300
Sm10	Sm101	momentan	9,6	400
	Sm102	momentan	9,5	400
	Sm103	momentan	10,6	440
Sm02	Sm021	momentan	2,2	90
	Sm022	momentan	2,2	90
	Sm023	momentan	1,9	80
Sm05	Sm051	momentan	5,0	210
	Sm052	momentan	5,3	220
	Sm053	momentan	5,5	230

4.4.4 Auswertung der Säulenversuche

Die Auswertung der Versuche mit kontinuierlicher Eingabe beschränkt sich auf eine einfache Ermittlung der mittleren Fließzeit t_0 , die dem Zeitpunkt t_1 auf dem ansteigenden Ast der normierten U-Durchgangskurve bei einem C/C_0 -Verhältnis von 0,5 entspricht, und der sich daraus ergebenden Fließgeschwindigkeit v_0 .

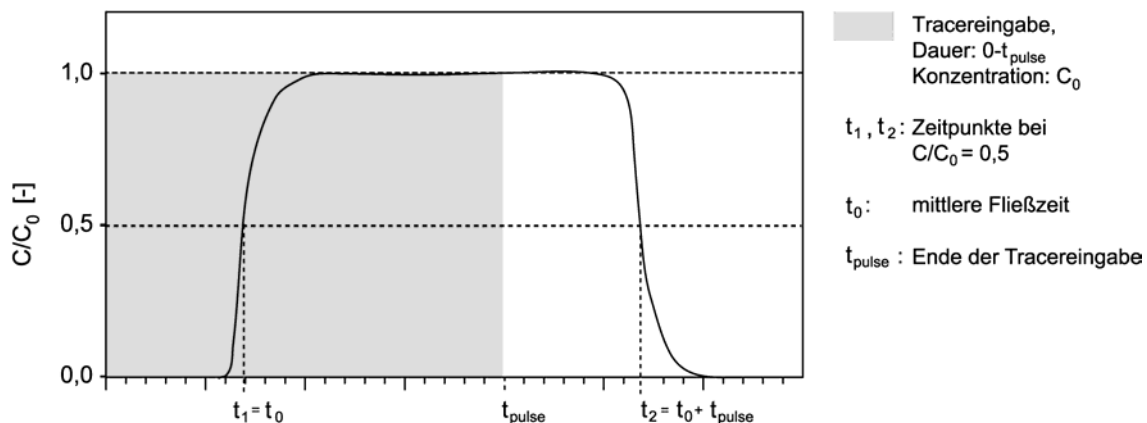


Abb. 17: Schematische Darstellung der Auswertung der Sk-Versuche am Beispiel des Tracers Uranin

Der auf dem absteigenden Kurvenast liegende Zeitpunkt t_2 , für den ebenfalls $C/C_0 = 0,5$ gilt, sollte bei idealem Versuchsverlauf für nichtreaktive Tracer der Summe $t_0 + t_{\text{pulse}}$ (Eingabedauer) entsprechen (Abb. 17). Analog wird bei der Auswertung der LF-Kurve vorgegangen, wobei hier die spez. elektrische Leitfähigkeit vor Tracereingabe LF_{Start} ($610 \mu\text{S}/\text{cm}$) und die maximale gemessene spez. elektrische Leitfähigkeit LF_{Max} ($\approx 1750 \mu\text{S}/\text{cm}$) betrachtet werden. Die Parameter t_1 und t_2 ergeben sich bei einer spez. elektrischen Leitfähigkeit $LF = 0,5(LF_{\text{Max}} - LF_{\text{Start}})$.

Bei den Versuchen mit momentaner Tracereingabe erfolgt die Modellierung des Tracerdurchgangs mit dem Programm FIELD (Version 5, MALOSZEWSKI 2000). Um die Vorgehensweise erläutern zu können, muss hier auf einen Teil der Versuchsergebnisse vorgegriffen werden. Bei der Betrachtung des nach den Ergebnissen der Batch-Versuche als quasi-ideal anzusehenden Tracers Na zeigt sich nämlich, dass der beobachtete Tracerdurchgang nicht durch Anpassung einer einzelnen Fitkurve zu erfassen ist. Der Kurvenverlauf der Durchgangskurven weist ein zu flaches Abfallen der Konzentration nach dem Maximum auf. Aufgrund des reaktionsinerten Verhaltens von Na können Sorptionsvorgänge als Ursache für die Kurvenverflachung ausgeschlossen werden. Modellierungsversuche unter Berücksichtigung von immobilen Wasseranteilen und diffusiven Vorgängen führen ebenfalls nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Erst durch eine Aufspaltung des Durchgangs in mehrere sich überlappende Einzelpeaks lässt sich der Tracertransport gut nachvollziehen (Abb. 18). Die linke Seite der Abbildung zeigt die Best-Fit-Kurve bei Modellierung der Gesamtkurve, die eine unbefriedigende Anpassung aufweist. Rechts ist dagegen die Aufspaltung in vier Teilkurven dargestellt. Aus deren Addition ergibt sich die Gesamtkurve des modellierten Tracerdurchgangs, die eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten aufweist. Zur Erzeugung der Teilkurven wird das von MALOSZEWSKI zur Verfügung gestellte Programm DIFFER verwendet.

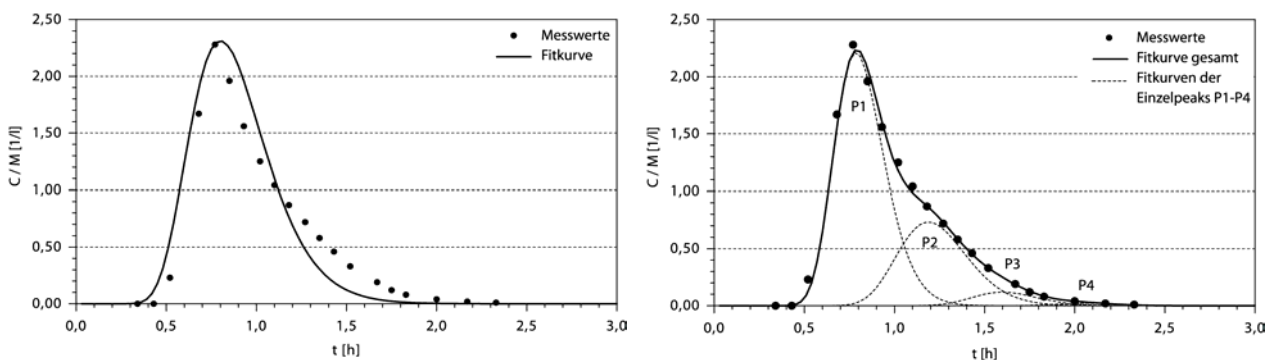


Abb. 18: FIELD-Modellierung des Tracerdurchgangs mit einer Fitkurve (links) sowie als Summenkurve aus vier Teilkurven (rechts) am Beispiel von Versuch Sm201-Na

Da Na praktisch keine Wechselwirkungen mit dem durchströmten KS-Material eingeht, lassen sich die Einzelpeaks klar voneinander trennen und sehr gut modellieren. Der E-Wert („Efficiency“), der ein Maß für die Güte der Modellanpassung darstellt, liegt für die überwiegende Anzahl der Teilkurven nahe dem Idealwert 100 %. Für den schwach reaktiven Tracer U lassen die geringen beobachteten Sorptionseffekte eine entsprechende Vorgehensweise bei der Modellierung der Tracerdurchgänge zu. Dagegen gestaltet sich die Modellierung des Tracerdurchgangs für die Tracer P und SRB aufgrund deren reaktiver Natur sehr schwierig. Eine eindeutige Abgrenzung einzelner Peaks ist praktisch nicht möglich, da durch die Überlagerung der Teilkurven das Ausmaß des Tailings nicht erfasst werden kann.

Die Annahme einer reversiblen Sorption mit sofortiger Gleichgewichtseinstellung bildet ein Hilfsmittel für die Auswertung der Versuche mit SRB und P. Damit stellt alleine die Transportverzögerung ein Indiz für sorptive Vorgänge dar. Es ergibt sich bei der Modellierung der Tracerdurchgänge für den Hauptdurchgang eine sehr gute Kurvenanpassung durch mehrere Teilkurven. Im Bereich des ausgeprägten Tailings dagegen verbleibt eine „Restkurve“, die durch die Modellierung nicht mehr erfasst werden kann. Sie entsteht durch die Aufsummierung der Fehler durch die Nichtberücksichtigung von Tailings bei den einzelnen Teilkurven. Generell führt dieses Vorgehen zu einer Unterschätzung der Tracerrückgewinnung von P und SRB, da die Konzentrationen aus dem Tailing des Gesamtdurchgangs bei der Modellierung nicht berücksichtigt werden und daher in der Modellierungsbilanz fehlen. Zur Abschätzung des Fehlbetrags wird

mit der Momentenmethode (als Option in FIELD enthalten) die Fläche unter der Restkurve ermittelt und daraus unter Berücksichtigung der Durchflussrate die zugehörige Restrückgewinnung R^* berechnet.

4.4.5 Hydraulische Verhältnisse in der Versuchssäule

Da die Pumpe für die kleinen Pumpleistungen zu Beginn der Versuche nicht zur Verfügung stand, war eine kontinuierliche Steigerung der Durchflussrate nicht möglich. Daher wurden zunächst die Versuche mit Durchflussraten ≥ 20 l/d durchgeführt und erst anschließend die Versuche mit den Durchflussraten zwischen 2 l/d und 10 l/d. Als Folge davon lassen sich bei Betrachtung der durch die Wägung der Säule ermittelten Wassersättigungen Hysterese-Effekte feststellen.

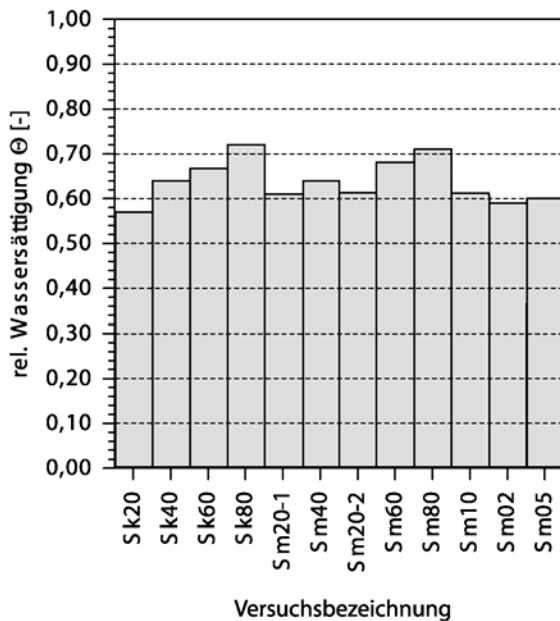


Abb. 19: Relative Wassersättigung Θ in der Versuchssäule während der Markierungsversuche in Abhängigkeit der verschiedenen Durchflussraten (Erläuterung der Versuchsbezeichnungen siehe Tab. 7)

Wie Abb. 19 zeigt, liegt die relative Wassersättigung in der Säule nach der ersten Versuchsreihe (Sk20, Beregnungsrate 17 l/d) bei 0,57. Mit den folgenden Versuchen erhöht sie sich mit steigender Durchflussrate auf 0,72 nach Versuch Sk80 (83 l/d). Die anschließende Verringerung der Beregnungsrate auf ca. 20 l/d zu Beginn der Sm-Versuche führt lediglich zu einem Rückgang der Sättigung auf 0,61 – ein deutlich erhöhter Wert im Vergleich zum Sk20-Versuch. Die nachfolgende schrittweise Belastungserhöhung auf etwa 80 l/d führt zu vergleichbaren Wassersättigungen wie während der entsprechenden Beregnungsraten der Sk-Versuche. Besonders deutlich wird das Hystereseverhalten nochmals bei der anschließenden Reduzierung der Beregnung auf unter 10 l/d: die Sättigungswerte bleiben auf einem Niveau von 0,59-0,61, obwohl die Bewässerung auf bis zu 1/10 des Sk20-Werts gesenkt wurde.

Da es sich bei der Versuchssäule um eine Säule mit freiem Auslauf handelt, führt die Beregnung von oben zu einer Zunahme des Wassergehalts nach unten hin. Beim Ausbau des KS-Materials nach Durchführung des letzten Versuchs (Beregnungsrate 10 l/d) wurde daher lagenweise (jeweils 2 cm) der Wassergehalt in der Säule nach DIN 18 121-1 (1998) bestimmt. Die so ermittelte Sättigungsverteilung ist in Abb. 20 zusammen mit dem aus der Wägung der gesamten Säule ermittelten Sättigungsmittelwert dargestellt.

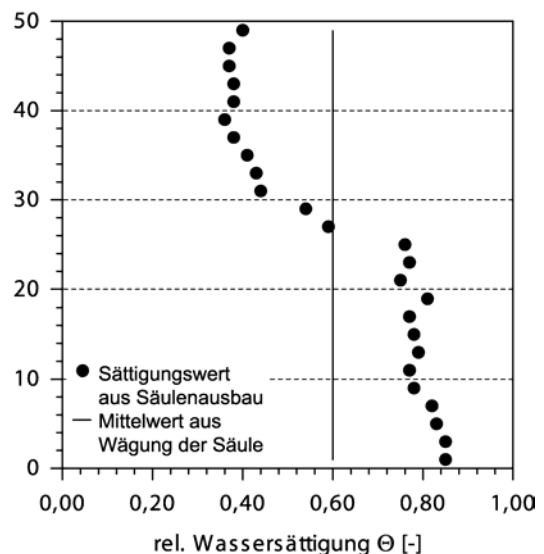


Abb. 20: Vertikale Sättigungsverteilung in der Versuchssäule bei Versuchsende

4.4.6 Ergebnisse der Säulenversuche mit kontinuierlicher Tracereingabe

Die Durchgangskurven von U und die Leitfähigkeitskurven nach der Eingabe von NaBr für die vier Säulenversuche mit kontinuierlicher Eingabe zeigt Abb. 23. Dabei ist für U die auf die Konzentration der Eingabelösung C_0 normierte dimensionslose Konzentration C/C_0 [-] angegeben, während die spez. elektrische Leitfähigkeit LF in [$\mu\text{S}/\text{cm}$] dargestellt ist.

Die Tracerdurchgangskurven von U und die LF-Kurven weisen eine sehr gute Übereinstimmung auf. Nach dem Ersteinsatz der Tracer ist ein sehr steiler Anstieg der normierten Konzentration bzw. der spez. elektrischen Leitfähigkeit zu beobachten, der sich bis zum Erreichen des Maximum-Plateaus deutlich abschwächt. Am Ende des Plateaus fallen die Messwerte wieder sehr stark ab, um anschließend langsam das Ausgangsniveau zu erreichen.

In Abb. 21 ist der Zusammenhang zwischen Durchflussrate Q und relativer Wassersättigung Θ für die Sk-Versuche dargestellt. Die aus den Tracerkurven von U und LF nach Gleichung 24 berechneten Sättigungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den tatsächlichen Sättigungswerten aus der Wägung der Säule. Erwartungsgemäß nimmt die Wassersättigung mit zunehmender Durchflussrate zu. Sie steigt von 0,55 bei einer Durchflussrate von 720 ml/h linear bis auf 0,76 bei 3450 ml/h an.

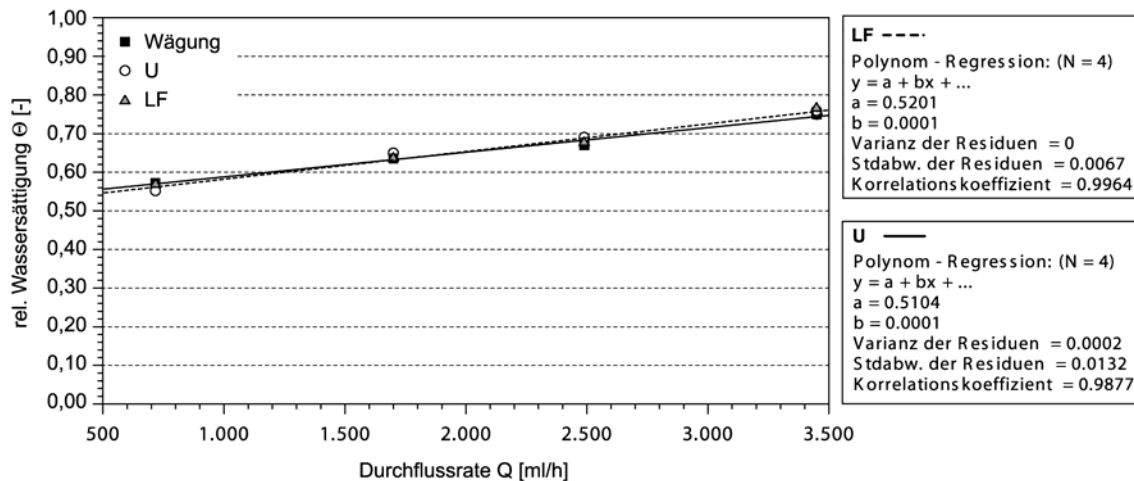


Abb. 21: Relative Wassersättigung Θ in Abhängigkeit von der Durchflussrate Q für die Sk-Versuche

Die aus t_0 ermittelten mittleren Fließgeschwindigkeiten v_0 für U und LF sind in Abb. 22 in Abhängigkeit von der Durchflussrate Q dargestellt. Es ergibt sich ein für beide Tracer nahezu identischer linearer Zusammenhang. Die Fließgeschwindigkeiten betragen bei der kleinsten Durchflussrate (720 ml/h) etwa 42 cm/h und steigern sich bis 153 cm/h bei der Maximalbewässerung von 3450 ml/h.

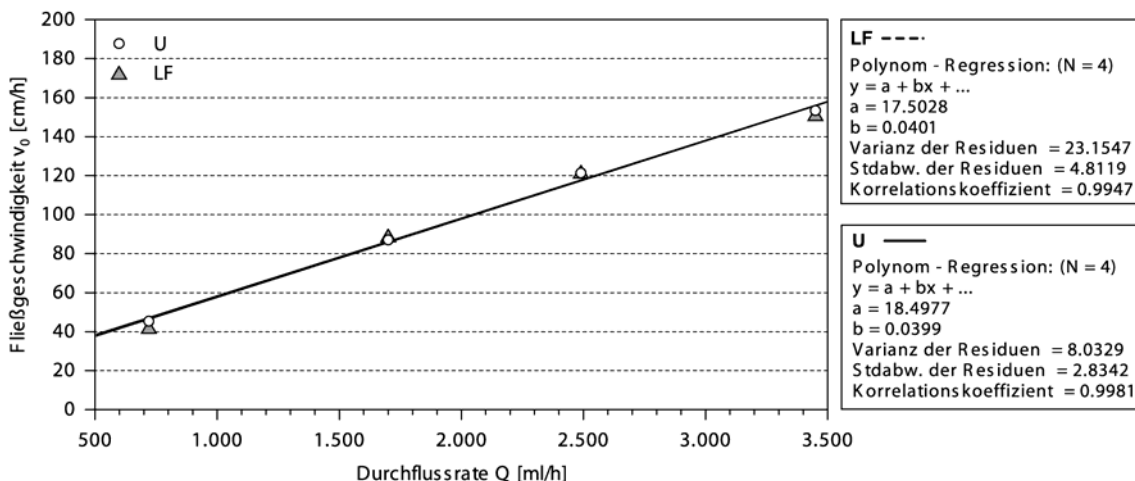


Abb. 22: Mittlere Fließgeschwindigkeiten v_0 in Abhängigkeit von der Durchflussrate Q für die Sk-Versuche

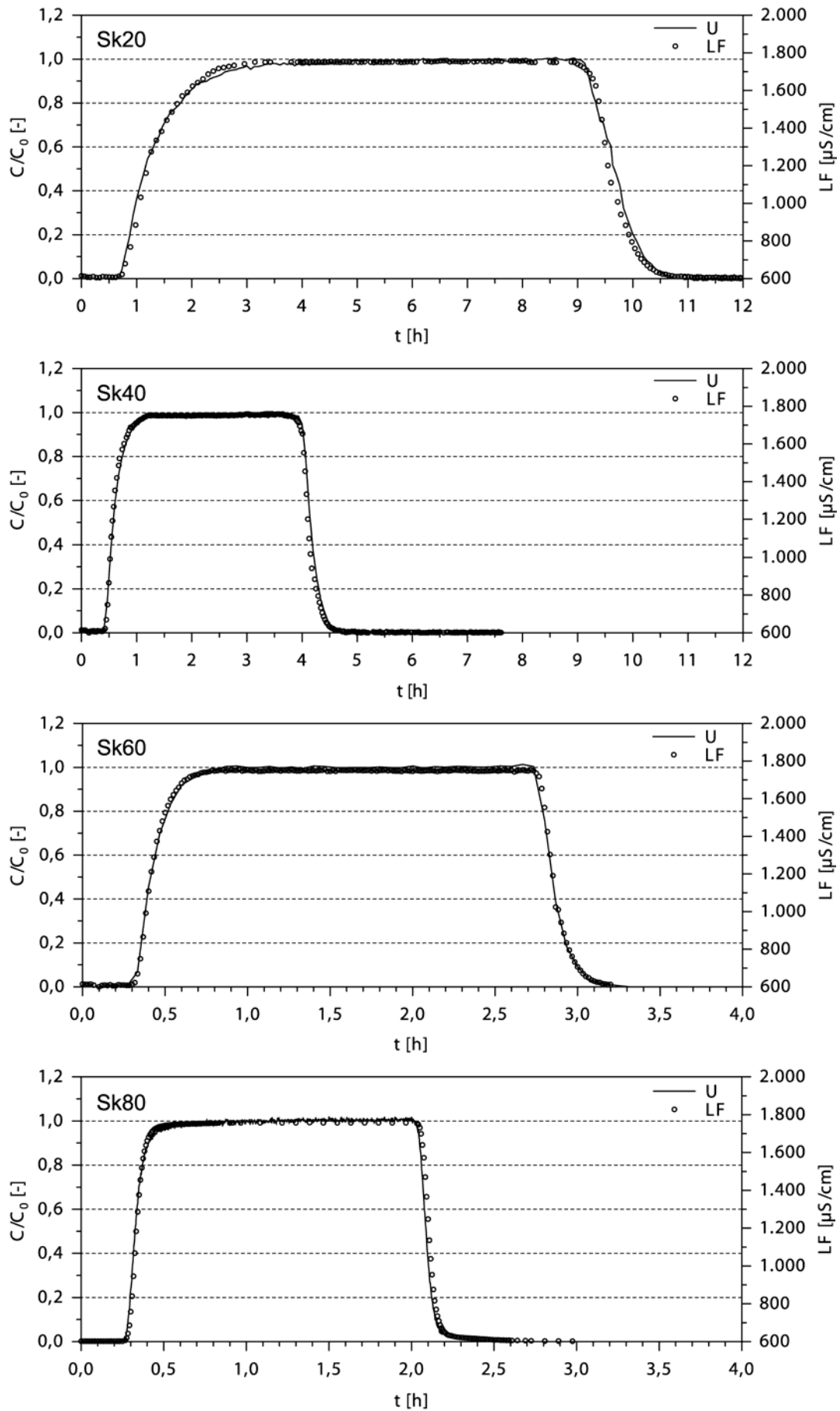


Abb. 23: Tracerdurchgangskurven der Versuche Sk20, Sk40, Sk60 und Sk80 für die Tracer U (C/C_0) und NaBr (LF)

Zur Kontrolle des Versuchsverlaufs wurde die tatsächliche, gemessene Dauer der Tracereingabe mit der berechneten Eingabedauer ($t_{\text{pulse}} = t_2 - t_1$) verglichen (Abb. 24). Für U ergeben sich Abweichungen zwischen -1,2 % und +0,3 %, die für die LF-Kurven ermittelten Zeiten weichen zwischen -1,1 % und 0,4 % von den tatsächlichen Eingabezeiten ab.

Betrachtet man den aus der Auswertung der Versuche nach Gleichung 21 errechneten wassererfüllten Porenanteil n_w im Vergleich mit den aus der Wägung der Säulen erhaltenen Werten, so ergibt sich das in Abb. 25 dargestellte Bild. Die prozentuale Abweichung vom aus der Wägung ermittelten Wert liegt für U im Bereich von -4,2 % bis +3,5 %, für LF beträgt sie -1,7 % bis +3,5 %.

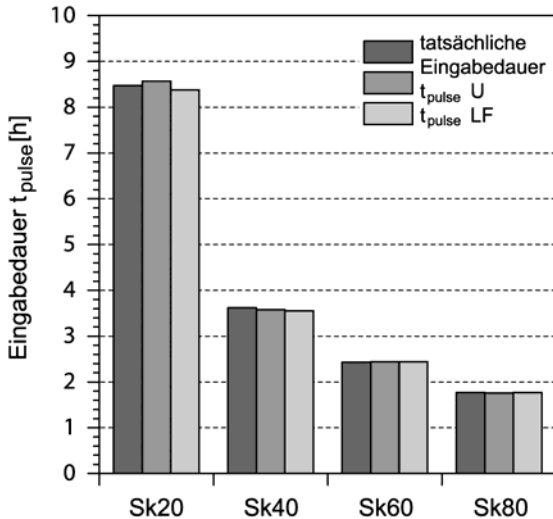


Abb. 24: Tatsächliche und berechnete Eingabedauer t_{pulse} für die Sk-Versuche

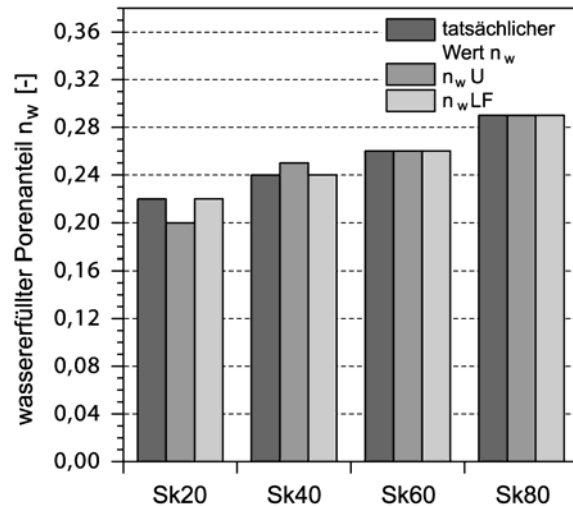


Abb. 25: Tatsächlicher und berechneter wassererfüllter Porenanteil n_w für die Sk-Versuche

Abb. 26 zeigt den zeitlichen Verlauf der Rückgewinnung des Tracers U für die vier Sk-Versuche. Die relative Rückgewinnung R ist mit Werten von 0,979 bis 0,998 als vollständig anzusehen.

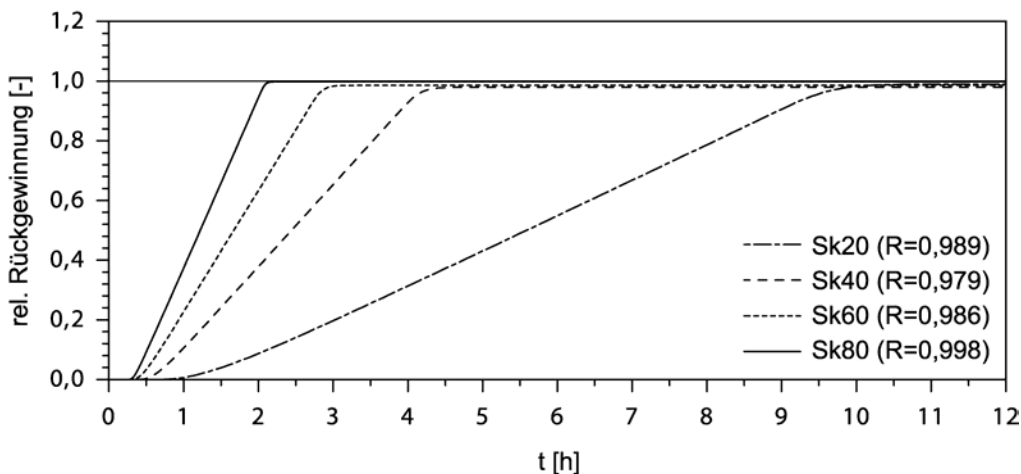


Abb. 26: Relative Rückgewinnung R von U für die Sk-Versuche

4.4.7 Ergebnisse der Säulenversuche mit momentaner Tracereingabe

Die Tracerdurchgangskurven für Na, U, P und SRB der Versuche mit momentaner Eingabe sind in Anhang 7.5 in grafischer Form dargestellt. Es ist die auf die Tracereingabemasse M normierte Konzentration C/M [1/l] in Abhängigkeit von der Zeit nach Tracereingabe t [h] aufgetragen. Neben den Datenpunkten enthalten die Diagramme die modellierten Durchgangskurven (Gesamtkurve und Teilkurven). Für die reaktiven Tracer P und SRB ist die Zeitachse so gewählt, dass der Hauptdurchgang gut erkennbar ist. Dafür muss auf die grafische Darstellung des Tailings verzichtet werden. Das Ausmaß des Tailings ist jedoch am Zusatz „Tracer bis x h nachweisbar“ zu erkennen.

Wie bereits in Kapitel 4.4.4 beschrieben, setzt sich der beobachtete Tracerdurchgang aus mehreren sich überlagernden Teilkurven zusammen. Bei der Betrachtung der Modellierungsergebnisse fällt auf, dass die Anzahl der abtrennbaren Teilkurven sowie deren Anteile am Gesamtdurchgang von der Durchflussrate abhängig sind (Abb. 27). Dies gilt für alle vier Tracer.

Mit zunehmender Beregnungsrate verringert sich die Anzahl der Teilkurven: Bei der kleinsten Belastung von ca. 2 l/d bei den Sm02-Versuchen können fünf bis sechs Teilkurven unterschieden werden, bei den durchflussstärksten Sm80-Versuchen mit ca. 80 l/d lassen sich dagegen nur noch drei Teilkurven abtrennen.

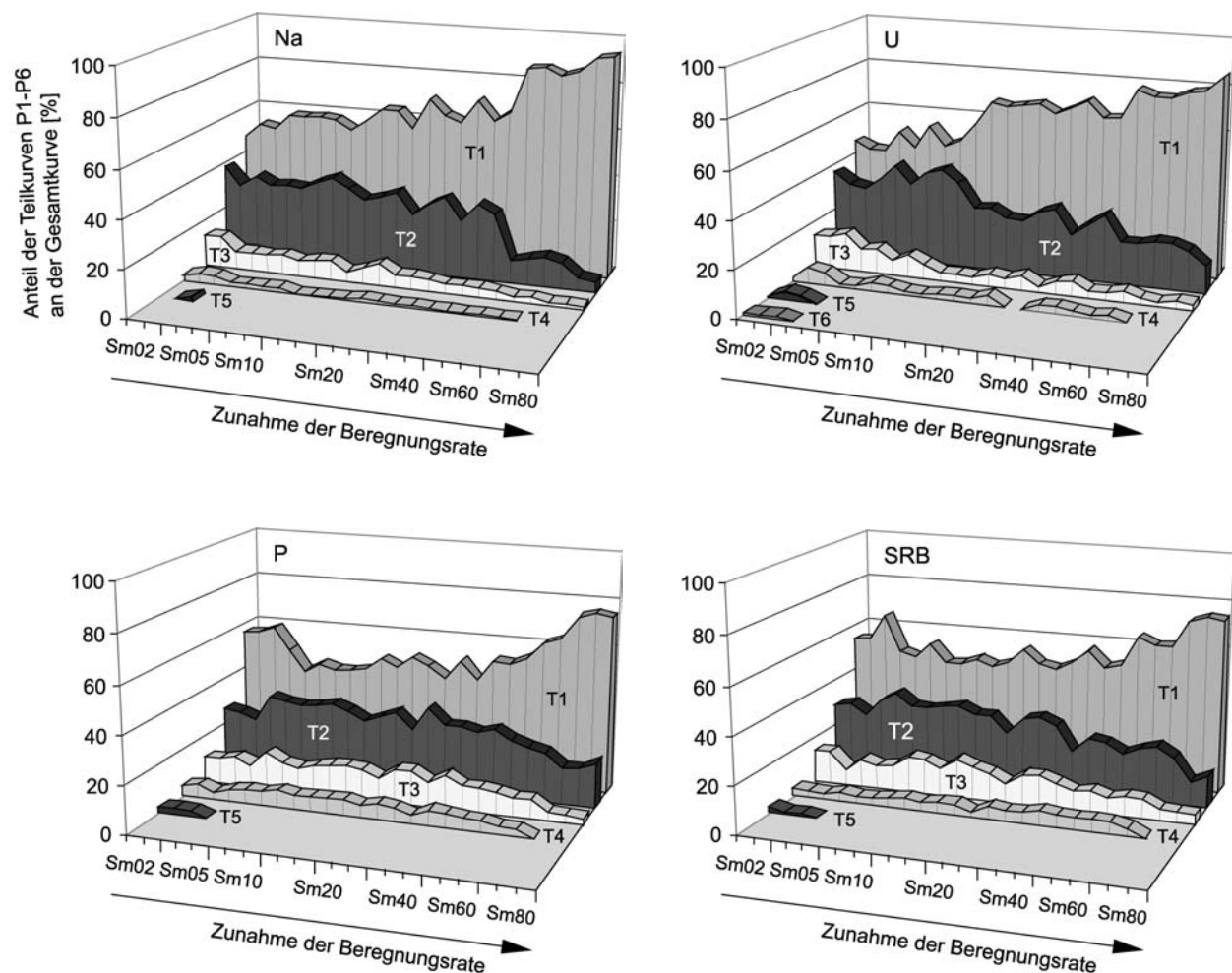


Abb. 27: Anzahl der Teilkurven T_x und deren prozentuale Rückgewinnung R_{fit} (Anteil am Gesamtdurchgang)

Den Anteil der einzelnen Teilkurven am Gesamtdurchgang spiegelt ihre berechnete Rückgewinnung R_{fit} wider. Generell nimmt der Anteil von der ersten bis zur letzten Teilkurve ab, d.h. der im ersten Peak T1

erfasste Durchgang weist immer den größten Anteil am Gesamtdurchgang auf. Zudem erhöht sich der Anteil der ersten Teilkurve tendenziell mit steigender Beregnungsrate von Werten zwischen 40 % und knapp 60 % bei geringer Durchflussrate bis auf maximal 90 % bei der höchsten Beregnungsrate.

Für den quasi-idealen Tracer Na sowie eingeschränkt für U kann unter Wichtung der Teilkurven nach Gleichung 23 und Gleichung 24 die Sättigung in der Säule berechnet werden. Aufgrund der Transportverzögerung durch ihr reaktives Verhalten ist dies für die Tracer P und SRB nicht möglich, da die erhöhten mittleren Fließzeiten zu einer starken Überschätzung des Wassergehalts führen.

In Abb. 28 sind die für Na und U errechneten Werte zusammen mit den durch Wägung der Säule ermittelten Sättigungen dargestellt. Generell führt eine Steigerung der Durchflussrate zu einer Erhöhung der Sättigung in der Säule. Dabei zeigen besonders die aus dem U-Durchgang berechneten Werte bei Durchflussraten bis ca. 1700 ml/h (Sm40-Versuche) eine sehr große Streubreite mit Abweichungen von bis zu 9 % vom Mittelwert. Ab der Versuchsreihe Sm60 mit Durchflussraten von ca. 2500 ml/h verringert sich die Streuung der Werte stark, die Abweichung vom Mittelwert beträgt maximal 3 %. Generell stimmen die für Na berechneten Sättigungswerte mit den aus der Wägung der Säule ermittelten Werten gut überein. Im Vergleich dazu ergeben sich aus dem U-Durchgang zu hohe Sättigungen. Die dargestellten Regressionsgeraden umfassen jeweils nur die Versuche, die mit steigender Durchflussrate durchgeführt wurden (Sm20-1, Sm40, Sm60 und Sm80). Die Einbeziehung der anderen Versuche würde den Q- Θ -Zusammenhang aufgrund der beobachteten Hysterese-Effekte verfälschen.

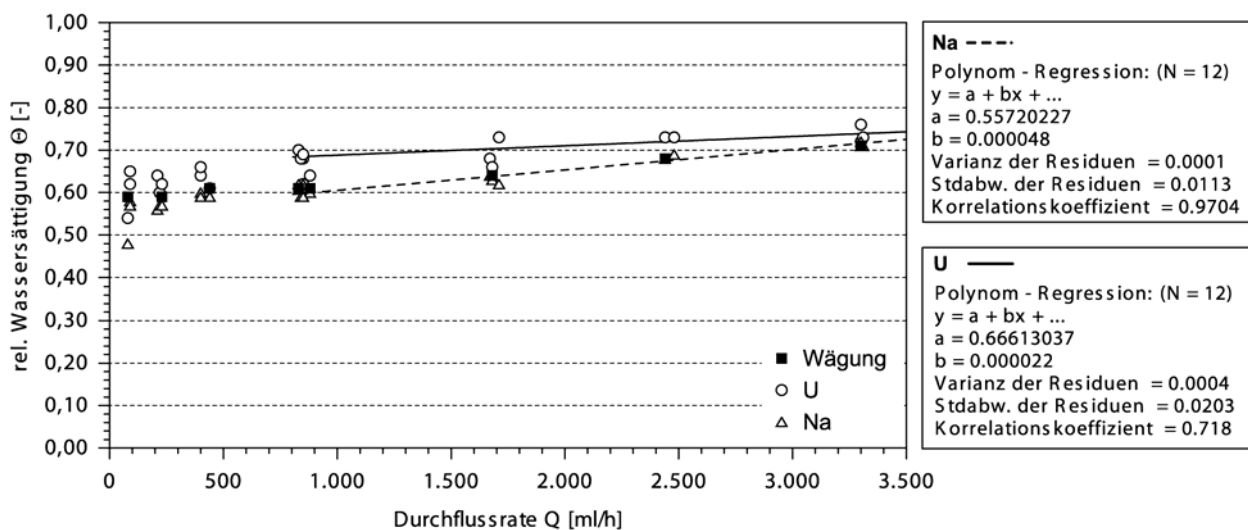


Abb. 28: Zusammenhang zwischen Durchflussrate Q und Wassersättigung Θ für die Sm-Versuche

Für die Teilkurven T1-T4 der einzelnen Tracer sind in Abb. 29 die mittleren Fließgeschwindigkeiten v_0 gegen die Durchflussrate Q aufgetragen. Die Peaks T5 und T6 werden nicht betrachtet, da die Anzahl der Daten zu gering ist.

Grundsätzlich ist für die vier Tracer eine lineare Zunahme der Fließgeschwindigkeit mit steigender Durchflussrate festzustellen. Na und U weisen für die Teilkurven T1-T3 sehr ähnliche Fließgeschwindigkeiten auf, bei T4 zeigt U einen verlangsamteten Transport. Im Diagramm für U sind zusätzlich die aus den Durchgangskurven der Sk-Versuchen gewonnenen Fließgeschwindigkeiten eingetragen. Sie stimmen gut mit den Geschwindigkeiten für T1 überein. Aufgrund ihrer Transportverzögerung durch Sorptionsvorgänge liegen die für P und SRB ermittelten Fließgeschwindigkeiten deutlich unter denen von Na und U. Während die Maximalgeschwindigkeit bei der höchsten Durchflussrate bei Na und U ca. 160 cm/h beträgt, erreicht P maximal 140 cm/h und SRB sogar nur 100 cm/h.

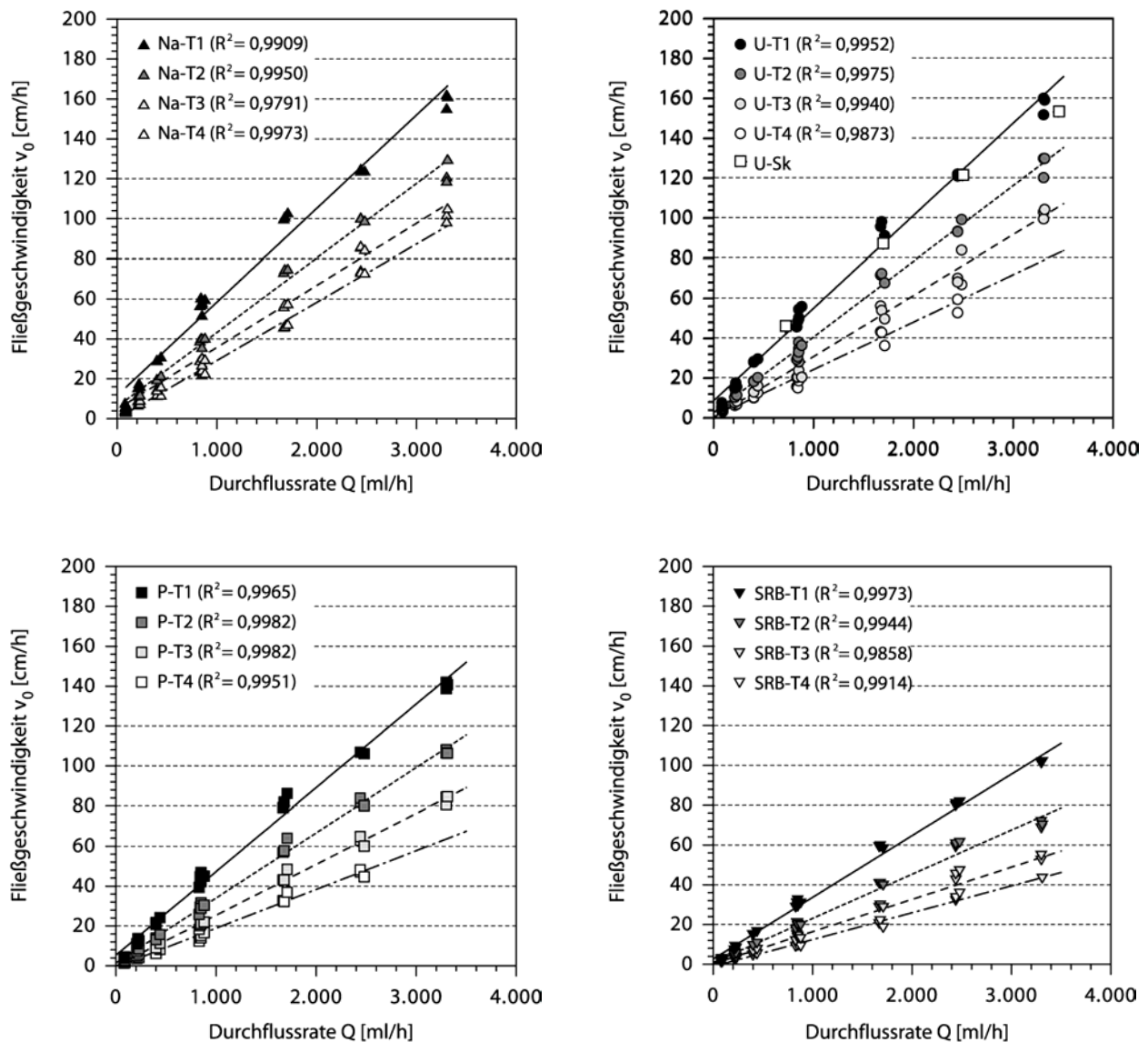


Abb. 29: Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit v_0 der Teilkurven T1-T4 von der Durchflussrate Q für die Sm-Versuche

Die longitudinale Dispersivität α_L der Teilkurven T1-T4 zeigt Abb. 30. Die für die vier Tracer ermittelten Werte sind gegen die Fließgeschwindigkeit v_0 aufgetragen. Sie weisen insgesamt eine sehr große Streuung auf. Die Dispersivitäten reichen bei Na von 0,80 cm bis 0,07 cm, bei U von 1,12 cm und 0,10 cm, für P ergeben sich Werte zwischen 1,42 cm und 0,13 cm, die damit im Bereich von SRB liegen (1,42 cm bis

0,21 cm). Tendenziell nimmt die Dispersivität von T1 bis T4 ab. Zusätzlich ist ein generelles Muster zu erkennen: die bei kleinen Fließgeschwindigkeiten geringen Dispersivitäten steigen mit zunehmender Fließgeschwindigkeit an, um dann wieder zurückzugehen. Dieser Effekt schwächt sich von T1 bis T4 stark ab. Die Geschwindigkeit, bis zu der die Zunahme der Dispersivität zu erkennen ist, entspricht der Fließgeschwindigkeit, die in den Sm20-Versuchen erreicht wurde. Insgesamt sind die beobachteten Dispersivitäten gering. Innerhalb der Tracergruppe zeigt Na die geringsten Werte mit maximal 0,8 cm, während P und SRB mit rund 1,4 cm die höchsten Werte aufweisen. U liegt mit etwa 1,1 cm in der Mitte.

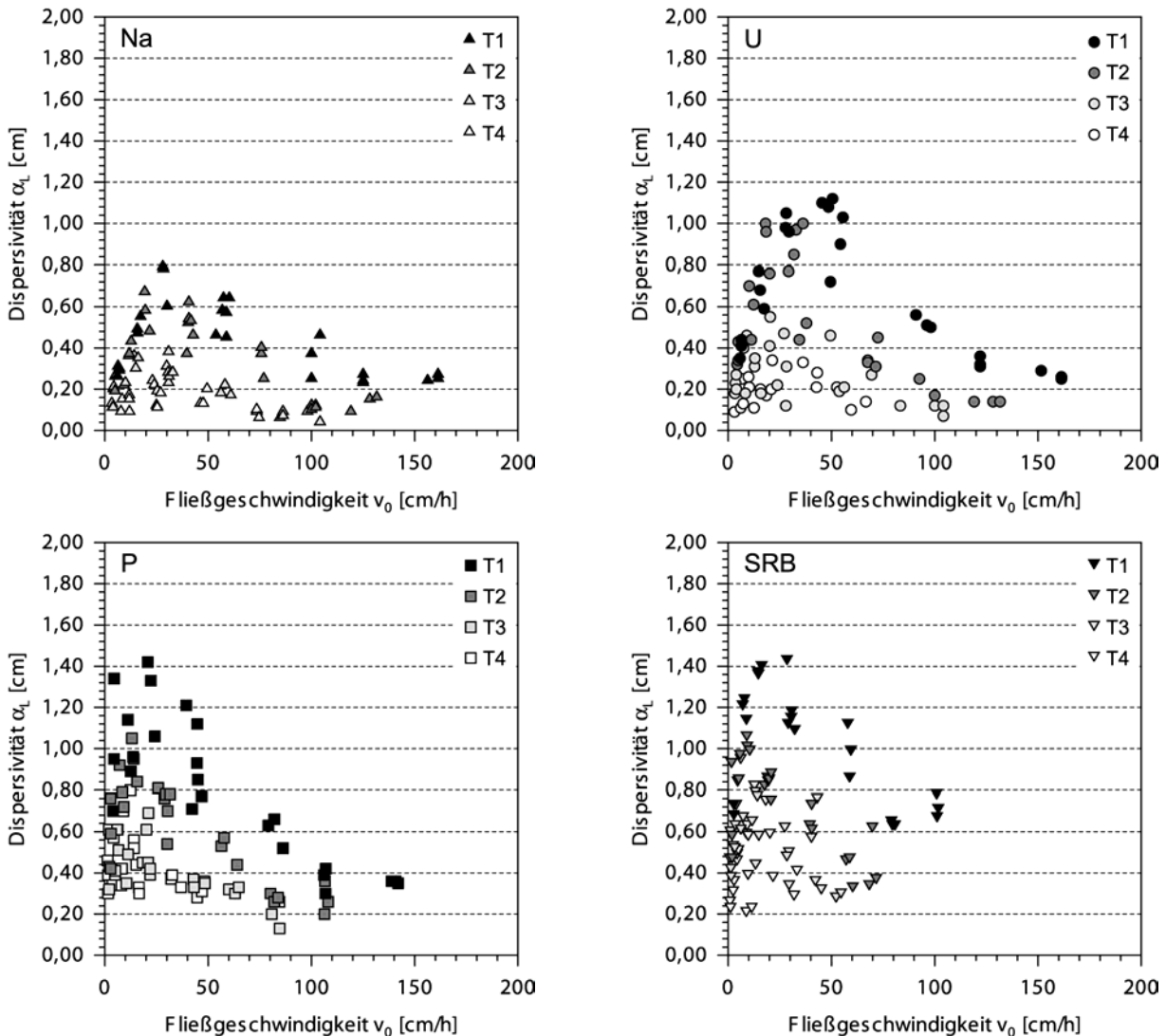


Abb. 30: Abhängigkeit der longitudinalen Dispersivität α_L der Teilkurven T1-T4 von der Fließgeschwindigkeit v_0 für die Sm-Versuche

Die in Abb. 31 angegebene Rückgewinnung R der Tracer setzt sich zusammen aus den als R_{fit} bezeichneten modellierten Rückgewinnungsraten der Teilkurven des Tracerdurchgangs und der nicht durch die Modellierung der Teilkurven erfassten Restrückgewinnung R^* . Letztere spielt für die nicht oder nur gering sorptiven Tracer Na und U mit Werten $< 0,5\%$ praktisch keine Rolle. Dagegen entspricht die Restrückgewinnung für die reaktiven Tracer P und SRB einem Anteil von 1,9 % bis 8,1 % bzw. 0,4 % bis 12,2 % der eingegebenen Tracermenge. Betrachtet man die gesamte Rückgewinnung R als Summe aus R_{fit} und R^* , so ergeben sich insgesamt Werte zwischen 98,8 % und 101,4 %.

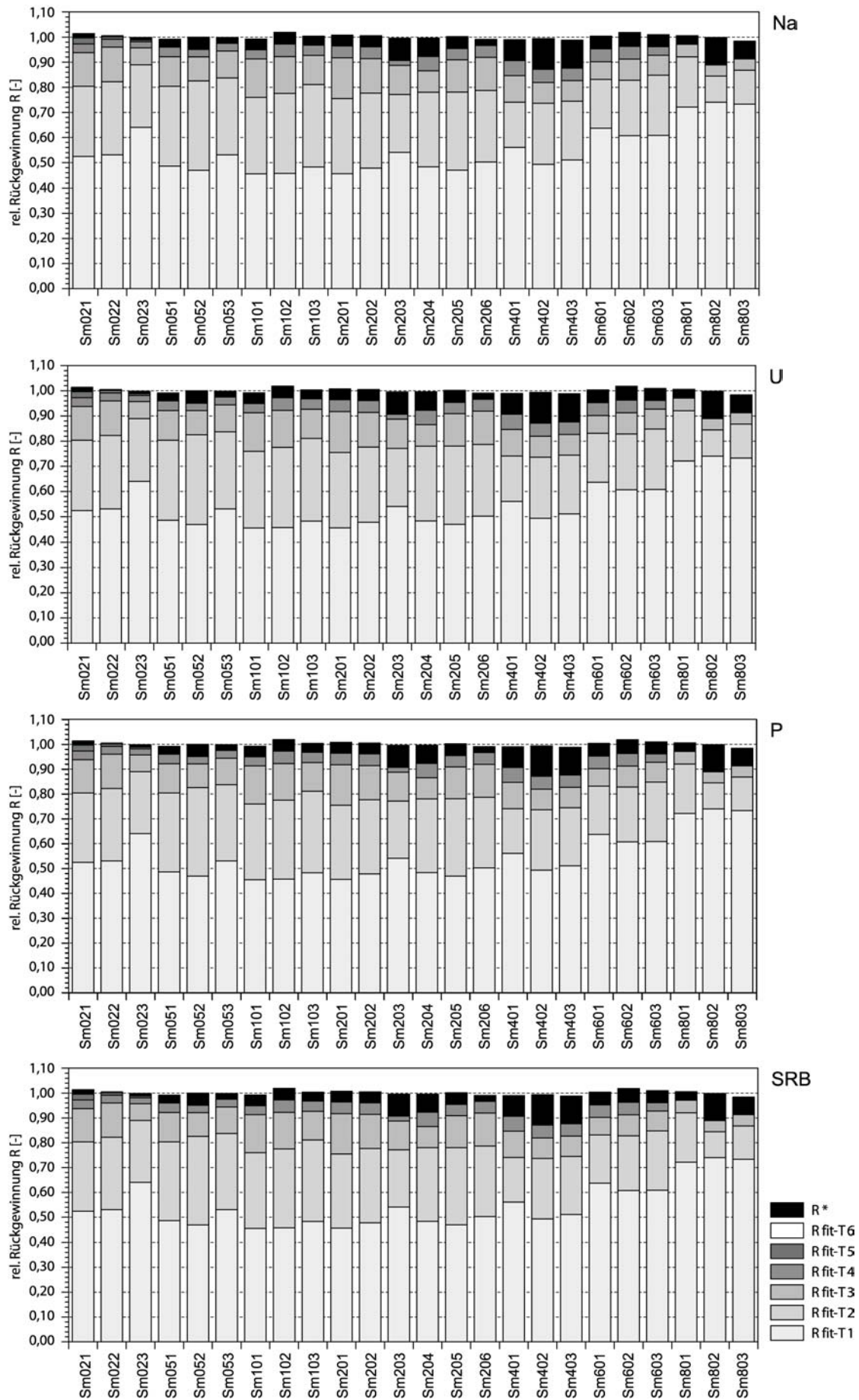


Abb. 31: Rückgewinnung der Tracer Na, U, P und SRB für die Sm-Versuche

Der Vergleich der Fließgeschwindigkeiten führt zu einer Aussage über Retardierung der Tracer. Als Referenz dient hierbei Na, das sich in den Batch-Versuchen als quasi-ideal in seinem Verhalten gegenüber dem Versuchsmaterial erwiesen hat. Abb. 32 veranschaulicht die Retardationsfaktoren der Tracer U, P und SRB gegenüber Na. Errechnet wurden die R_D -Werte aus den Teilkurven T1 der Tracerdurchgänge, da diese am genauesten zu erfassen sind und den größten Anteil am Tracerdurchgang haben.

SRB zeigt mit R_D -Werten zwischen 1,6 und 2,3 die höchste Retardierung, gefolgt von P, dessen Retardationsfaktoren sich zwischen 1,2 und 1,6 bewegen. U weist mit R_D -Werten von 1,00 bis 1,15 die geringste Transportverzögerung auf. Generell ist für die beiden reaktiven Tracer P und SRB eine Abnahme von R_D mit zunehmender Durchflussrate zu beobachten. U lässt dieses Verhalten nicht erkennen.

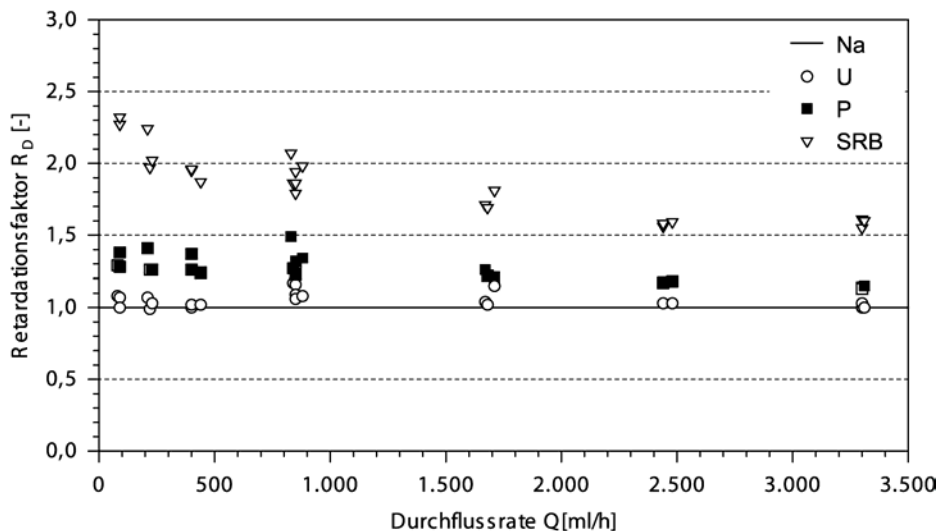


Abb. 32: Retardationsfaktoren von U, P und SRB gegenüber Na, berechnet aus den Teilkurven T1 der Tracerdurchgänge bei den Sm-Versuchen

4.4.8 Interpretation der Säulenversuche

Die Aufspaltung des Tracerdurchgangs der Säulenversuche mit momentaner Eingabe in verschiedene Teilkurven zeigt deutlich, dass beim Wassertransport in der Säule kein homogenes Fließfeld herrscht.

Das Auftreten von Randumläufigkeiten und bevorzugten Fließwegen aufgrund von Heterogenitäten in der Säule können aufgrund des Verlaufs der Durchgangskurven und der gleichmäßigen Abstufung der Teilkurven als Ursache für das inhomogene Fließverhalten praktisch ausgeschlossen werden. Auch der lagenweise Einbau des befeuchteten Materials sollte nicht zu einer so starken Beeinflussung des Tracertransports wie beobachtet führen, zumal makroskopisch keine heterogene Strukturierung des Materials zu erkennen ist. Die momentane Tracereingabe erfolgte in einer im Vergleich zur jeweiligen Versuchsdauer sehr kurzen Zeitspanne von 20 s bis 90 s (abhängig von der Durchflussrate). Somit sind die Kriterien eines Dirac-Impulses gegeben, eine Veränderung des Transportgeschehens durch die Eingabe ist damit ebenfalls unwahrscheinlich und zudem nicht in dem beobachteten Ausmaß möglich.

Da die Versuche unter ungesättigten Bedingungen stattfanden, bietet eine Ungleichverteilung der Wassergehalte in der Säule einen Erklärungsansatz. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Wassergehalt und Wasserdurchlässigkeit führt eine heterogene Wassergehaltsverteilung zu einem differenzierten Transportverhalten. Bereiche mit höherem Wassergehalt tragen dabei wegen ihrer höheren Transportgeschwindigkeit in verstärktem Maße zum Wasserfluss bei.

Abb. 33 zeigt eine Modellvorstellung zur Entstehung des aus verschiedenen Teilkurven bestehenden Tracerdurchgangs, der bei den Sm-Versuchen beobachtet wurde. In der schematischen Darstellung nicht berücksichtigt ist, dass der Wassergehalt in der Säule aufgrund der Konzeption als Auslaufsäule zusätzlich von oben nach unten zunimmt.

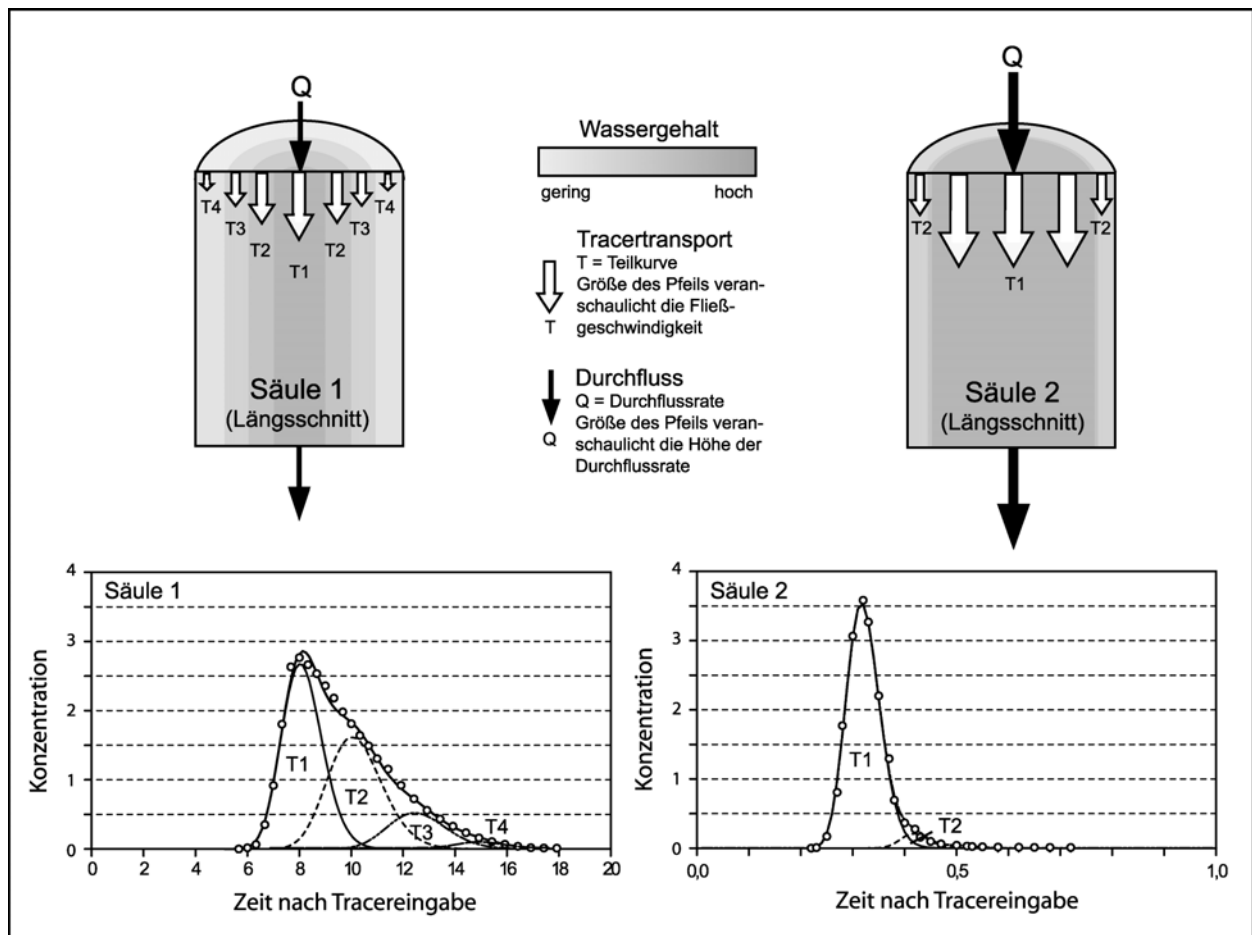


Abb. 33: Modellvorstellung zur Entstehung der Teilkurven beim Tracerdurchgang der Sm-Versuche

Eine mögliche plausible Erklärung für die beobachteten Effekte wäre, dass durch die eingesetzte Verteilerplatte (Kapitel 4.4.1) keine homogene flächige Verteilung des Beregnungswassers bzw. des eingegebenen Tracers über die gesamte Querschnittsfläche der Säule erzielt werden kann.

Das Ausmaß der horizontalen Differenzierung der Wassergehalte in der Säule ist abhängig von der Durchflussrate. Bei einer geringen Durchflussrate reicht die Wasseraufnahmekapazität des Versuchsmaterials aus, um die Wassermenge direkt an der Aufgabestelle aufzunehmen und vertikal nach unten zu transportieren. Es entsteht nur ein schmaler Kernbereich mit einem starken Wassergehaltsgefälle nach außen zu den Randbereichen. In Abb. 33 repräsentiert Säule 1 diesen Zustand. Vereinfacht sind vier konzentrische Wassergehaltsbereiche mit nach außen abnehmendem Wassergehalt dargestellt. Diese Wassergehaltsverteilung resultiert in einer Tracerdurchgangskurve mit steilem Anstieg, aber flachem Abfallen nach dem Maximum. Sie ist aus vier sich überlappenden Teilkurven zusammensetzt, die die Transportbedingungen in den vier Wassergehaltsbereichen repräsentieren. Dagegen übersteigt bei höheren Durchflussraten der lokale Wasserzufluss das Aufnahmevermögen an der Eingabestelle, was zu einer lateralen Komponente der Wasserausbreitung führt. Die Verbreiterung des Kernbereichs geht mit einer Verringerung der weniger gesättigten Randbereiche einher, wie in Abb. 33 am Beispiel der Säule 2 dargestellt ist. Es werden nur noch zwei Wassergehaltsbereiche unterschieden, die aufgrund ihrer Geschwindigkeitsverteilung zu einem schmalen Tracerdurchgang führen, der sich nur aus zwei Teilkurven zusammensetzt. Damit erklärt sich die bei den Sm-Versuchen beobachtete Abhängigkeit der Anzahl der Teilkurven und deren Anteil am Gesamtdurchgang von der Durchflussrate, wie sie in Abb. 27 dargestellt ist.

Dass auch die Ergebnisse der Sk-Versuche mit dem vorgestellten Modell erklärt werden können, zeigt ein Vergleich des U-Durchgangs der Sk-Versuche mit dem der Sm-Versuche. Von Interesse ist dabei der Kurvenverlauf nach dem Maximum-Plateau (Sk) bzw. nach der Maximalkonzentration (Sm). Exemplarisch ist dies in Abb. 34 am Beispiel der Versuche Sk40 und Sm403 dargestellt, für die Versuche bei den anderen Durchflussraten ergibt sich ein ähnliches Bild. Durch eine Verschiebung entlang der Zeitachse lässt sich die Sk40-Kurve mit der Sm403-Kurve praktisch zur Deckung bringen. Somit setzt sich auch der

Sk-Durchgang aus verschiedenen Teilkurven zusammen, die jedoch mit dem angewandten, einfachen Auswerteverfahren nicht zu identifizieren sind.

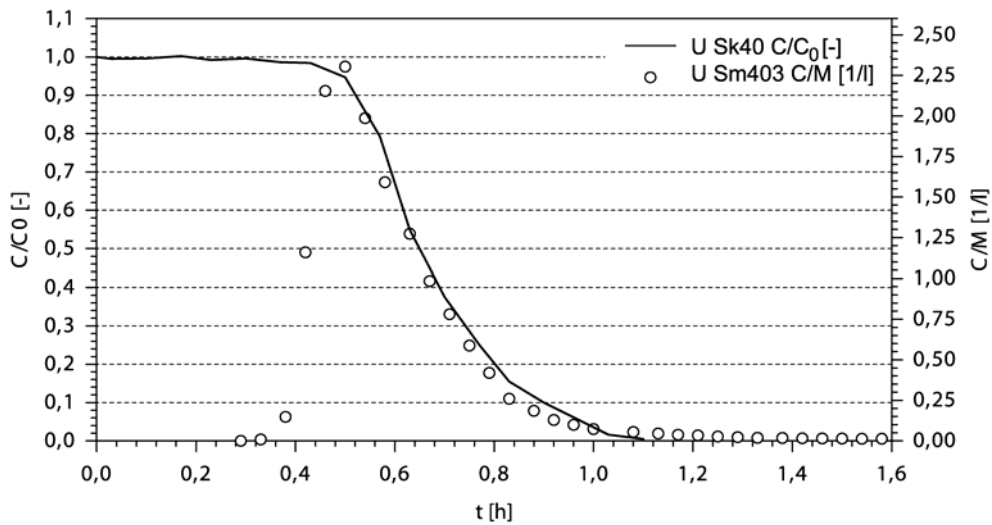


Abb. 34: Vergleich des Konzentrationsrückgangs von U zwischen Sk- und Sm-Versuchen am Beispiel von Sk40 und Sk403

Um die Modellvorstellung durch gravimetrische Wassergehaltsbestimmungen eventuell belegen zu können, wurden zwei Versuchssäulen mit vergleichbaren Einbauparametern wie die Tracersäule aufgebaut und über mehrere Tage mit Durchflussraten von 8,9 l/d (Säule A) bzw. 59,8 l/d (Säule B) beregnet. Der anschließende Ausbau erfolgte – aus Gründen der Zugänglichkeit beschränkt auf die obersten 20 cm der Säule – in Lagen von 2 cm. Eine horizontale Differenzierung mit Hilfe von Stechringen erlaubte die getrennte Beprobung von drei konzentrischen Bereichen, in Abb. 35 als Rand, Mitte und Kern bezeichnet.

Abb. 35 zeigt die Wassergehalte in den drei beprobten Bereichen in Abhängigkeit von der Höhenlage in der Säule. Generell weist Säule A aufgrund der kleineren Durchflussrate geringere Wassergehalte auf als Säule B. Daneben lässt sich eine deutlich stärkere horizontale Differenzierung der Wassergehalte beobachten. Während bei Säule A über die gesamte beprobte Höhe signifikante Unterschiede in den Wassergehalten der drei verschiedenen Bereiche auftreten, verschwinden diese bei Säule B bereits ab einer Höhe von ca. 44 cm. Damit unterstützen die experimentellen Daten die Modellvorstellung der horizontal differenzierten Wassergehaltsverteilung in der Versuchssäule. Die bei den Testsäulen A und B eingesetzten Durchflussraten entsprechen nicht den Extremwerten bei der Durchführung der Sm-Versuche, so dass in diesen Fällen eine noch stärkere Ausprägung der Wassergehaltsunterschiede zu erwarten ist.

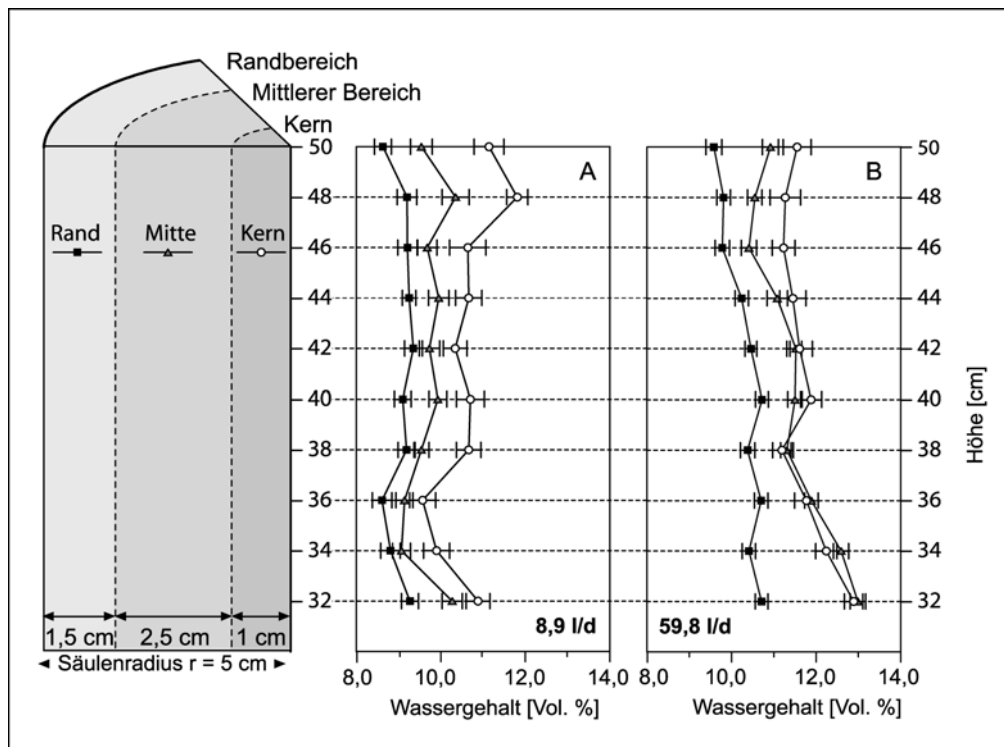


Abb. 35: Horizontale und vertikale Wassergehaltsverteilung in zwei Testsäulen nach Durchflussraten von 8,9 l/d (linkes Diagramm) und 59,8 l/d (rechtes Diagramm)

Die durchgeführten Versuche mit kontinuierlicher Tracereingabe zeigen ein nahezu identisches Verhalten der eingesetzten Tracer U und NaBr. Aufschluss darüber, inwieweit durch die Markierungsversuche die tatsächlichen Verhältnisse in der Säule erfasst werden, gibt der Vergleich von berechneten und experimentell bestimmten Parametern. Die aus den Durchgangskurven von U und LF berechneten Parameter Eingabedauer t_{pulse} und wassererfüllter Porenraum n_w zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Werten (Abb. 24 und Abb. 25). Das den errechneten Wassersättigungen Θ entsprechende Wasservolumen in der Säule liegt bei den vier Durchflussstufen zwischen 830 cm^3 und 1130 cm^3 , so dass das gesamte in der Säule vorhandene Wasservolumen durch die Tracerlösung (Volumen 6000 cm^3) mehrfach ausgetauscht wurde. Das bestätigen auch die beobachteten C/C_0 -Verhältnisse im Maximum-Plateau für U, die jeweils einen Wert von 1 erreichen (Abb. 23). Insgesamt weisen die vorgestellten Versuchsergebnisse der Sk-Versuche darauf hin, dass der Wassertransport durch die eingesetzten Tracer gut nachvollzogen wird. NaBr wird als geeignet für den Einsatz in den Tankversuchen angesehen, wo es durch eine zweidimensionale Beobachtung der Tracerausbreitung eine Aussage über die laterale Ausprägung des Wassertransports in der Kapillarschicht ermöglichen soll.

Das in den Versuchen mit momentaner Tracereingabe beobachtete Transportverhalten der Fluoreszenztracer entspricht den Ergebnissen der Batch-Versuche. Na erweist sich als quasi-idealer Tracer, der den Wassertransport in der Säule am besten nachvollzieht. Das belegt die gute Übereinstimmung der aus den Tracerdurchgängen berechneten Wassersättigungen mit den durch die Wägung der Säule ermittelten Werten (Abb. 28). U zeigt eine geringe Transportverzögerung, während P und SRB stärker retardiert werden. Dabei ist die Retardation von P und besonders von SRB bei kleinen Durchflussraten stärker ausgeprägt. Zurückzuführen lässt sich das auf prinzipiell längere Kontaktzeiten bei kleinen Fließgeschwindigkeiten. Dieser Effekt wird dadurch noch verstärkt, dass bei einer Abnahme der Durchflussrate aufgrund der beschriebenen Ungleichverteilung der Wassersättigungen zunehmend größere Bereiche mit niedrigen Sättigungswerten und damit geringen Fließgeschwindigkeiten entstehen.

Beim Vergleich der Sk- und Sm-Versuche zeigt sich für den in beiden Fällen eingesetzten Tracer U, dass die in den Sk-Versuchen für die verschiedenen Durchflussraten ermittelten Fließgeschwindigkeiten v_0 den aus den Teilkurven T1 der jeweiligen Sm-Versuche entsprechen (Abb. 29). Damit ist eine Vergleichbarkeit der beiden Versuchstypen gegeben.

Die Gesamt-Rückgewinnung der Tracer liegt sowohl für U in den Sk-Versuchen als auch für die vier Fluoreszenztracer bei den Sm-Versuchen nahe 100%. Somit kann eine irreversible Festlegung der Tracer an der Matrix ausgeschlossen werden. Eine reversible Sorption mit sehr langsam ablaufender Desorption ist aufgrund der Versuchsergebnisse ebenfalls unwahrscheinlich.

4.5 Tankversuche

Die Untersuchung des Wassertransports in der ungesättigten Zone an einem Kapillarsperrenaufbau erfolgt in einem speziellen Versuchstank, in den die Versuchsmaterialien im Maßstab 1:1 bezüglich der Schichtstärken der Feldkapillarsperre eingebaut und einer sukzessive gesteigerten hydraulischen Belastung (Beregnung) ausgesetzt werden. Nach Einstellung (quasi-)stationärer Bedingungen für eine Belastungsstufe, charakterisiert durch konstante Zu- und Abflüsse sowie stabile Saugspannungen, wurden analog zu den Säulenversuchen zwei Typen von Tracerversuchen durchgeführt: Versuche mit kontinuierlicher Eingabe von U und NaBr (Versuchsbezeichnung Tk) sowie Versuche mit momentaner Eingabe eines Fluoreszenztracercocktails aus U, SRB, Na und P (Versuchsbezeichnung Tm).

4.5.1 Versuchsaufbau der Tankversuche

Der die Kapillarsperre aufnehmende Versuchstank aus Glas (Länge 1,50 m, Breite 0,5 m, Tiefe 0,75 m) ist auf einem Stahlunterbau so montiert, dass Hangneigungen von bis zu 25° eingestellt werden können (Abb. 36). Bei den vorliegenden Versuchen war die Hangneigung analog zu den auf dem Testfeld der Deponie Bayreuth herrschenden Bedingungen auf 15,6° fixiert. Bohrungen in der rückwärtigen Seitenwand erlauben den Einbau verschiedener Messfühler in die Versuchskapillarsperre. Die getrennte Erfassung und Ableitung der Abflüsse aus Kapillarschicht und Kapillarbruchschicht ist durch Vorrichtungen im vorderen Bodenbereich möglich.



Abb. 36: Versuchstank – Seitenansicht

Zur Simulation der hydraulischen Belastung wird die Kapillarsperre am oberen Ende des Tanks mit Münchner Leitungswasser bewässert. Die Wasseraufgabe erfolgt kontinuierlich mit einer Schlauchpumpe in Form einer punktuellen Eingabe in der Mitte der oberen Schmalseite. Verdunstungseffekte von der Oberfläche der Kapillarsperre werden durch die Abdeckung des Tanks mit einer aufgeschraubten Plexiglasplatte minimiert. Einen schematischen Überblick über den Versuchsaufbau vermittelt Abb. 37. Die verwendeten Bauteile der gesamten Versuchsanlage sind in Anhang 7.6.1 aufgelistet.

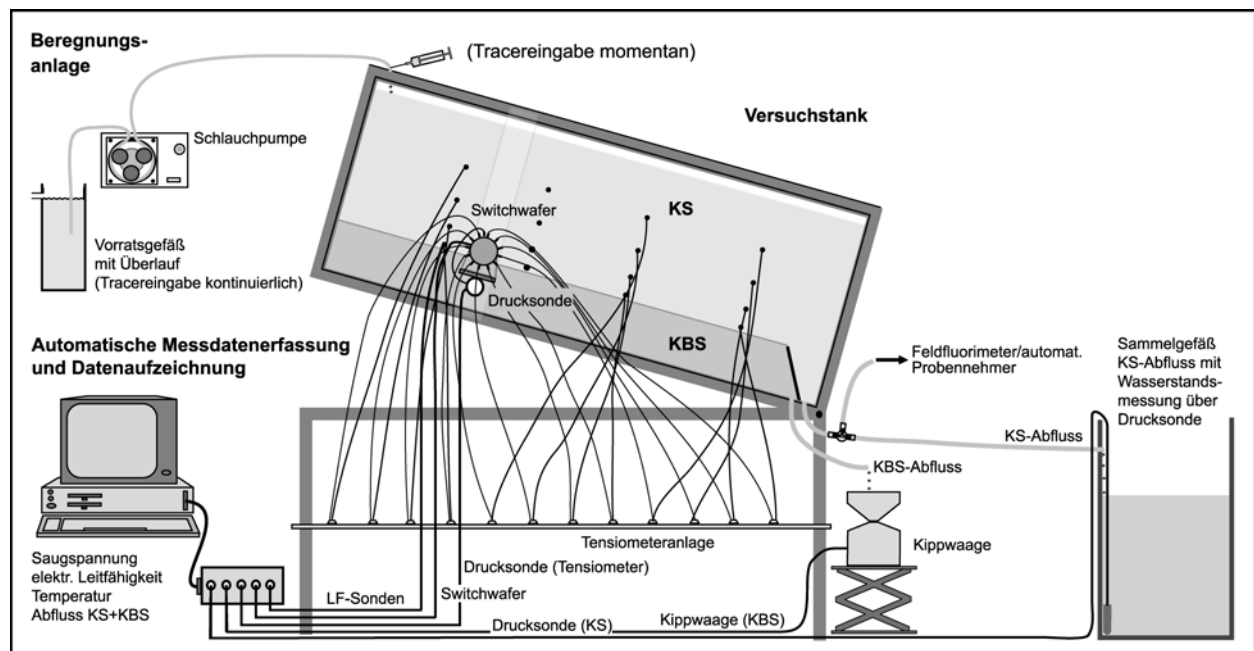


Abb. 37: Versuchsaufbau der Tankversuche

4.5.2 Messtechnik

Zur Erfassung von Wasserspannung und spez. elektrischer Leitfähigkeit sind zwölf Tensiometer und vierzehn Leitfähigkeitssonden (LF-Sonden) in die Kapillarschicht eingebaut. Da in der KBS aufgrund der groben Körnung des Materials kein ausreichender Kontakt der Messsonden mit dem Sediment gegeben ist, wird auf den Einbau von Sonden in diesem Bereich verzichtet. Um eventuell auftretende Temperatureffekte erkennen zu können, erfolgt die Messung der Temperatur im Sediment und der Raumtemperatur. Die Verteilung der Messinstrumente ist in Abb. 38 dargestellt. Die Tensiometer und LF-Sonden sind in vier Ebenen parallel zur Schichtgrenze angeordnet und bilden vier Messprofile. Je ein Tensiometer und eine LF-Sonde sind paarweise mit einem Abstand von einigen Zentimetern in der Mittelachse der Tankbreite eingebaut. Es ergibt sich somit eine zweidimensionale vertikale Beobachtungsebene.

Eine automatische Datenerfassungsanlage zeichnet die Parameter Wasserspannung, spez. elektrische Leitfähigkeit und Temperatur sowie die Abflüsse aus KS und KBS kontinuierlich auf. Ein unter LabWindows CVI in C programmiertes Messprogramm steuert über eine Relaiskarte die Messvorgänge und speichert die Messdaten.

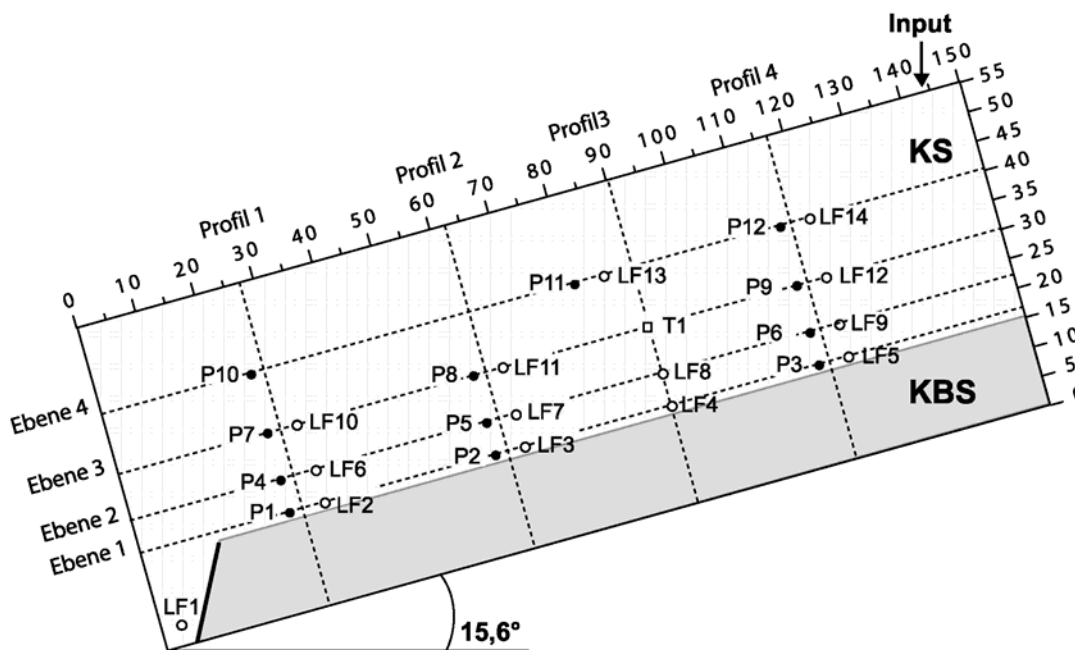


Abb. 38: Anordnung der Tensiometer (P), Leitfähigkeitssonden (LF) und der Temperatursonde (T) in der Kapillarsperre (Seitenansicht bei einer Neigung von $15,6^\circ$)

Die Tensiometeranlage besteht aus zwölf Einzeltensiometern, deren Doppelschlauchsystem (Abb. 39, Beschreibung nachfolgend) über einen Switchwafer mit einem Differenzdruckaufnehmer verbunden ist. Der Switchwafer schaltet die einzelnen Tensiometer mit der Drucksonde frei. Die Messung des Unterdrucks erfolgt mit einer kurzen Verzögerung, um eine Beeinflussung des Messergebnisses durch Druckschwankungen aufgrund des Schaltvorgangs zu verhindern. Innerhalb der Messroutine von 30 min werden die Saugspannungen an allen zwölf Tensiometern je einmal gemessen. Während des Betriebs stellte sich heraus, dass zwei Tensiometer (P4, P10) aufgrund eines im eingebauten Zustand nicht behebbaren Defekts keine korrekten Werte lieferten, so dass diese für die Auswertung der Versuche nicht zur Verfügung stehen. Die Kalibrierung der Tensiometer erfolgt über die Kalibrierung der angeschlossenen Drucksonde. Für jedes Tensiometer wird eine Höhenkorrektur entsprechend seiner Lage zu einer gemeinsamen Bezugshöhe eingeführt.

Das in Abb. 39 dargestellte Doppelschlauchsystem der Tensiometeranlage erlaubt ein unkompliziertes Entlüften der Tensiometer. In die Spitze der mit dem Außenschlauch luftundurchlässig verklebten Keramikkerze führt ein dünner Innenschlauch, der mit einer durch ein durchbohrtes Winkelstück geführten Kanüle verbunden ist. Mit einer Spritze kann bei geöffnetem Absperrventil an der Kanüle entlüftetes

Wasser über den Innenschlauch bis in die Keramikkerze gepresst werden, wo es evt. vorhandene Luftein-schlüsse verdrängt. Diese werden mit dem im Außenschlauch zurückfließenden Wasser über das Winkelstück zu einen 3-Wege-Hahn oder – um das Gesamtsystem zu entlüften - über ein Ablassventil nach dem Switchwafer abgeleitet.

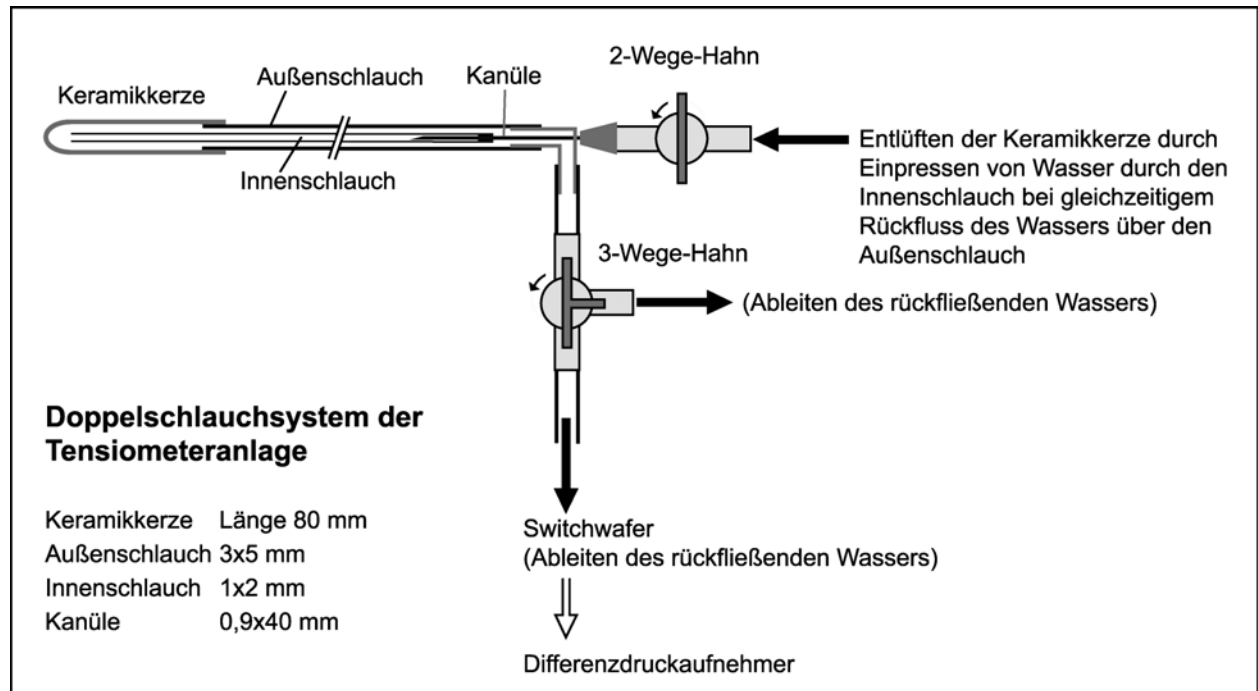


Abb. 39: Doppelschlauchsystem der Tensiometeranlage

Die elektrische Leitfähigkeit wird nach jeder Tensiometermessung mittels der vierzehn LF-Sonden (Kunststoffkörper mit zwei 10 mm langen Edelstahlelektroden) gemessen. In einer 30minütigen Messroutine werden somit für jede LF-Sonde zwölf Messwerte aufgezeichnet. Durch einen Ausfall von Sonde LF9 stehen für Tk60 und Tk80 keine Messdaten zur Verfügung. Eine Kalibrierung der LF-Sonden erfolgt zwar in freien Salzlösungen, ist jedoch hier nicht Ziel führend, da die elektrische Leitfähigkeit neben ihrer Abhängigkeit von der Salzfracht und der Temperatur unter ungesättigten Bedingungen auch vom Wassergehalt abhängig ist (MUALEM & FRIEDMAN 1991). Daher wird der Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit in der Bodenlösung anhand des LF-Signals [mV] der Sonden aufgezeichnet und ausgewertet.

Zwei PT 100-Sonden dienen zur Erfassung der Sediment- und Raumtemperatur. Da die Messung der Raumtemperatur zeitweise fehlerhaft arbeitete, wird sie bei der Auswertung nicht dargestellt. Entscheidend für die Beurteilung des Temperatureinflusses auf die Versuche ist ohnehin die Temperatur im Versuchstank.

Die quantitative Bestimmung der Abflussraten aus der Kapillarsperre erfolgt für den Zwischenabfluss (KS) kontinuierlich über halbstündliche Wasserstandsmessungen im Sammelgefäß (Volumen 200 l) mittels Drucksonde. Während der Durchführung von Tracerversuchen vom Typ Tm ist dieses Vorgehen aufgrund der regelmäßigen Entnahme von Wasserproben zur Analytik durch einen automatischen Probennehmer nicht möglich. Der KS-Abfluss wird in diesem Fall daher mindestens einmal werktäglich manuell gemessen. Im Verlauf der Versuche traten unerwartet alterungsbedingte Leckagen der Dichtungen im unteren Bereich der Stirnwand auf, die zu Tropfverlusten aus der KS führten. Diese werden gesondert aufgefangen und manuell gemessen. Der Basisabfluss (KBS) wird in eine Kippwaage geleitet, die wie auch die Drucksonde für den KS-Abfluss an die Messtechnikanlage angeschlossen ist, und ebenfalls halbstündlich aufgezeichnet.

4.5.3 Einbau der Kapillarsperre

Der Einbau der Kapillarsperrenmaterialien erfolgt lagenweise, wobei jede Lage mit einem Stempel verdichtet wird. Die Einbaudaten und die sich daraus ergebenden bodenmechanischen Kennwerte der Versuchskapillarsperre sind in Anhang 7.6.2 aufgelistet. Im Gegensatz zur Kapillarsperre des Testfeldes ist in den Tank kein Trenngeotextil eingebaut, um mögliche Wechselwirkungen mit den verwendeten Tracern auszuschließen.

4.5.4 Durchführung der Tracerversuche im Versuchstank

Es werden analog zu den Säulenversuchen zwei Typen von Tracerversuchen durchgeführt, die sich in Eingabemethode und Art der verwendeten Tracer unterscheiden. Bei den Versuchen mit kontinuierlicher Tracereingabe (Versuchsbezeichnung Tk) wird eine Tracerlösung mit U und NaBr anstelle des normalen Leitungswassers über die Beregnungsanlage eingegeben. Die Ausbreitung der Tracerlösung im Versuchstank kann durch die Leitfähigkeitserhöhung über die eingebauten LF-Sonden in zweidimensionaler Auflösung beobachtet werden. Wie schon bei den Sk-Versuchen dient Uranin als Referenztracer. Es werden insgesamt vier Versuche mit kontinuierlicher Eingabe jeweils nach Gleichgewichtseinstellung nach einer Beregnungserhöhung durchgeführt. Um die unterschiedlichen Tracereigenschaften der Fluoreszenzfarbstoffe zu untersuchen, erfolgen Tracerversuche mit momentaner Eingabe (Versuchsbezeichnung Tm), bei denen ein Fluoreszenzcocktail aus U, SRB, Na und P in Form eines Dirac-Impulses durch Injektion der Tracerlösung in den Beregnungsschlauch eingegeben werden. Die Eingabemassen und -volumina für die Tracerversuche Tk und Tm sind in Tab. 8 zusammengestellt.

Tab. 8: Eingabemassen der Tracer für die Tankversuche

Tankversuche - Tracer-Eingabemassen						
Versuchsbezeichnung	Tk		Tm			
Eingabemethode	kontinuierliche Eingabe		momentane Eingabe			
Tracer	U	NaBr	U	SRB	Na	P
Masse [mg]	0,24	80 000	0,003	1,00	0,50	0,50
Eingabevolumen [ml]	80 000		15,03			

Das GGUN-FL02-Feldfluorimeter erlaubt -angeschlossen an den Abflussschlauch der KS - wie bei den Säulenversuchen die Beobachtung des U-Durchgangs. Die Entnahme der Wasserproben für die Laboranalytik der Fluoreszenzfarbstoffe erfolgt dem Feldfluorimeter nachgeschaltet in der bei den Säulenversuchen beschriebenen Weise mit dem automatischen Probennehmer.

Die Reihenfolge der elf durchgeführten Markierungsversuche ist in Tab. 9 zusammen mit den jeweiligen Beregnungsraten aufgeführt. Außerdem ist die Zeitspanne zwischen den Tracereingaben zweier aufeinander folgender Versuche angegeben. Die tatsächliche Versuchsdauer von Tracereingabe bis zum Ende des messbaren Tracerdurchgangs entspricht nicht unbedingt dieser Zeitspanne: Die Tk-Versuche weisen aufgrund der hohen Empfindlichkeit der LF-Sonden eine extrem lange Versuchsdauer auf, wie aus den Zeitachsen der in Anhang 7.7 abgebildeten LF-Diagramme zu erkennen ist. Durch die Anordnung der Sonden im Tank können auch in den Bereichen mit sehr geringen Wassergehalten, die infolge der geringeren Wasserleitfähigkeiten erst spät von der Salzlösung erreicht werden, noch LF-Erhöhungen beobachtet werden, während U nicht mehr im Abfluss nachweisbar ist. Daher wird für eine Belastungsstufe zunächst der Tk-Versuch gestartet und nach Ende des U-Nachweises bereits die momentane Tracereingabe für den Tm-Versuch durchgeführt. Die durch die vorangegangene kontinuierliche Eingabe verursachte LF-Änderung in der Bodenlösung bleibt davon unbeeinflusst und wird parallel zum Tk-Versuch weiter aufgezeichnet. Somit findet eine zeitliche Überlappung von Tk- und Tm-Versuch während einer Beregnungsstufe statt.

Tab. 9: Reihenfolge der Tankversuche (Tk: kontinuierliche Tracereingabe, Tm: momentane Tracereingabe)

Tankversuche Tk und Tm - Abfolge				
Bezeichnung	Eingabe	Berechnungsrate [l/d]	Berechnungsrate [ml/h]	Zeitspanne [h]
Tk20	kontinuierlich	20,4	850	975
Tm20	momentan	20,4	850	965
Tk40	kontinuierlich	40,3	1680	741
Tm40	momentan	40,3	1680	748
Tk60	kontinuierlich	59,3	2470	477
Tm60	momentan	59,0	2460	965
Tk80	kontinuierlich	78,0	3250	163
Tm80	momentan	77,5	3230	1536
Tm20-2	momentan	19,9	830	1152
Tm40-2	momentan	39,8	1660	840
Tm80-2	momentan	80,2	3340	1135

4.5.5 Auswertung der Tankversuche

Die Auswertung der Tankversuche entspricht im Prinzip der in Kapitel 4.4.4 für die Säulenversuche beschriebenen Vorgehensweise. Aus der abweichenden Versuchskonzeption ergeben sich allerdings einige Unterschiede in der Bearbeitung.

Bei den Tk-Versuchen werden der U-Durchgang sowie das Messsignal der Sonde LF1 – LF5, LF 9 (nur Tk20 und Tk4), LF12 und LF14, die einen Verlauf mit sehr gut ausgeprägtem Maximum-Plateau zeigen, wie die Sk-Versuche ausgewertet. Für die anderen LF-Sonden besteht nur die Möglichkeit, den Ersteintritt des LF-Anstiegs zu betrachten.

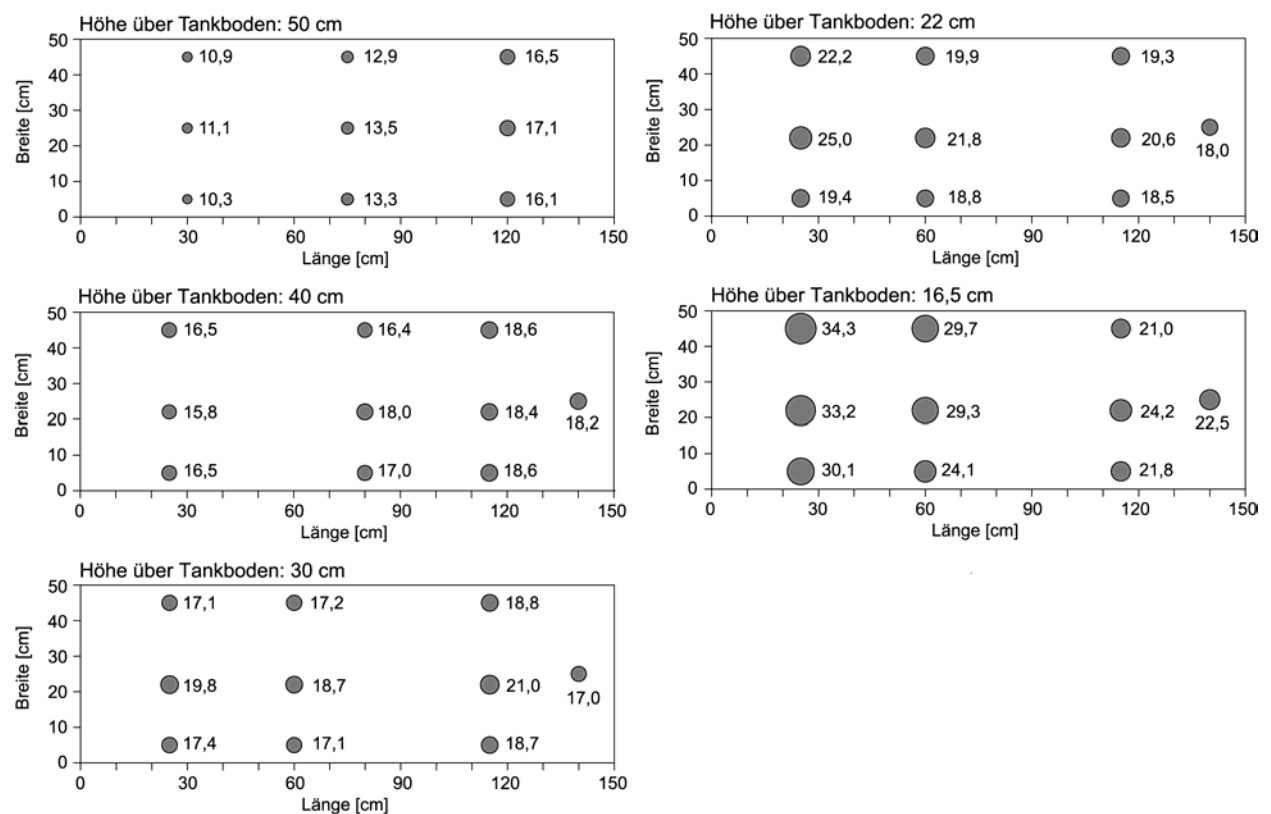


Abb. 40: Horizontierte Sättigungsverteilung in der KS beim Ausbau des Tanks (Durchmesser der Kreise und Zahlenwerte: Wassersättigung Θ [%])

Die Auswertung der Tm-Versuche erfolgt in der für die Sm-Versuche beschriebenen Weise mit dem Programm FIELD, es wird jedoch der 2D-Fall betrachtet. Durch die punktuelle Beregnung und Tracereingabe findet der Wassertransport überwiegend in der Vertikalebene statt, die in der Längsachse des Tanks liegt und in der auch die Messsonden installiert sind. Darauf weist die Sättigungsverteilung in der KS hin, die nach Versuchsende beim Tankausbau aufgenommen wurde (Abb. 40). Durch einen Pumpenausfall ca. 5 Tage vor Tankausbau nach einer mehrwöchigen Beregnungsphase mit 20 l/d befand sich die Kapillarsperre bereits in einer Entwässerungsphase, so dass die Sättigungsverteilung in abgeschwächter Form vorliegt. Dennoch ist zu erkennen, dass die Wassersättigungen in der Tankmitte jeweils höher sind als in den Randbereichen. Zusätzlich nimmt die Sättigung von der Oberkante der KS zur Schichtgrenze sowie Hang abwärts in Richtung Abfluss zu. Es ist davon auszugehen, dass die beobachteten Sättigungsunterschiede unter Versuchsbedingungen stärker ausgeprägt sind, da nach dem Beregnungsstopp zunächst die größeren Poren entwässern. Sie liefern in dem verwendeten, sandigen Material einen größeren Beitrag zum Wassergehalt als die feineren Poren.

4.5.6 Hydraulische Verhältnisse im Versuchstank

Abb. 41 zeigt die Wasserbilanzen der durchgeführten Tankversuche in der zeitlichen Abfolge der Versuche. Während Beregnungsrate und KS-Abfluss an der linken Ordinatenachse aufgetragen sind, ist der KBS-Abfluss auf der rechten Achse dargestellt. Es ist die unterschiedliche Skalierung beider Achsen zu beachten. Um die Höhe des Tropfverlustes trotz des geringen und damit grafisch kaum darzustellenden Anteils zu veranschaulichen, sind die Absolutwerte in Form von Zahlenwerten angegeben. Aufgrund des sehr geringen KBS-Abflusses können die den KS-Abfluss repräsentierenden Säulenhöhen praktisch der täglichen Belastung der Kapillarsperre durch die Beregnung gleichgesetzt werden. Die durch die Abdeckung des Tanks minimierte Verdunstung kann vernachlässigt werden.

Während der ersten drei Belastungsstufen von rund 20 l/d (T20), 40 l/d (T40) und 60 l/d (T60) steigt der Tropfverlust absolut mit zunehmender Beregnung an, sein prozentualer Anteil an der Beregnungsrate bleibt nahezu konstant bei 1,2 %-1,3 %. Der gesamte Abfluss aus dem System erfolgt über die KS, es tritt kein KBS-Abfluss auf. Erst mit Erhöhung der Beregnung auf knapp 80 l/d (T80) ist ein Auftreten von Basisabfluss in einer Höhe von knapp 0,6 l/d zu verzeichnen. Dies geht einher mit einer Verringerung des Tropfverlustes, da ein Teil des aufgegebenen Wassers über die KBS abfließt und somit die Belastung der KS verringert wird. Insgesamt beträgt der Anteil des KBS-Abflusses an der Wasseraufgabe jedoch nur rund 0,7 %, d.h. die Leistungsfähigkeit der Kapillarsperre ist gerade erreicht. Die eigentlich geplante Ausbelastung der Kapillarsperre konnte aufgrund der geschilderten Leckagen nicht durchgeführt werden, da der Versuch einer weiteren Erhöhung der Beregnungsrate lediglich zu einem extremen Anstieg des Tropfverlustes, nicht jedoch zu einer Verringerung der Saugspannungen in der KS und verstärkten Wasserdurchbrüchen in die KBS führte. Da die Bestimmung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der getesteten Materialkombination nicht Ziel dieser Arbeit ist, wurde dieser Versuch nach kurzer Zeit abgebrochen.

Eine der Maximalbelastung folgende Verringerung der Beregnungsrate auf die Ausgangsbelastung von rund 20 l/d (Tm20-2) führt zwar zu einem sehr starken Rückgang des KBS-Abflusses auf durchschnittlich 0,04 l/d (0,2 % der Zuflussrate), eine vollständige Regeneration der Kapillarsperre ist jedoch nicht gegeben. Möglicherweise stellt der beobachtete Abfluss das Auslaufen der KBS dar, zumal die Abflussrate stark schwankt. Die mit der nachfolgenden Erhöhung der Zuflussrate auf 40 l/d einhergehende weitere Erhöhung des KBS-Abflusses (0,91 l/d, entspricht 2,3 % der Zuflussrate) widerspricht jedoch dieser Einschätzung. Wahrscheinlicher ist, dass sich beim ersten Wasserdurchbruch in die KBS bevorzugte Fließwege entwickelt haben (Fingering), die stabil geblieben sind und bei der erneuten Belastung zu einem schnellen Wassertransport über die Schichtgrenze von der KS in die KBS führten. Beim abschließenden Versuch mit der Maximalbelastung von 80 l/d erhöht sich der Tropfverlust extrem und beträgt mit 3,84 l/d rund 4,8 % der Wasserzugabe. Der KBS-Abfluss erreicht mit einem mittleren Wert von 0,67 l/d (0,8 % der Eingabe) den höchsten beobachteten Wert.

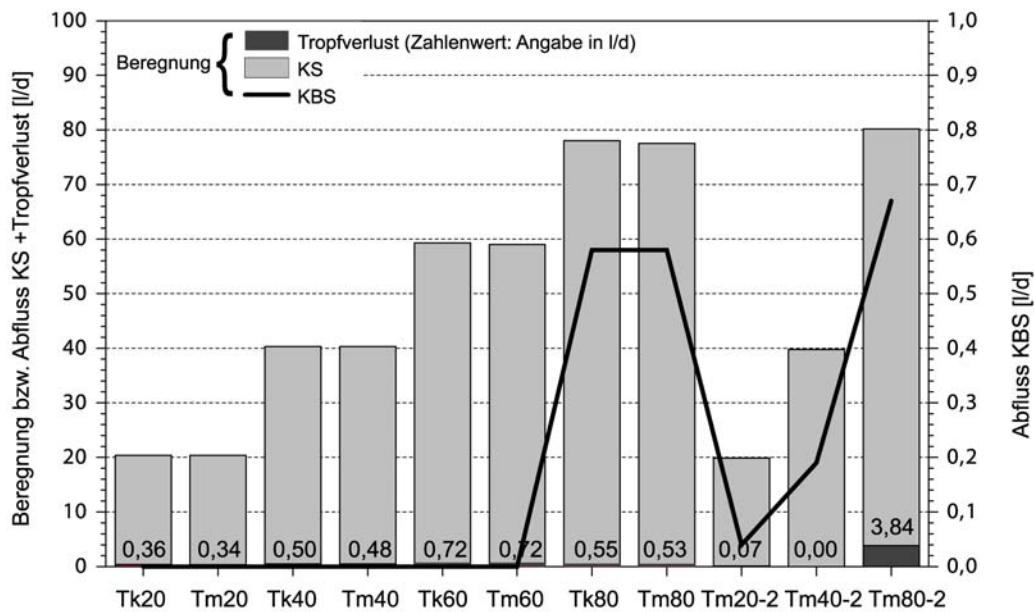


Abb. 41: Wasserbilanzen der Tankversuche (Höhe der Säulen entspricht der täglichen Beregnungsmenge)

Die Anhänge 7.7 und 7.8 enthalten die Abflussganglinien sowie die Matrixpotential- und Temperaturkurven der einzelnen Versuche in grafischer Form.

Die Tensiometerkurven zeigen in allen Versuchen einen parallelen Verlauf, wobei die Tensiometer zeitlich entsprechend ihrer Lage auf Veränderungen der Durchflussrate reagieren. Beides weist auf eine gleichmäßige Durchströmung der Kapillarschicht hin. Das Matrixpotential nimmt in den Messprofilen jeweils von oben nach unten zur Schichtgrenze hin zu. Eine hangabwärts gerichtete Zunahme des Matrixpotentials ist besonders innerhalb der Ebene 1 zu erkennen. Für die anderen Ebenen wird dieser Effekt durch den Einfluss der Wasserzugabe, der sich über das Profil 4 hin erstreckt, zu einem großen Teil überdeckt und ist nur noch für die unteren beiden Tensiometer einer jeden Ebene zu beobachten. Insgesamt liegen die Matrixpotentiale bis auf eine Ausnahme, auf die später eingegangen wird, im Bereich von -30 cmWS und 0 cmWS.

Die angestrebten stabilen Tensiometerwerte während der Versuchsdurchführungen konnten nicht immer über die gesamte Versuchsdauer gehalten werden, wie die im Anhang dargestellten Tensiometerkurven belegen. Besonders ausgeprägte Schwankungen des Matrixpotentials sind bei den Versuchen Tk60, Tk80, Tm60 und Tm80 zu beobachten, also bei Versuchen mit hohen Durchflussraten. Möglicherweise kommt es im Bereich hoher Pumpleistungen bei der verwendeten Schlauchpumpe zu Unregelmäßigkeiten im Betrieb. Bei den werktäglichen Kontrollmessungen der Pumprate konnten allerdings keine Durchflussschwankungen festgestellt werden. Bei Versuch Tm80-2 tritt das Problem nicht auf, es werden sehr gleichmäßige Tensiometerwerte aufgezeichnet.

Bei einigen Versuchen weisen die Tensiometerkurven in regelmäßigen Abständen von ca. 24 h jeweils einen schnellen Abfall der Tensiometerwerte um wenige Zentimeter Wassersäule auf. Dieser verläuft parallel zum Tagesgang der gemessenen Temperatur im Tank mit einem Anstieg der Temperatur um etwa 1 °C, der in den Morgenstunden beginnt und bis Mittag anhält, ehe die Temperatur wieder fällt. Vermutlich ist der beobachtete Effekt auf Temperatureinflüsse durch die Sonnenbestrahlung des an einem Südfenster befindlichen Tanks zurückzuführen.

Als Besonderheit ist Versuch Tk60 zu erwähnen. Über einen Zeitraum von ca. 16 h weisen die mit den Tensiometern P1 und P2 gemessenen Matrixpotentiale Werte > 0 auf, die auf Vorhandensein gesättigter Bedingungen hinweisen. Dennoch tritt – zumindest unmittelbar – kein messbarer KBS-Abfluss auf. Auffällig ist der parallele Verlauf von Tensiometerkurven und Temperatur. Generell ist die Temperatur im Versuchstank während der T60-Versuche mit einem Mittelwert von ca. 24,5°C hoch im Vergleich zu den anderen Versuchen. Allerdings ist bei Tm60 kein so extremer Anstieg des Matrixpotentials zu beobachten, obwohl die Maximaltemperatur dort nur ca. 0,5°C unter der des Tk60-Versuchs mit 26,3°C liegt.

Vergleicht man die Tensiometerwerte bei allen vier Beregnungsstufen, so zeigen bei den Tk- und Tm-Versuchen die entsprechenden Tensiometer etwa gleiches Matrixpotential. Dagegen liegen die Tensiometerwerte während der Tm-2-Versuche deutlich unter denen der beiden vorangegangenen Versuche.

4.5.7 Ergebnisse der Tankversuche mit kontinuierlicher Tracereingabe

Die Kurven des LF-Messsignals der Sonden LF1-LF14 für die vier Tankversuche mit kontinuierlicher Eingabe sind in Anhang 7.7 dargestellt. Die Rohdaten weisen sehr starke Messwertschwankungen auf, die vom Wassergehalt beeinflusst werden. Sonden im Bereich höherer Wassergehalte zeigen einen wesentlich ruhigeren Verlauf als solche, die in trockeneren Bereichen positioniert sind. Die erforderliche Glättung der Kurven erfolgt mittels Bildung des gleitenden Durchschnitts, wobei die jeweilige Periode zur Mittelwertbildung ($2X + 1$) den Erfordernissen der Kurven angepasst und im Anhang in der Legende der Diagramme angegeben ist ($\pm X$).

Abb. 42 zeigt die Einsatzzeit t_{\max} der LF-Erhöpfung nach Eingabe des Tracers für die Sonden LF1 bis LF14. Die Reihenfolge der aufgetragenen Sonden entspricht dem Ersteinsatz bei Versuch Tk20.

Die Tracerlösung erreicht zunächst die der Eingabestelle nächstgelegenen Sonden LF14, LF12, LF9 und LF5. Anschließend reagieren die direkt oberhalb der Schichtgrenze positionierten Sonden LF4-LF2, bevor die im Bereich des KS-Abflusses befindliche Sonde LF1 erreicht wird. Dieses Bild ist bei allen Versuchen mit Ausnahme von Tk80 zu erkennen: Bei der höchsten Beregnungsstufe wird die LF-Erhöpfung bei LF14 erst nach Durchgangsbeginn in LF1 beobachtet. Der Ersteinsatz in LF1 erfolgt in Tk20 etwa 7,8 h nach Tracereingabe und verringert sich für die weiteren Versuche bis auf 2,9 h bei Tk80. Für die Sonden, die in der KS weiter entfernt von der Schichtgrenze positioniert sind, steigen die Reaktionszeiten deutlich an. LF8 und LF13 weisen bereits t_{\max} -Werte zwischen 18 h und 58 h bzw. 53 h und 80 h auf. LF6 und LF7 zeigen ein von der Beregnungsrate abhängiges Verhalten. Während in Tk20 für LF7 noch eine Einsatzzeit von ca. 150 h registriert wird, reduziert sich diese mit steigender hydraulischer Belastung auf bis zu 14 h bei Tk80. LF11 zeigt in allen Versuchen den spätesten Ersteinsatz mit Werten im Bereich von 200 h bis 400 h. Bei LF10 ist bei keinem Versuch eine Änderung des LF-Signals über die Versuchsdauer zu beobachten.

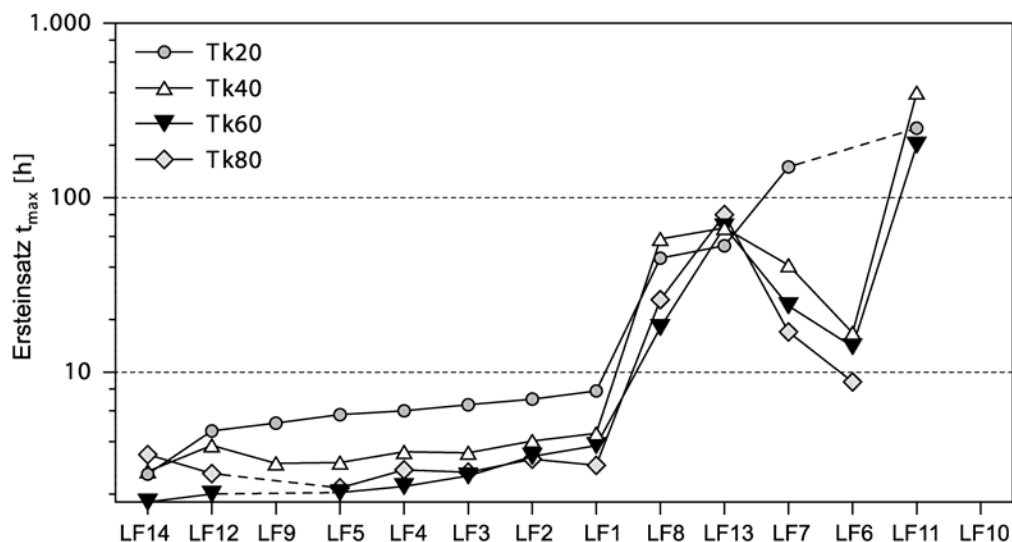


Abb. 42: Ersteinsatz der LF-Erhöpfung nach Tracereingabe für die Sonden LF1 bis LF14

Abb. 43 veranschaulicht die für die Sonden LF1-LF5, LF9, LF12 und LF14 aus den Leitfähigkeitskurven ermittelten mittleren Fließgeschwindigkeiten v_0 . Betrachtet wird dabei jeweils die Strecke zwischen der Tracereingabe (INPUT) und der LF-Sonde, wie sie in Abb. 55 angegeben sind.

Für die unterhalb der Tracereingabe gelegenen Sonden LF14, LF12, LF9 und LF5 liegt v_0 für Tk20 zwischen 5,2 cm/h und 7,6 cm/h und erhöht sich mit zunehmender Durchflussrate bis auf 10,0 cm/h bis 15,5 cm/h in Tk60. Tk80 weist für diese Sonden wieder geringere Geschwindigkeiten im Bereich von 6,0 cm/h und 14,2 cm/h auf. Nach einem Rückgang von LF5 zu LF4 ist anschließend eine ständige Zu-

nahme der Geschwindigkeit bis LF1 zu verzeichnen. Dabei zeigen Tk20 entsprechend der Durchflussrate die geringsten und Tk80 die höchsten Fließgeschwindigkeiten.

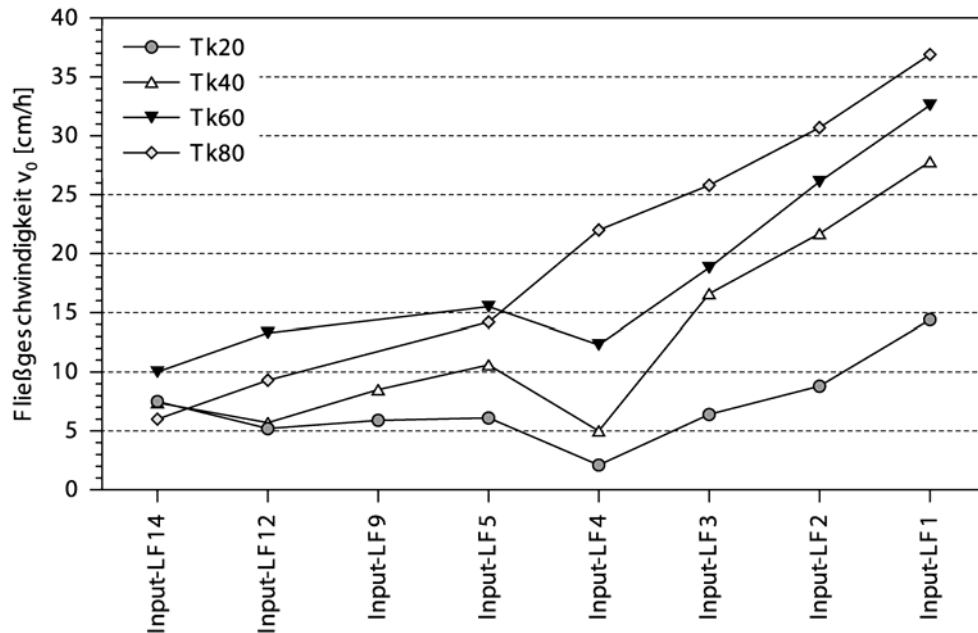


Abb. 43: Mittlere Fließgeschwindigkeit v_0 für die Sonden LF1-LF5, LF9, LF12 und LF14

In Abb. 44 ist die tatsächliche Dauer der Tracereingabe den aus dem U-Durchgang sowie der LF-Kurven der Sonden LF1 – LF5, LF9 (nur Tk20 und Tk40), LF12 und LF14 berechneten Werten gegenübergestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung: die prozentualen Abweichungen der berechneten von den tatsächlichen Werten liegen im Bereich zwischen -2,5 % und +2,2 %, der Mittelwert der Abweichung beträgt -0,24 %.

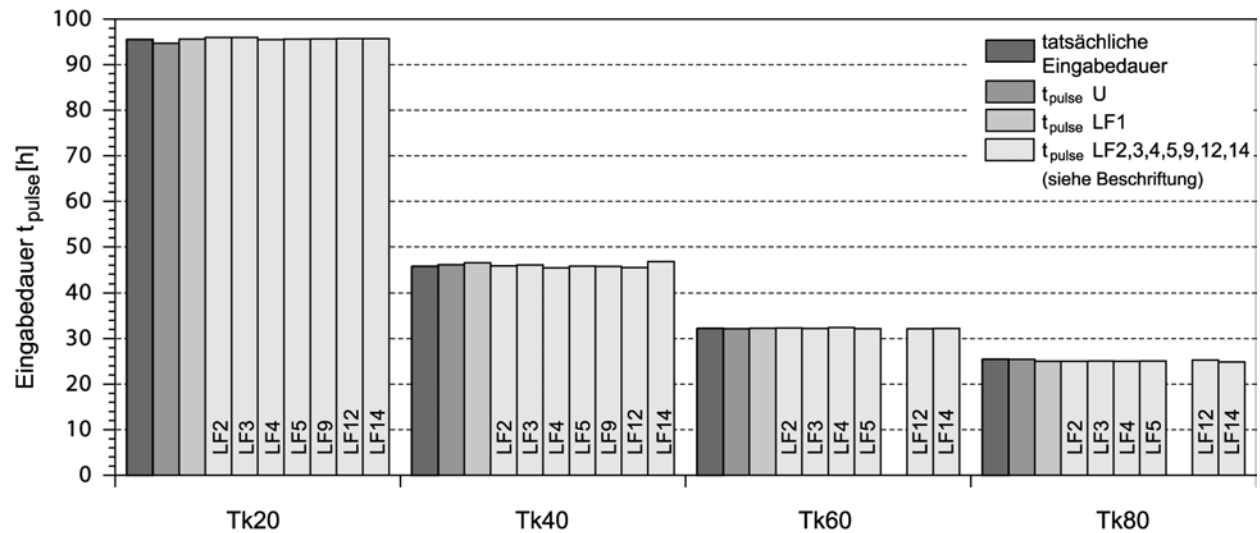


Abb. 44: Tatsächliche und berechnete Eingabedauer t_{pulse} für die Tk-Versuche

Abb. 45 enthält die Tracerdurchgangskurven von U und die LF-Kurven der Sonde LF1 für die Tk-Versuche. Sonde LF1 liegt ca. 3 cm oberhalb des Auslasses für den KS-Abfluss (Abb. 38) und kann damit am besten mit dem U-Durchgang im Abfluss verglichen werden. Wie bei den Sk-Versuchen ist für U die normierte Konzentration C/C_0 [-] aufgetragen. Für die LF-Kurven ist das Messsignal [mV] der Sonde dargestellt, eine Glättung der Kurven war nicht notwendig.

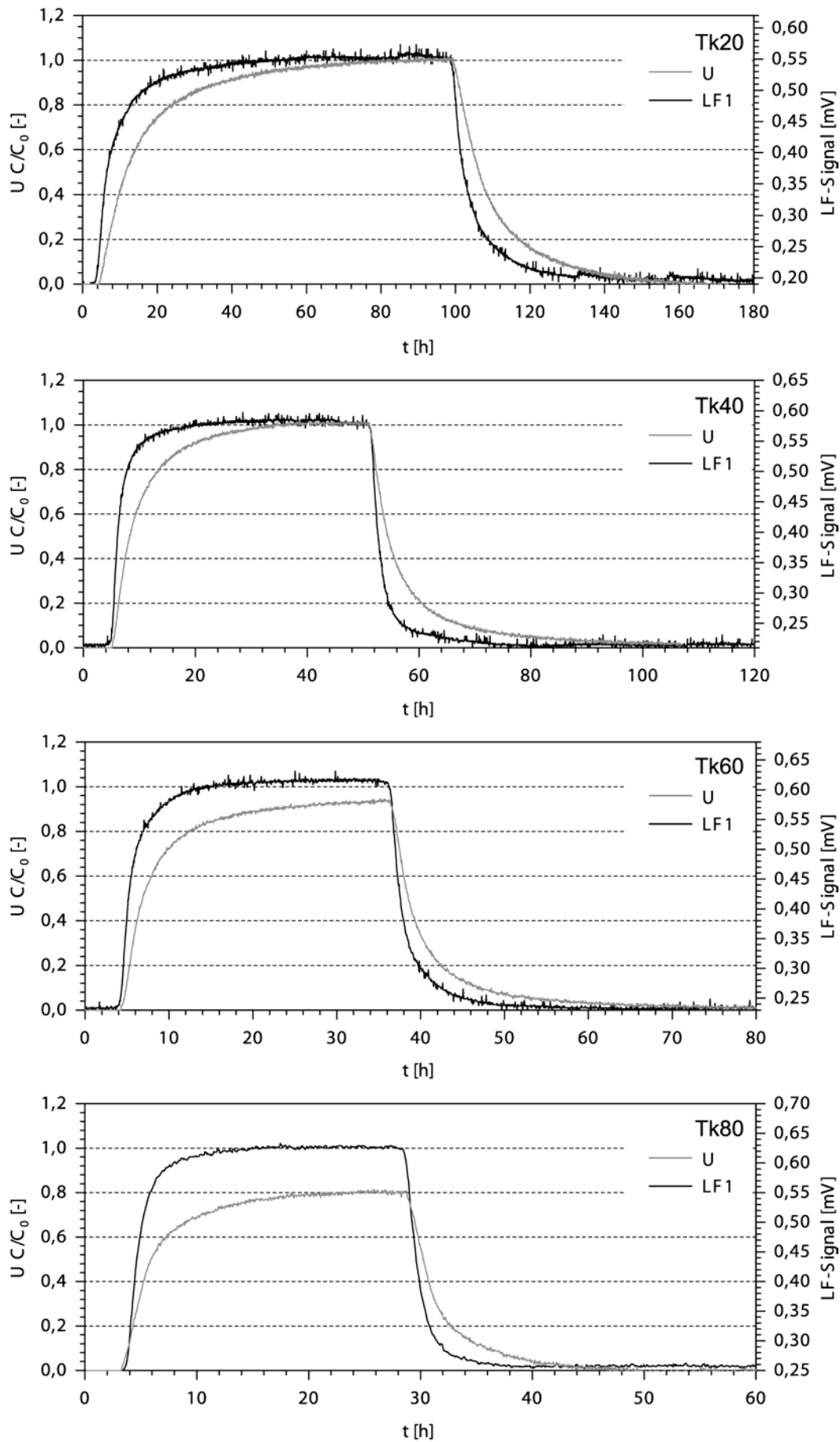


Abb. 45: Tracerdurchgangskurven der Versuche Tk20, Tk40, Tk60 und Tk80 für den Tracer U (C/C_0) und NaBr (LF)

Die Tracerdurchgangskurven von U und LF1 weichen deutlich voneinander ab: Die LF1-Kurven zeigen einen steileren Anstieg und erreichen früher das Maximum-Plateau, ebenso fallen sie wieder steiler ab bei schnellerem Erreichen des Ausgangswertes als die U-Kurven. Außerdem beträgt die normierte Konzentration C/C_0 im Bereich des Plateaus für Tk60 nur noch ca. 0,93, für Tk80 sogar nur noch etwa 0,8, während bei den beiden anderen beiden Versuchen Werte von 1,0 zu beobachten sind. Das LF1-Signal im Plateau-Bereich erhöht sich, bedingt durch den steigenden Wassergehalt im Tank, von 0,55 mV bei Tk20 bis auf 0,63 mV für Tk80.

Abb. 46 zeigt die aus den Durchgangskurven von U und LF1 ermittelten vol. Wassergehalte θ und das dazugehörige wassererfüllte Volumen V_w . Entsprechend des unterschiedlichen Verlaufs der Durchgangskurven ergeben sich auch hier deutliche Unterschiede. Zwar besteht in beiden Fällen eine lineare Zunahme des Wassergehalts bzw. des wassererfüllten Porenvolumens mit steigendem Durchfluss, jedoch liegen die für U berechneten θ -Werte zwischen 3,3 Vol.% bei Tk20 und 5,7 Vol.% bei Tk80 deutlich über denen aus LF1 (1,8 Vol.% bis 5,0 Vol.%).

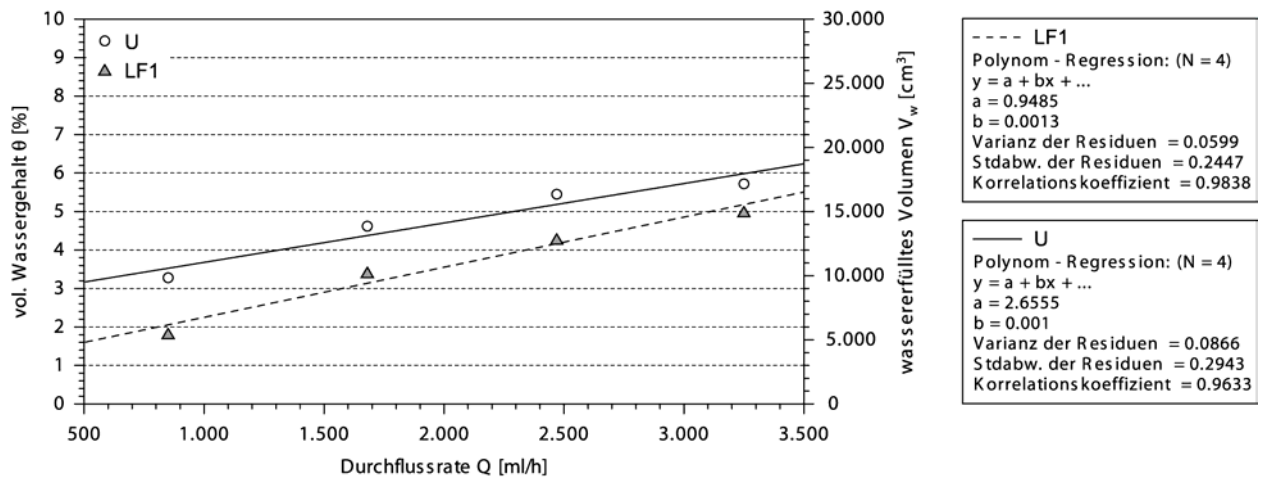


Abb. 46: Vol. Wassergehalt θ und wassererfülltes Volumen V_w in Abhängigkeit von der Durchflussrate Q für die Tk-Versuche

Die aus den U-Durchgängen und den LF1-Signalen berechneten mittleren Fließgeschwindigkeiten v_0 sind in Abb. 47 in Abhängigkeit von der Durchflussrate Q angegeben. Entsprechend der beobachteten zweidimensionalen Ausbreitung des Tracers wurde der Geschwindigkeitsberechnung eine Fließlänge von 170 cm zugrunde gelegt, die sich aus der Summe der Teilstrecken Input-LF5-LF4-LF3-LF2-LF1 (Erläuterungen dazu folgen in Kap. 4.5.9) zusammensetzt.

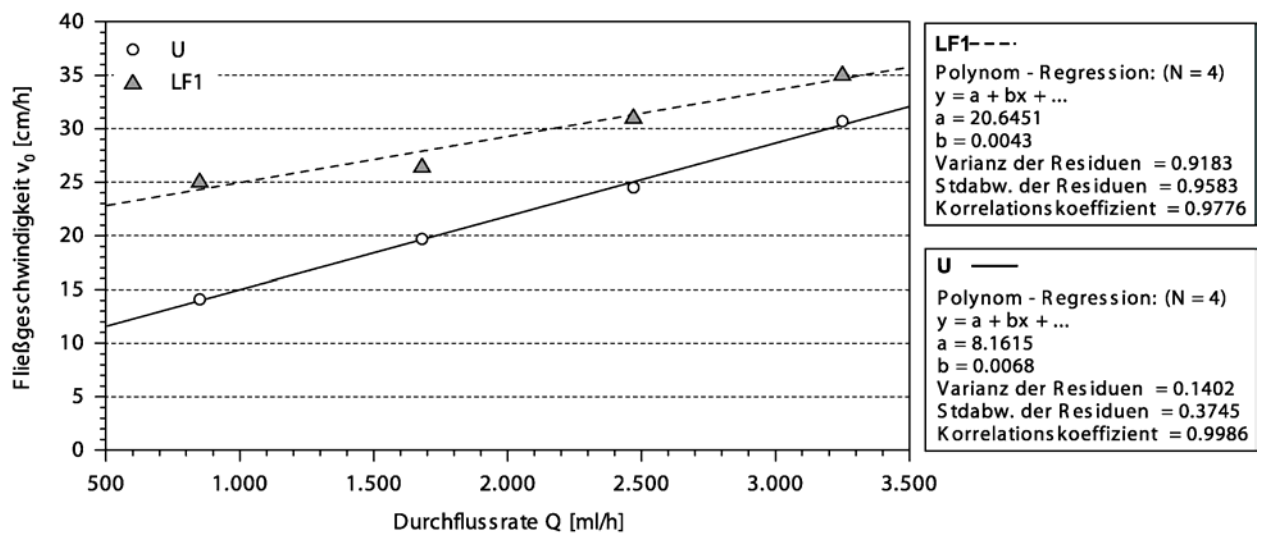


Abb. 47: Mittlere Fließgeschwindigkeiten v_0 in Abhängigkeit von der Durchflussrate Q für die Tk-Versuche

LF1 weist mit Werten zwischen 25,2 cm/h bei der niedrigsten Durchflussrate von 850 ml/h und 35,2 cm/h bei der Maximalrate von 3250 ml/h deutlich höhere Fließgeschwindigkeiten auf als U mit 14,1 cm/h bzw. 30,7 cm/h bei den entsprechenden Durchflüssen.

Die relative Rückgewinnung des Tracers U für die vier Tk-Versuche, die Abb. 48 zu entnehmen ist, liegt zwischen 0,984 und 1,006.

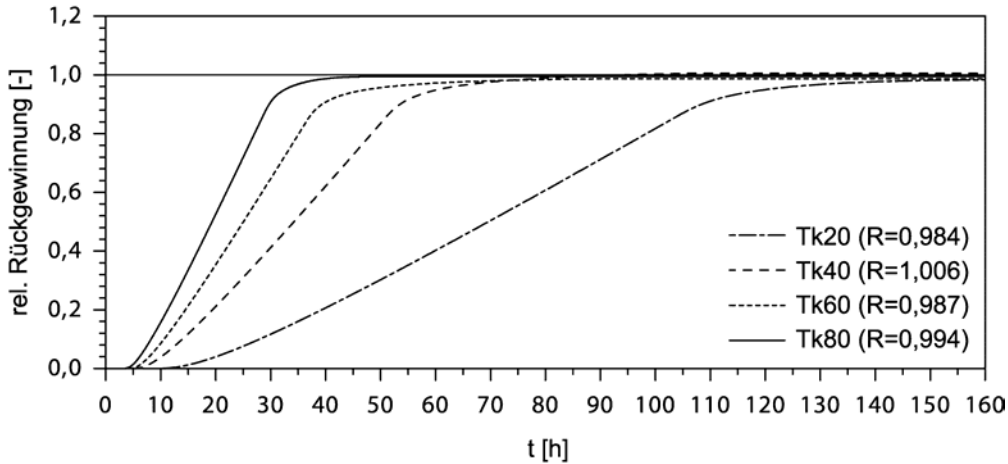


Abb. 48: Relative Rückgewinnung R von U für die Tk-Versuche

4.5.8 Ergebnisse der Tankversuche mit momentaner Tracereingabe

Die Tracerdurchgangskurven der Tm-Versuche befinden sich in Anhang 7.8. Die Darstellungsform entspricht der der Sm-Versuche (siehe Kapitel 4.4.7).

Der modellierbare Tracerdurchgang setzt sich bei den Tm-Versuchen jeweils aus sechs bis zehn Teilkurven zusammen (Abb. 49). Dabei ist kein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Teilkurven und der Bewässerungsrate zu erkennen. Auch innerhalb der einzelnen Versuche ergibt sich für die vier Tracer kein einheitliches Bild bezüglich der Aufspaltung in Teilkurven.

Bei der FIELD-Modellierung des 2D-Falls werden keine Rückgewinnungen für die Durchgangskurven ausgegeben, so dass eine Quantifizierung des Beitrags der Teilkurven zum Gesamtdurchgang nicht erfolgt. Dennoch zeigt sich bei Betrachtung der Tracerdurchgangskurven in Anhang 7.8, dass der Anteil am Gesamtdurchgang von der ersten bis zur letzten Teilkurve stark abnimmt.

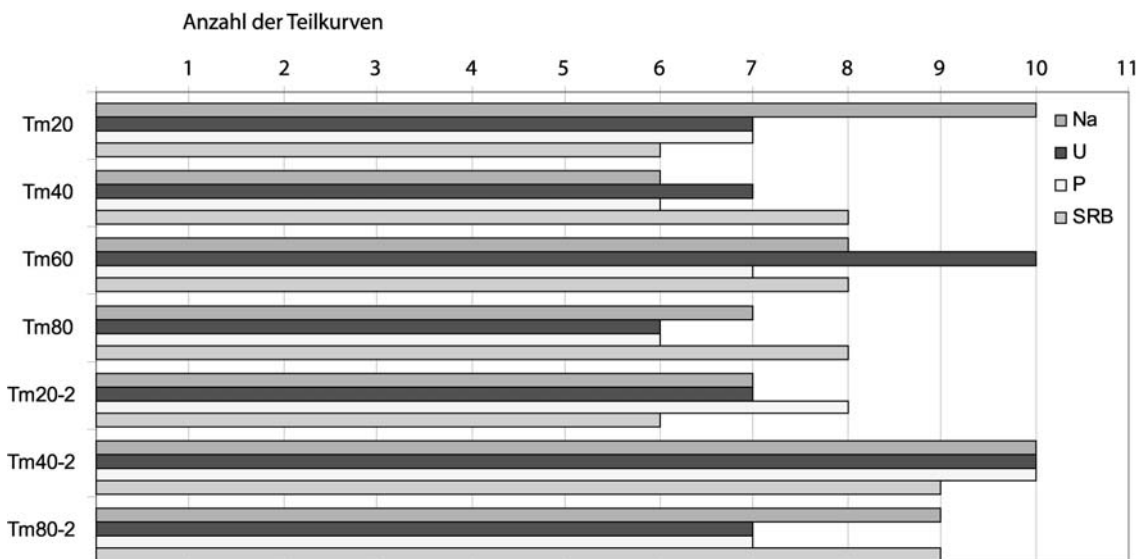


Abb. 49: Anzahl der Teilkurven bei der Modellierung des Tracerdurchgangs der Tm-Versuche mit FIELD

Die aus den Tm-Versuchen ermittelten Fließgeschwindigkeiten v_0 sind für die ersten vier Teilkurven, die den größten Anteil des Tracertransports repräsentieren, in Abb. 50 dargestellt. Es ist generell eine lineare Zunahme der Fließgeschwindigkeit mit steigender Durchflussrate zu erkennen. Von Teilkurve T1 bis Teilkurve T4 schwächt sich diese Zunahme ab, die Steigungen der Regressionsgeraden verringern sich.

Na und U zeigen besonders in den ersten beiden Teilkurven ein sehr ähnliches Verhalten und weisen mit Werten zwischen 15 cm/h und 34 cm/h (T1) die höchsten Fließgeschwindigkeiten der vier Tracer auf. Etwas geringer sind die für P ermittelten Geschwindigkeiten mit 14 cm/h bis 28 cm/h für T1. Deutlich verlangsamt ist dagegen der Transport von SRB mit Werten zwischen 3 cm/h bis 12 cm/h (T1). Für U sind zusätzlich die aus den Tk-Versuchen ermittelten Fließgeschwindigkeiten in das Diagramm eingetragen. Sie liegen zwischen denen der Teilkurven T1 und T2 aus den Tm-Versuchen.

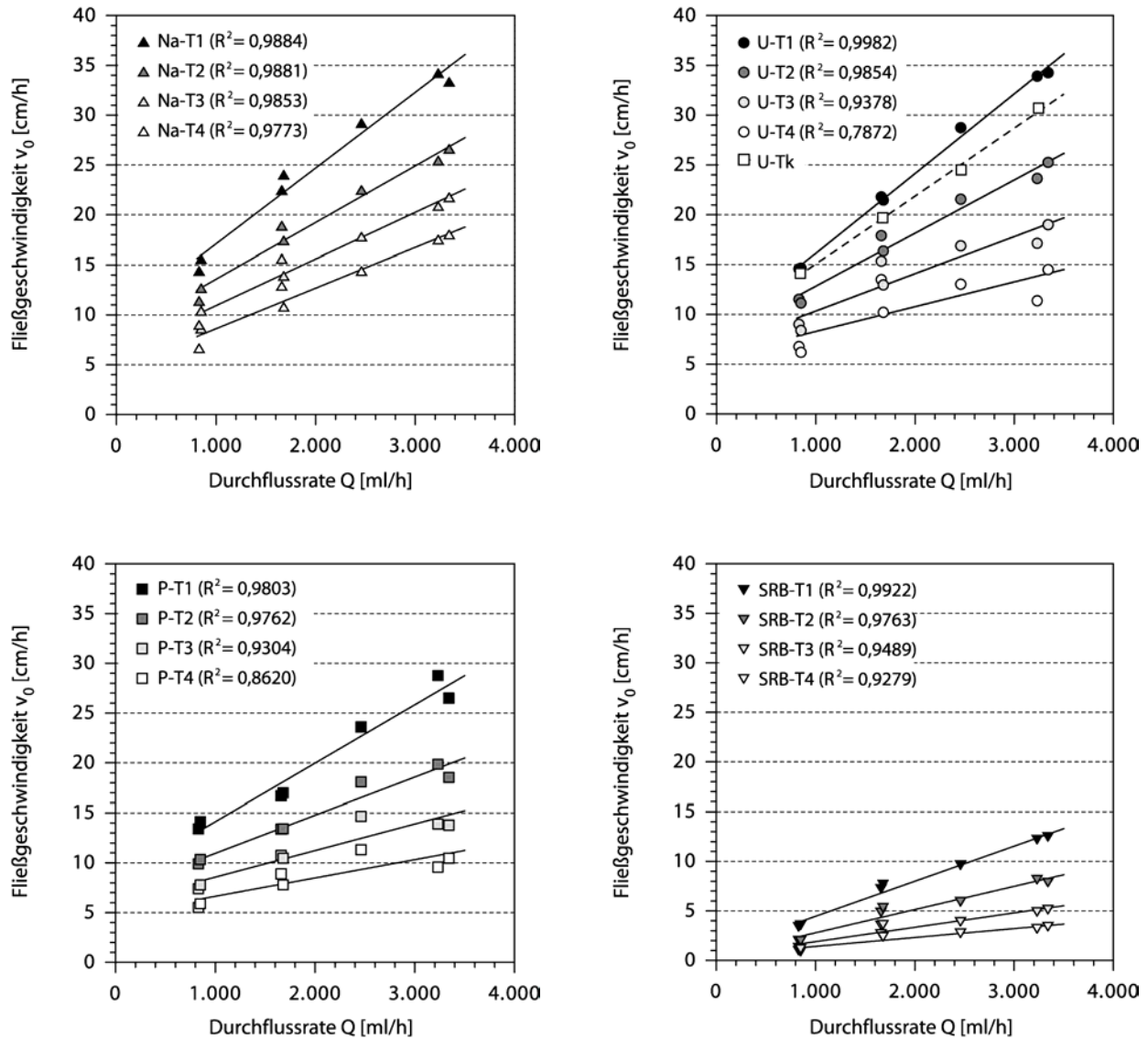


Abb. 50: Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit v_0 der Teilkurven T1-T4 von der Durchflussrate Q für die Tm-Versuche

Abb. 51 zeigt die bei der Modellierung der Tracerdurchgänge für die ersten vier Teilkurven ermittelten Dispersivitäten α_L . Für die Tracer Na, U und P liegen die Werte im Bereich von 0,2 cm bis 3,5 cm. Deutlich höher sind die Dispersivitäten für SRB mit 0,9 cm bis 8,4 cm. Insgesamt ist kein Zusammenhang mit der Fließgeschwindigkeit zu erkennen.

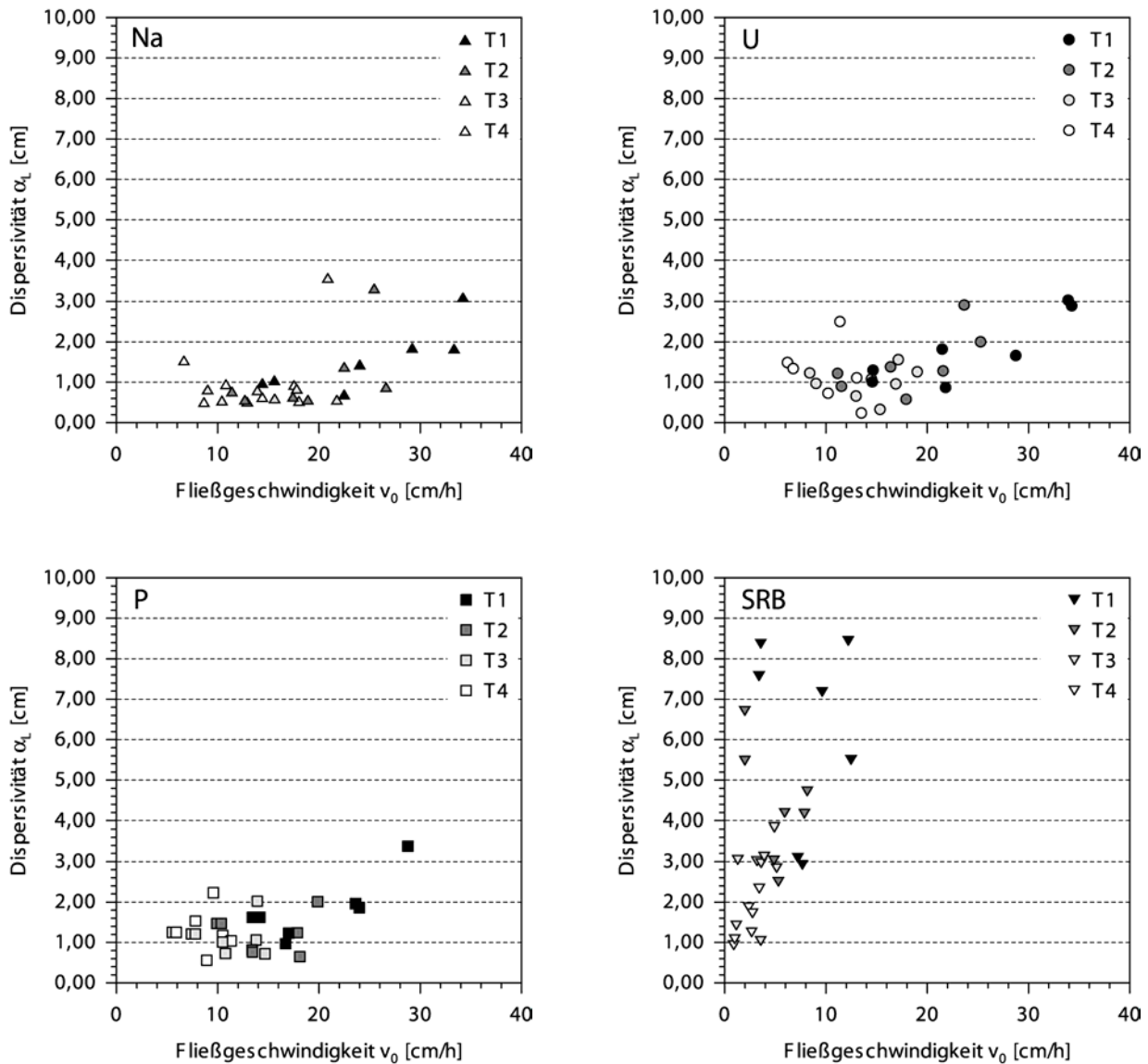


Abb. 51: Abhängigkeit der longitudinalen Dispersivität α_L der Teilkurven T1-T4 von der Fließgeschwindigkeit v_0 für die Tm-Versuche

In Abb. 52 ist ein Vergleich der Tracer Na und U dargestellt. Um eine Zuordnung der Werte zu den einzelnen Versuchen zu ermöglichen, ist die Dispersivität der Kurven T1 und T2 in Abhängigkeit von der Durchflussrate aufgetragen. Beide Tracer zeigen zwar tendenziell ähnliche Dispersivitäten bei den einzelnen Versuchen, dennoch ist die mittlere prozentuale Abweichung der U-Werten im Vergleich zu den Na-Werten mit 17,6 % für T1 und 50,9 % für T2 sehr hoch.

Die Rückgewinnung R_{fit} des modellierten Tracerdurchgangs wurde nach Gleichung 20 aus der durch die Addition der Teilkurven erhaltenen Gesamtkurve errechnet. Für den nicht von der Modellierung erfassten Kurvenbereich erfolgte die Berechnung der Restrückgewinnung R^* wie in Kapitel 4.4.4 beschrieben. In Abb. 53 sind die Rückgewinnungsraten für die Tm-Versuche dargestellt. Der Mittelwert der Rückgewinnung R liegt für Na bei 99,9 % und für U bei 99,3 %. Für den Tracer P verringert sich die mittlere Rückgewinnung auf 97,9 % und nimmt bei SRB mit 96,1 % weiter ab. Der Anteil der Restrückgewinnung R^* schwankt generell stark und erreicht Extremwerte zwischen 0,2 % und 8,0 %, die beide bei SRB zu beobachten sind.

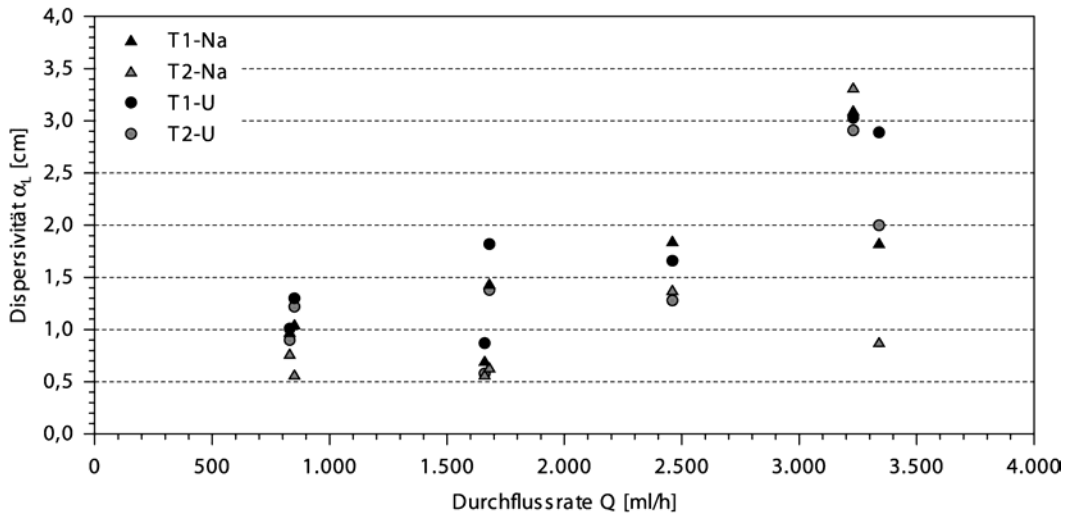


Abb. 52: Vergleich der für Na ermittelten Dispersivitäten (T1 und T2) mit denen für U in Abhängigkeit von der Durchflussrate Q

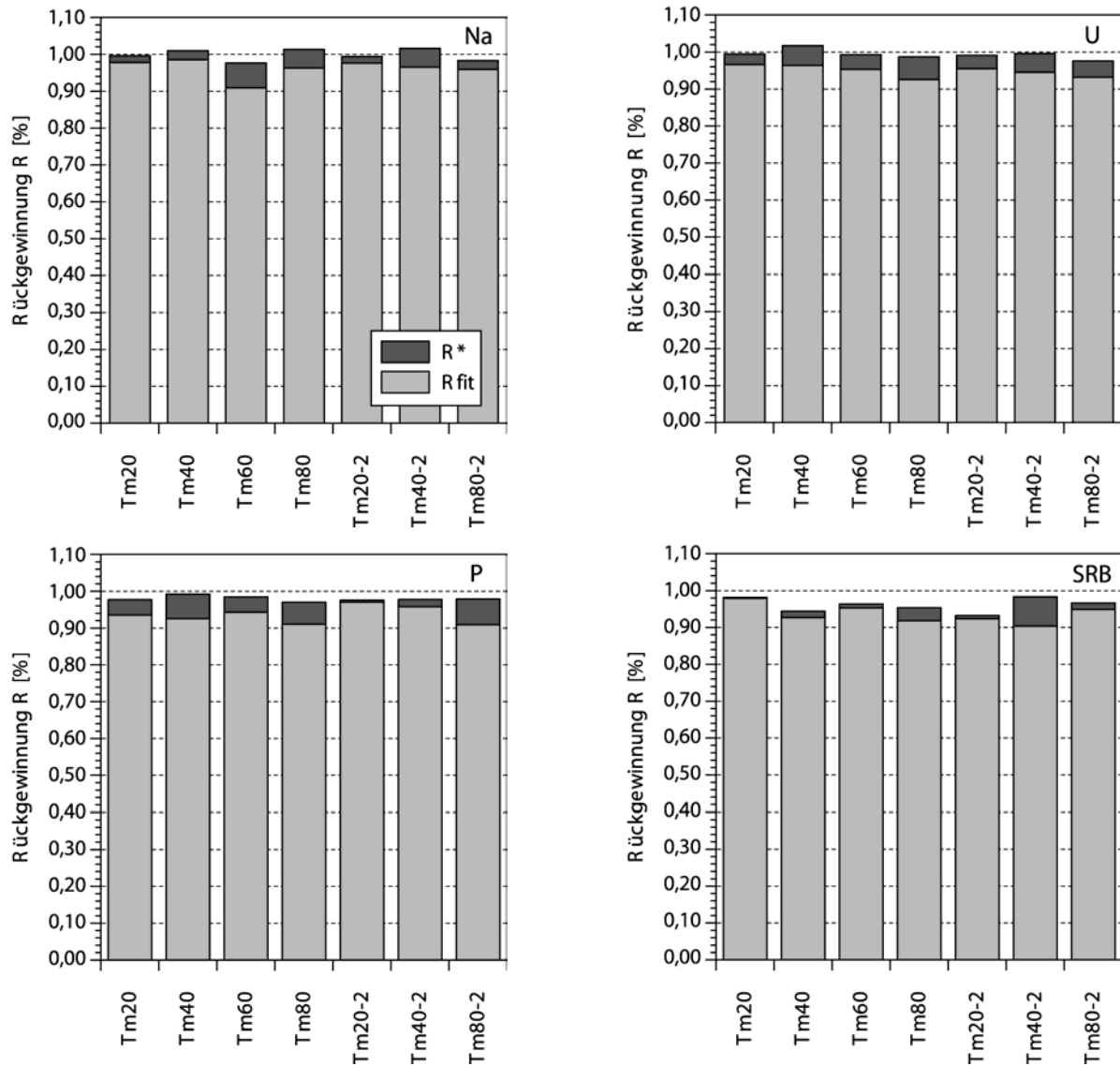


Abb. 53: Rückgewinnung der Tracer Na, U, P und SRB für die T_m -Versuche

Die Retardierung der Tracer U, P und SRB gegenüber dem als Referenz dienenden Na ist in Abb. 54 veranschaulicht. Der Berechnung der Retardationsfaktoren R_D wurde wie bei den Sm-Versuchen jeweils die Teilkurve T1 der modellierten Tracerdurchgänge zugrunde gelegt. U zeigt mit Retardationsfaktoren bis maximal 1,12 eine geringe Transportverzögerung. In den Versuchen Tm20-2 und Tm80-2 eilt der Tracer mit R_D -Werten von 0,99 bzw. 0,97 Na sogar geringfügig voraus. Die R_D -Werte von P liegen im Bereich von 1,07 bis 1,41 und deuten damit auf etwas stärkere Wechselwirkungen mit der Matrix hin. Die höchste Retardierung ist für SRB zu beobachten, das R_D -Werte von 2,67 bis 4,38 erreicht. Im Gegensatz zu den anderen beiden Tracern ist hier eine deutliche Abnahme der Transportverzögerung mit zunehmender Durchflussrate zu erkennen.

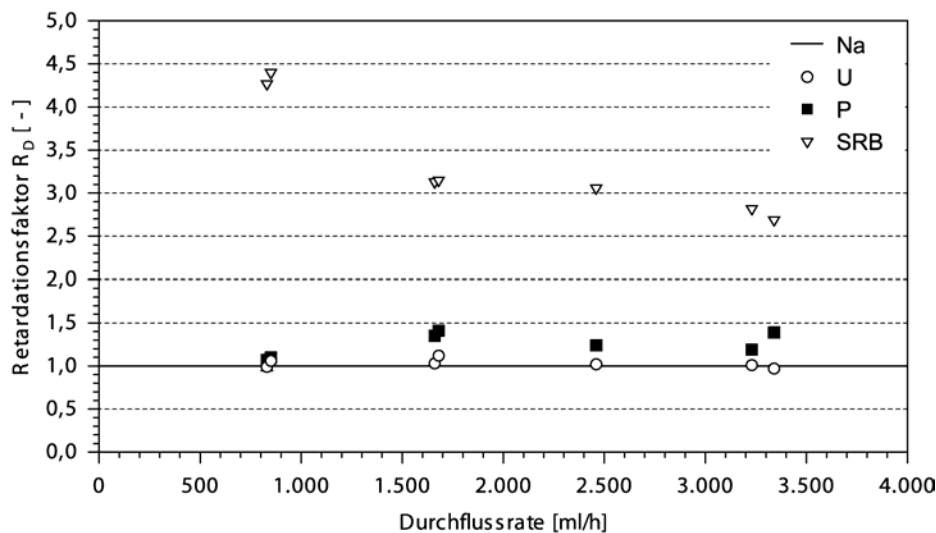


Abb. 54: Retardationsfaktoren von U, P und SRB gegenüber Na, berechnet aus den Teilkurven T1 der Tracerdurchgänge bei den Tm-Versuchen

4.5.9 Interpretation der Tankversuche

Die Tensiometerkurven der Tankversuche zeigen die kapillarsperrenspezifische Ungleichverteilung des Wassers in der Kapillarschicht. Zur Schichtgrenze hin sowie hangabwärts ist eine Zunahme des Wassergehalts zu erkennen. Grundsätzlich führt eine steigende Beregnungsrate zu einer Erhöhung des Wassergehalts im Versuchstank. Bei der Betrachtung der Messwerte ist zu berücksichtigen, dass sich die Tensiometer P12, P9 und P6 sowie die LF-Sonden LF14, LF12 und LF9 unterhalb der punktuellen Eingabestelle der Beregnung sowie der Tracerlösung befinden und daher den vertikalen Wassertransport, nicht jedoch den lateralen Wasserfluss in der KS repräsentieren.

Im Gegensatz zu den Säulenversuchen, bei denen die Fließstrecke der Säulenlänge entspricht, treten im Versuchstank aufgrund der dreidimensionalen Ausprägung des Systems verschiedene Fließwege mit unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten auf. Sie führen zu einer starken Aufspaltung des Wassertransportes, die sowohl in den Versuchen mit kontinuierlicher Eingabe als auch bei der momentanen Tracerinjektion beobachtet werden kann.

Bei den Tk-Versuchen lassen die Einsatzzeiten der Leitfähigkeitserhöhung nach Eingabe der Salzlösung einen Hauptfließweg in der KS erkennen, der sich innerhalb eines nur wenige Zentimeter mächtigen Bereichs direkt oberhalb der Schichtgrenze befindet. Er wird durch die LF-Sonden der Ebene 1 (LF2-LF5) und LF1 erfasst, die in den vier Belastungsstufen jeweils die geringsten Fließzeiten hinsichtlich des lateralen Transports zeigen. Das Matrixpotential erreicht in diesem Bereich seine höchsten Werte, die bei Tk20 zwischen -10 cmWS und -15 cmWS liegen und sich bis Tk80 auf ca. -5 cmWS bis -8 cmWS erhöhen. Nach der Retentionsbeziehung (Abb. 12) liegen damit nahezu gesättigte Bedingungen vor, der k_u -Wert entspricht praktisch der gesättigten Durchlässigkeit und nimmt demzufolge seinen Maximalwert an (Abb. 13). Bereits die in Ebene 2 eingebauten LF-Sonden LF6-LF8 zeigen, abhängig von der Durchflussrate und der Position der Sonde, um das 8- bis 20fache gegenüber den Sonden in Ebene 1 erhöhte Fließzeiten. Die Verlangsamung des Transportes wird durch den verringerten Wassergehalt verursacht. Bei den

noch höher über der Schichtgrenze gelegenen Sonden LF13, LF11 und LF10 verlängert sich die Reaktionszeit extrem, bzw. ist überhaupt keine Änderung des Messsignals zu beobachten (LF10).

Generell führt eine Erhöhung der Durchflussrate aufgrund der Erhöhung der Wassergehalte zu einer Verkürzung der Reaktionszeit und damit zu einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit. Besonders im Bereich von ca. 10-15 cm oberhalb der Schichtgrenze führen Veränderungen der Belastung zu Änderungen der Fließverhältnisse in der Kapillarschicht. Das verdeutlichen die Sonden LF7 und LF6. Während LF7 in Tk20 erst nach rund 150 h von der Salzlösung erreicht wird (für LF6 liegt kein Wert vor, da die Messkurve von einem Peak aus einem vorangegangenen Vorversuch überlagert wird), erfasst die Erhöhung des Kapillarsaums bei den nachfolgenden Versuchen beide Sonden und verursacht eine Verringerung des Ersteinsatzes auf bis zu 17 h (LF7) bzw. 9 h (LF6) bei Tk80. LF13 stellt eine Besonderheit dar, es ist die einzige Sonde, deren Einsatzzeit nicht sehr stark von der Durchflussrate beeinflusst zu sein scheint. Es werden t_{\max} -Werte zwischen 53 h und 80 h ermittelt, die angesichts der Lage der Sonde wesentlich geringer als erwartet sind. Insgesamt kann man jedoch aus der guten Übereinstimmung der in Abb. 44 dargestellten tatsächlichen und aus dem Tracerdurchgang berechneten Traceraufgabezeiten t_{pulse} schließen, dass die kontinuierliche Tracereingabe zu einer geeigneten Markierung des Wassertransports im Versuchstank führt.

In Abb. 55 sind die unter Berücksichtigung der während der Versuche bestehenden hydraulischen Potentialgradienten im Tank möglichen Fließwege veranschaulicht. Während die Fließwege zu den LF-Sonden in Profil 1 sowie in Ebene 1 aufgrund der Reaktion auf die Salzlösung als gesichert angesehen wird, können die Verbindungen zwischen den anderen Sonden nur vermutet werden. Die Zahlenwerte geben die Länge der Fließstrecke zwischen den verschiedenen Sonden an, die der Berechnung der maximalen Fließgeschwindigkeiten zugrunde gelegt wurden (Abb. 43).

Insgesamt deckt sich das Bild mit dem aus Tensiometermessungen abgeleitete Fließverhalten, das beispielsweise KÄMPF (2000) beschreibt. Auch die von WOHLNICH (1991) beobachtete Entwicklung der Feuchtefront bei der Erstbewässerung einer Kapillarsperre verläuft ähnlich der hier beobachteten Tracerausbreitung.

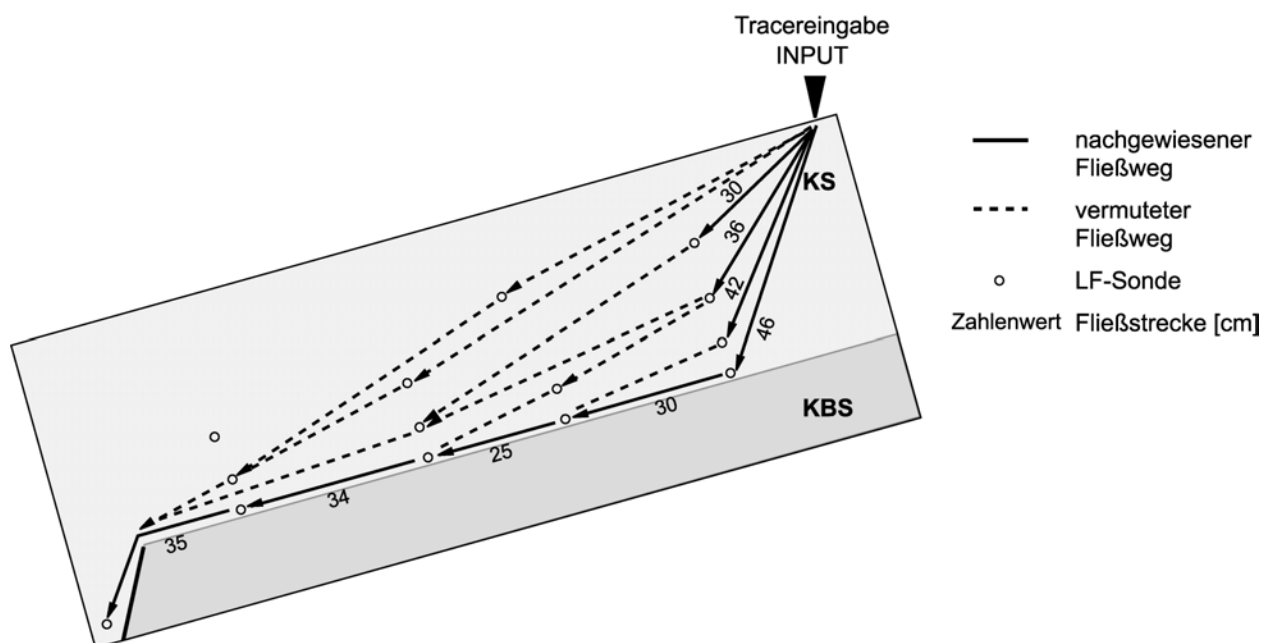


Abb. 55: Fließwege im Versuchstank

Die verschiedenen Fließwege im Versuchstank führen bei den Versuchen mit momentaner Tracereingabe zu einer ausgeprägten Auftrennung des Tracerdurchgangs in bis zu zehn verschiedene, sich überlagernde Teilkurven. Die Betrachtung der Gesamtkurve mit den zusätzlich eingezeichneten Teilkurven zeigt, dass

der überwiegende Anteil des Tracertransports in den ersten beiden Teilkurven erfolgt. Sie sind damit dem Hauptfließweg entlang der Schichtgrenze zuzuordnen.

Die Rückgewinnung des nicht reaktiven Na sowie des gering sorptiven U ist praktisch vollständig. Dagegen werden von P durchschnittlich etwa 2 % und von SRB ca. 4 % nicht wiedererhalten. Der Grund dafür ist vermutlich im ausgeprägten Tailing zu sehen, das beide Tracer, besonders stark jedoch SRB zeigen. Es ist davon auszugehen, dass dieses nach Unterschreiten der Nachweisgrenze noch relativ lang andauert und somit eine nicht zu vernachlässigende Tracermenge durch die Analytik nicht erfasst wird. Insgesamt sind die Tracerverluste so gering, dass von einer reversiblen Sorption der Tracer ausgegangen werden kann.

Die Retardierung der Tracer stimmt mit den Ergebnissen der Batch-Versuche überein. U zeigt gegenüber dem Referenzstoff Na eine nur geringe Transportverzögerung entsprechend seiner geringen Sorptivität. Demgegenüber stehen die sorptiven Tracer P und SRB. SRB zeigt die stärkste Retardierung der vier Tracer, wobei eine Abhängigkeit von der Beregnungsrate zu erkennen ist. Bei einer geringen Belastung der Kapillarsperre ist der Anteil an Bereichen mit geringer Wassersättigung im Tank, in denen ein langsamer Wassertransport stattfindet, relativ hoch. Dadurch steht eine längere Reaktionszeit für sorptive Vorgänge zur Verfügung, die zu einer verstärkten Festlegung von SRB führt. Entsprechend verringert sich die Retardierung des Tracers bei höheren Wassergehalten. Für P ergeben sich etwas höhere Retardationsfaktoren als für U, für die keine Abhängigkeit von der Wassersättigung im Tank zu beobachten ist.

Ein Vergleich der Tracerdurchgänge der Tk- und Tm-Versuche zeigt, dass sich die Markierung des Wasserflusses bei beiden Versuchstypen grundlegend unterscheidet. Besonders deutlich wird das bei der Betrachtung des Anstiegs der Durchgangskurven. In Abb. 56 ist dies beispielhaft für die Versuche Tk60 und Tm60 dargestellt. Bei den Tm-Versuchen tritt ein sehr steiler Anstieg bis zum Erreichen der Maximalkonzentration auf. Dagegen ist bei den Tk-Versuchen bereits nach kurzer Zeit eine Verlangsamung des Anstiegs der Messwerte zu erkennen, die dann erst allmählich ihr Maximum erreichen. Die Ursache dieses Verhaltens ist in der Art der Tracerzugabe zu sehen. Bei der momentanen Eingabe mit der kurzen, punktuell ausgeführten Pulseingabe einer sehr kleinen Tracermasse wird nur ein kleines Volumen der Bodenlösung im Hauptstrom des Wasserflusses markiert. Dieses verlagert sich aufgrund der erhöhten Wassergehalte im Bereich der Längsachse des Tanks relativ schnell, ohne dass es zu einer ausgeprägten transversalen Dispersion der Tracerwolke kommt. Daraus ergibt sich der beobachtete schnelle Anstieg der Tracerkonzentration im KS-Abfluss. Dagegen breitet sich die kontinuierlich über einen längeren Zeitraum eingegebene Tracerlösung in vergleichbarer Weise wie das zuvor aufgegebene Beregnungswasser aus und verdrängt es. Dabei werden nach und nach auch die randlichen Bereiche des Versuchstanks mit ihren geringeren Wassergehalten erfasst. Insgesamt führt der Abstrom der Tracerlösung entsprechend der ungesättigten Durchlässigkeitsverteilung zu einer Aufweitung der Durchgangskurve.

Durch die unterschiedliche Markierung des Wassers werden somit verschiedene Aspekte des Wasserflusses im Versuchstank erfasst. Bei der momentanen Tracereingabe wird der maximale Wasserfluss bestimmt, während die Versuche mit kontinuierlicher Eingabe das Gesamtgeschehen nachvollziehen. Allerdings sind die Tk-Ergebnisse für U und LF1 ebenfalls differenziert zu betrachten.

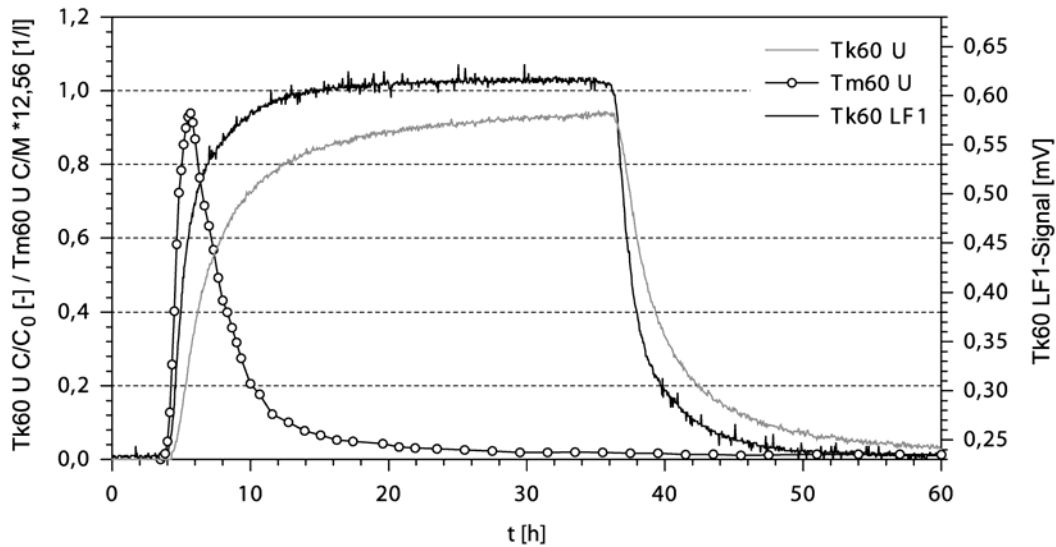


Abb. 56: Vergleich der Tracerdurchgänge der Tk- und Tm-Versuche am Beispiel von Tk60 und Tm60

Abb. 56 zeigt die bereits bei der Vorstellung der Tk-Ergebnisse beschriebenen Unterschiede im Verlauf des U-Durchgangs im Vergleich zur LF1-Kurve mit deren steilerem Anstieg und Abfallen vor bzw. nach dem Maximum-Plateau. Sie lassen sich auf die unterschiedliche Position der Messung zurückführen. Die LF1-Sonde befindet sich wenige Zentimeter oberhalb des KS-Abflusses in der Längsachse des Versuchstanks und liegt damit mitten im Hauptstrom des Tracertransports. Dagegen wird die U-Konzentration erst im KS-Abfluss gemessen. Das führt zu einer Verdünnung der Tracerkonzentration durch die Vermischung von noch nicht vollständig durch die Tracerlösung erfassten Wasservolumina aus den Randbereichen des Tanks mit dem markierten Wasser. Bei Tk20 und Tk40 reicht das Volumen der Eingabelösung von 80 l in Kombination mit der geringen Beregnungsrate nahezu aus, um innerhalb der Aufgabedauer das gesamte Wasservolumen V_w im Porenraum zu ersetzen. Das belegt das C/C_0 -Verhältnis im Plateau von etwa 1,0, d.h. die Tracerkonzentration C im Abfluss entspricht der Eingabekonzentration C_0 . Bei Tk60 und stärker noch bei Tk80 verbleibt durch die schnelle Aufgabe der Tracerlösung und des größeren wassererfüllten Anteils am Porenraum auch nach der Eingabephase eine Restmenge an nichtmarkiertem Wasser im Tank. Das führt zu einer Verdünnung der am Abfluss gemessenen U-Konzentration C , die eine Verringerung der normierten Konzentrationen C/C_0 im Plateau-Bereich bei diesen Versuchen zur Folge hat. Die geringe Veränderung des LF-Werts im Bereich des Plateaus bei den verschiedenen Versuchen ist dagegen vermutlich auf Veränderungen des Wassergehalts im Bereich der LF-Sonde zurückzuführen.

Die Unterschiede der Fließgeschwindigkeiten sowie bei der Berechnung der Wassergehalte und wassererfüllten Volumina für LF1 und U resultieren aus den beschriebenen Unterschieden bei der Messung der Durchgangskurven. Auch das Auftreten geringerer Fließgeschwindigkeiten bei den Tk-Versuchen im Vergleich zu den Tm-Versuchen ist darauf zurückzuführen. Aufgrund der versuchstechnisch bedingten Verfälschung der U-Konzentrationen repräsentieren die aus den LF1-Daten gewonnenen Werte dabei die Verhältnisse im Versuchstank besser als U.

5 Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

Kapillarsperren stellen eine Alternative zur Regelabdichtung für Deponieoberflächen dar. Sie sind aufgebaut aus einer feinkörnigen Kapillarschicht (KS), die von einer gröberen Kapillarbruchschicht (KBS) unterlagert wird. Der Texturunterschied an der Schichtgrenze unterbindet unter ungesättigten Bedingungen den Wasserübertritt von der KS in die KBS, solange die laterale Dränkapazität der KS nicht überschritten wird. Bei einer Überlastung kommt es zu einem Wasserdurchbruch in die KBS, nach Rückgang der Belastung regeneriert sich das System wieder.

Zur Untersuchung des ungesättigten Wassertransports in Kapillarsperren wurden Markierungsversuche mit den Fluoreszenzfarbstoffen Na-Naphthionat (Na), Uranin (U), Pyranin (P) und Sulforhodamin B (SRB) sowie NaBr als Salztracer in einem Versuchstank durchgeführt. Ergänzende Batch- und Säulenversuche dienten zur Bestimmung des Sorptions- und Transportverhaltens der eingesetzten Tracer.

Die Durchführung der Tank- und Säulenversuche erfolgt in ähnlicher Weise. Es wurden jeweils Markierungsversuche mit momentaner Tracereingabe eines Cocktails aus den vier Fluoreszenzfarbstoffen sowie Versuche mit kontinuierlicher Eingabe einer Lösung mit U und NaBr in der KS durchgeführt. Der Einsatz des Salztracers ermöglichte in den Tankversuchen eine zweidimensionale Beobachtung der Tracerausbreitung mit Hilfe von im Sediment eingebauten Leitfähigkeitssonden. Durch die entsprechenden Säulenversuche sollte die Vergleichbarkeit der Tracer NaBr und U getestet werden.

Als Versuchsmaterial standen Originalmaterialien der Kapillarsperren auf dem Testfelds der Deponie Bayreuth (BARTH 2004) zur Verfügung, die bodenmechanisch und -physikalisch untersucht wurden. Sie erfüllen die Anforderungen an Kapillarsperrenmaterialien nach GARTUNG & NEFF (2000) und BAUER (2001).

Die Ergebnisse der Batch-Versuche, die als Schüttelversuche mit den Fluoreszenzfarbstoffen durchgeführt wurden, zeigen große Unterschiede im Sorptionsverhalten der Tracer. Na verhält sich gegenüber dem Testmaterial (KS_v-Material) reaktionsinert. Es konnte keine Wechselwirkung mit dem Feststoff festgestellt werden. Dagegen wurden für U K_d -Werte zwischen 0,004 cm³/g und knapp 0,08 cm³/g ermittelt, die eine geringe Sorptionsneigung des oftmals als ideal bezeichneten Tracers belegen. Eine deutlich stärkere Sorptivität ist für P festzustellen. Die K_d -Werte liegen zwischen 0,12 cm³/g und 1,18 cm³/g. Damit weicht das hier beobachtete von dem in der Literatur als reaktionsinert beschriebene Verhalten von P ab (z.B. SMART & LAIDLAW 1977, KLOTZ 1982, REICHERT 1991). SRB weist mit K_d -Werten von 0,83 cm³/g bis 2,92 cm³/g die stärkste Sorptionsneigung der vier Tracer auf.

Insgesamt sind die in den Batch-Versuchen ermittelten Verteilungskoeffizienten gering, was auf fehlende Anteile von Tonmineralen oder organischem Material im Testmaterial zurückzuführen ist. Aufgrund der Versuchsergebnisse stellt Na für das untersuchte KS_v-Material einen quasi-idealen Tracer dar und wird daher als Referenz bei der Ermittlung der Retardationsfaktoren in den Säulenversuchen verwendet.

Das Retardationsverhalten der Fluoreszenztracer wurde in Säulenversuchen mit momentaner Eingabe (Sm) des Fluoreszenzcocktails aus Na, U, P und SRB untersucht. Die Versuchssäulen mit einer Länge von 0,50 m und einem Innendurchmesser von 0,10 m wurden unter ungesättigten Versuchsbedingungen bei freiem Auslauf betrieben, die Durchflussraten lagen zwischen 2 l/d und 80 l/d. Die ermittelten Retardationsfaktoren bestätigen die Ergebnisse der Batch-Versuche. U zeigt die geringste Retardierung, seine R_D -Werte liegen zwischen 1,00 und 1,15. Dagegen weisen die reaktiven Tracer P und SRB deutliche Transportverzögerungen gegenüber Na auf. Für P wurden R_D -Werte zwischen 1,2 und 1,6 ermittelt, SRB erreichte R_D -Werte zwischen 1,6 und 2,3. Dabei ist für beide Tracer eine Zunahme der Retardation mit sinkender Durchflussrate zu erkennen. Die Rückgewinnung der Tracer lag um 100%, eine irreversible Festlegung oder auch eine reversible Sorption mit sehr langsam ablaufender Desorption ist damit praktisch ausgeschlossen.

Die erhaltenen Tracerdurchgangskurven der Sm-Versuche weisen einen untypischen Verlauf auf: nach einem steilen Anstieg bis zur Maximalkonzentration folgt ein zu flaches Abfallen der Konzentrationswerte. Die Auswertung der Versuche mit dem Programm FIELD (Version 5, MALOSZEWSKI 2000) ergab, dass sich der gemessene Tracerdurchgang aus mehreren, sich überlappenden Teilkurven zusammensetzt. Dabei ist die Anzahl der abtrennbaren Teilkurven abhängig von der Durchflussrate. Bei kleinen Durchflüssen können fünf bis sechs Teilkurven unterschieden werden, mit der Erhöhung des Durchflusses redu-

ziert sich die Zahl auf drei bis vier. Außerdem nimmt der Anteil der Teilkurven am Gesamtdurchgang von der ersten zur letzten Kurve stark ab. Randumläufigkeiten oder präferentielle Fließwege aufgrund von Materialheterogenitäten sowie die Beeinflussung des Tracertransports durch den Eingabevorgang selbst konnten aufgrund des Kurvenverlaufs als Ursache für dieses Verhalten ausgeschlossen werden. Eine schlüssige Erklärung bietet die Annahme einer inhomogenen Wassergehaltsverteilung in der Versuchssäule, die durch die mangelhafte Funktion der Verteilerplatte verursacht wurde. Demnach wird das punktuell in der Mitte der Deckelplatte aufgegebene Wasser durch die Schlitzfräsungen nicht gleichmäßig auf die gesamte Querschnittsfläche der Säule verteilt. Vielmehr bilden sich konzentrische Bereiche mit nach außen hin abnehmenden Wassergehalten aus. Dies führt zu unterschiedlichen Transportgeschwindigkeiten, die im stärker gesättigten Kernbereich der Säule höher sind als in den Randbereichen. Die horizontale Differenzierung ist umso größer, je kleiner die Durchflussrate ist, da bei einer geringen Bewässerungsrate die Wasseraufnahmekapazität des Versuchsmaterials groß genug ist, um die Wassermenge direkt an der Aufgabestelle aufzunehmen und vertikal nach unten zu transportieren. Es entsteht nur ein schmaler Kernbereich mit einem starken Wassergehaltsgefälle nach außen zu den Randbereichen. Bei höheren Bewässerungsraten dagegen führt eine zusätzliche laterale Wasserausbreitung zu einer Aufweitung des Kernbereichs, die Wassergehaltsunterschiede verringern sich. Das beschriebene Verhalten konnte experimentell durch eine differenzierte Beprobung mit anschließender Wassergehaltsbestimmung an zwei Testsäulen nachgewiesen werden. Auch die Tracerdurchgänge der Sk-Versuche sind in verschiedene Teilkurven aufgetrennt, wie der Vergleich des abfallenden Kurvenastes der Sm- und der Sk-Kurven bestätigt.

Die Zunahme der Retardation von P und SRB mit abnehmender Durchflussrate erklärt sich mit dieser Modellvorstellung. Durch die Abnahme der Durchflussrate entstehen zunehmend größere Bereiche mit niedrigen Wassergehalten, die aufgrund ihrer geringeren Fließgeschwindigkeiten eine längere Reaktionszeit des Tracers mit der Matrix ermöglichen.

Die in den Sm-Versuchen ermittelten mittleren Fließgeschwindigkeiten v_0 zeigen eine lineare Abhängigkeit von der Durchflussrate. Als Maximalgeschwindigkeit bei der größten Durchflussrate von ca. 80 l/d wurde für Na und U anhand der Teilkurve T1 ein Wert von etwa 160 cm/h ermittelt. Für P reduziert sich dieser auf 140 cm/d, SRB erreicht aufgrund seines stark sorptiven Verhaltens sogar nur 100 cm/h. Die minimalen Geschwindigkeiten bei einer Durchflussrate von etwa 2 l/d betragen für Na 7,0 cm/h und für U 6,5 cm/h. Sie verringern sich für P auf 4,3 cm/h und für SRB auf 2,7 cm/h.

Die Säulenversuche mit kontinuierlicher Eingabe (Sk) einer Tracerlösung mit NaBr und U, die bei Durchflussraten zwischen 20 l/d und 80 l/d durchgeführt wurden, wurden mittels eines einfachen Verfahrens ausgewertet, bei dem die mittlere Fließzeit bestimmt wird. Die daraus berechneten mittleren Fließgeschwindigkeiten sind für U und NaBr praktisch identisch und entsprechen denen der Sm-Versuche. Der Vergleich der berechneten und experimentell ermittelten Parameter Wassereingabedauer t_{pulse} und wassererfüllter Porenraum n_w zeigt, dass die Tracer den Wassertransport in der Säule sehr gut nachvollziehen. Die Ergebnisse der Sk-Versuche bestätigen die Eignung von NaBr für den Einsatz im Versuchstank.

Die Markierungsversuche in der Kapillarschicht der in den Versuchstank (Länge 1,50 m, Breite 0,5 m, Tiefe 0,75 m) eingebauten Kapillarsperre wurden bei vier verschiedenen Bewässerungsraten von 20 l/d, 40 l/d, 60 l/d und 80 l/d durchgeführt. Die hydraulischen Bedingungen im Tank wurden durch Tensiometermessungen erfasst. Sie zeigen die typische Wassergehaltsverteilung in einer Kapillarsperre, bei der die Wassergehalte zur Schichtgrenze hin sowie hangabwärts zunehmen. Zusätzlich wurden beim Ausbau der Kapillarsperre erhöhte Wassergehalte in der Längsachse festgestellt, die durch die punktuelle Bewässerung des Tanks hervorgerufen wurden.

Die vertikale Ausbreitung der Salzlösung bei den Tankversuchen mit kontinuierlicher Eingabe (Tk) zeigt bei allen vier Belastungsstufen einen Hauptfließweg direkt oberhalb der Schichtgrenze, bei dem die höchsten Fließgeschwindigkeiten beobachtet werden. In diesem Bereich ist der Wassergehalt am größten, die Tensiometermessungen deuten auf nahezu gesättigte Bedingungen hin. Damit entspricht die ungesättigte Durchlässigkeit etwa dem gesättigten Wert und nimmt so ihren Maximalwert an. Bereits wenige Zentimeter oberhalb dieses Bereichs treten wesentlich höhere Einsatzzeiten der LF-Erhöhung auf. Das Gesamtbild der Tracerausbreitung stimmt überein mit dem von WOHLICH (1991) und KÄMPF (2000) beschriebenen Verhalten.

Entsprechend der unterschiedlichen Fließwege im Versuchstank mit unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten ist auch bei den Tracerdurchgangskurven der Tankversuche mit momentaner Eingabe (Tm) des

Fluoreszenzcocktails eine Aufspaltung des Durchgangs zu erkennen. Bei der FIELD-Modellierung können bis zu zehn Teilkurven abgetrennt werden. Wie auch in den Säulenversuchen weist die erste Kurve den höchsten Anteil am Tracerdurchgang auf.

Die Retardierung der Fluoreszenzcocktails entspricht im Wesentlichen dem bereits bei den Säulenversuchen beobachteten Verhalten. U zeigt, wenn überhaupt, nur eine sehr geringe Retardierung (R_D max. 1,12). Mit R_D -Werten von 1,07 bis 1,41 wird P etwas stärker transportverzögert. Beide Tracer liegen mit diesen Retardationsfaktoren im Bereich der Werte aus den Säulenversuchen. SRB dagegen weist mit R_D -Werten von 2,67 bis 4,38 eine deutlich höhere Retardation auf als bei den Sm-Versuchen. Möglicherweise wirkt sich die vergrößerte Reaktionsoberfläche durch das größere Sedimentvolumen im Tank aus. Die Abnahme der Retardierung ist bei den Tankversuchen im Gegensatz zu den Sm-Versuchen nur für SRB zu erkennen. Als Ursache wird derselbe Mechanismus wie bei den Sm-Versuchen angenommen.

Die Tracer Na und U werden praktisch vollständig wiedererhalten. Bei den reaktiven Tracern P und SRB beträgt die Rückgewinnung etwa 98 % bzw. 96 %. Das ist wahrscheinlich auf das Tailing zurückzuführen, das besonders stark die Durchgangskurven von SRB zeigen, was aber auch bei P zu beobachten ist. Durch das langsame Abnehmen der Konzentrationen wird nach Unterschreiten der Nachweisgrenze eine nicht zu vernachlässigende Tracermenge durch die Analytik nicht erfasst und fehlt so in der Bilanz. Ein Tracerverlust durch irreversible Festlegung an der Matrix ist eher unwahrscheinlich, da sie dem bisherigen Verhalten der Tracer widerspricht und die Fehlbeträge dafür zu gering sind.

Aus den Ergebnissen der Tk- und Tm-Versuche ergeben sich grundlegende Unterschiede zwischen beiden Versuchstypen, die auf die unterschiedliche Tracereingabe zurückzuführen sind. Bei der kurzen momentanen Eingabe eines sehr kleinen Tracervolumens direkt in den Hauptstrom des Wasserflusses wird der maximale Transport bestimmt. Durch die relativ schnelle Fließgeschwindigkeit in der Längsachse des Tanks aufgrund der erhöhten Wassergehalte in diesem Bereich kommt es nur zu einer geringen lateralen Ausbreitung des Tracers. Das führt zu einem schnellen steilen Ansteigen der Konzentrationen bis zum Maximalwert bei den Durchgangskurven der Tm-Versuche. Im Gegensatz dazu werden bei der langandauernden kontinuierlichen Eingabe eines großen Tracervolumens auch die randlichen Bereiche im Tank vom Tracer erfasst. Durch die laterale Dispersion verläuft der Kurvenanstieg flacher und der geringere Maximalwert wird langsamer erreicht.

Auch der Durchgang von U und die Leitfähigkeitskurve der Sonde LF1, die sich wenige Zentimeter oberhalb des KS-Abflusses im Tank befindet, der Tk-Versuche weisen deutliche Unterschiede auf und können nicht direkt miteinander verglichen werden. Die LF1-Kurve zeigt einen steileren Anstieg und Abfall der Messwerte vor bzw. nach dem Maximum-Plateau als die U-Kurve. Zurückzuführen ist das auf die unterschiedliche Position, an der der Parameter gemessen wird. Während sich die LF-Sonde direkt im Hauptstrom befindet, erfolgt die Messung der U-Konzentration erst im KS-Abfluss des Tanks. Dadurch kommt es zu einer Verringerung der Konzentration, da auch die Randbereiche, deren Wasser nicht vollständig durch Tracerlösung ausgetauscht wurde, im Abfluss erfasst werden.

6 Literatur

- AMANN, P. & MENDOZA, A. (1999): Geotechnische Stabilität von Kapillarsperren-Systemen. – in: AKADEMIE FÜR BAUEN UND UMWELT (Hrsg.): Die Kapillarsperre – Innovative Oberflächenabdichtung für Deponien und Altlasten. – 209 S.; Berlin (Springer).
- ASSOULINE, S. (2001): A model for soil relative hydraulic conductivity based on the water retention characteristic curve. – *Water Resour. Res.*, **37** (2): 265-271; Washington.
- BAKER, R. S. & HILLEL, D. (1990): Laboratory Tests of a Theory of Fingering During Infiltration into Layered Soils. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **146** (1): 51-56; Baltimore.
- BALZ, K. (1997): Untersuchungen zum Einfluß der Temperatur auf das Abflussverhalten einer Kapillarsperre. – unveröffentlichte Diplomarbeit LMU München, Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie: 107 S.; München.
- BALZ, K., BAUER, E. & WOHNLICH, S. (1999): Funktion von Geotextilien in Kapillarsperren. – in: AKADEMIE FÜR BAUEN UND UMWELT (Hrsg.): Die Kapillarsperre – Innovative Oberflächenabdichtung für Deponien und Altlasten. – 209 S.; Berlin (Springer).
- BARTH, C. (2004): Die Wirksamkeit der Kapillarsperre als Deponieoberflächenabdichtung – Feldversuche auf der Deponie Bayreuth. – 121 S., URL <http://edoc.ub.uni-muenchen.de/archive/00001829/>
- BAUER, E (2001): Eignung verschiedener Materialien für Kapillarsperren – Auswahl und Dimensionierung. – *Münchner Geol. Hefte*, **13**: XII + 142 S., 41 Abb., 39 Tab.; München.
- BDS (2003): Oberflächenabdichtung mit Kapillarsperre für die Zentraldeponie Emscherbruch. – *Wasser, Luft und Boden (WLB)*, 9/2003: 62-63; Mainz.
- BEHRENS, H. (1971): Untersuchungen zum quantitativen Nachweis von Fluoreszenzfarbstoffen bei ihrer Anwendung als hydrologische Markierungsstoffe. – *Geologica Bavarica*, **64**: 120-131; München.
- BEHRENS, H. (1973): Eine verbesserte Nachweismethode für Fluoreszenzindikatoren und ihre Anwendung zur Feststellung von Fließwegen im Grundwasser. – *Z. Dt. Geol. Ges.*, **124**: 535-544; Hannover.
- BEHRENS, H. (1988): Quantitative Bestimmung von Uranin, Eosin und Pyranin in Gemischen mittels Fluoreszenzmessung bei definierten pH-Werten. – *Steir. Beitr. z. Hydrogeol.*, **39**: 117-129; Graz.
- BENSON, C. H. BOSSCHER, P. J., LANE D. T. & PLISKA, R. J. (1994): Monitoring System for Hydrologic Evaluation of Landfill Covers. – *Geotechnical Testing Journal*, **17**(2): 138-149; Philadelphia.
- BEYER, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilung. – *Wasserwirtschaft – Wassertechnik (WWT)* 14: 165-169; Berlin.
- BLOEMEN, G. W. (1980): Calculation of Hydraulic Conductivities of Soils from Texture and Organic matter Content. – *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* **143**: 581-605; Weinheim (Chemie).
- BRUNSCHLIK, R., WEIGL, P. & WOHNLICH, S. (1994): Kapillarsperren als alternative Barrieren in Oberflächenabdichtungen von Deponien. – *EntsorgungsPraxis*, **3/94**: 16-21; Gütersloh.
- BUCKINGHAM (1907): Studies on the movement of soil moisture. – *U.S. Dep. Agr. Soils Bureau Bull.*, **38**; Washington.
- CHAN, T. P. & GOVINDARAJU, R. S. (2003): A new model for soil hydraulic properties based on a stochastic conceptualization of porous media. – *Water Resour. Res.*, **39** (7): SBH 10-1 - 14; Washington.
- CONSTANTZ, J. (1982): Temperature Dependence of Unsaturated Hydraulic Conductivity of Two Soils. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46**: 466-470; Baltimore.

- DEXTER, A. R. (1993): Heterogeneity of unsaturated, gravitational flow of water through beds of large particles. – *Water Resour. Res.*, **29** (6): 1859-1862; Washington.
- DIN 4022 (1987): Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels. – Normenausschuss Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin (Beuth).
- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie – Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. – Normenausschuss Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin (Beuth).
- DIN 4301 (1981): Eisenhüttenschlacke und Metallhüttenschlacke für das Bauwesen. – Normenausschuss Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin (Beuth).
- DIN 18 121-1 (1998): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Wassergehalt – Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung. – Normenausschuss Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin (Beuth).
- DIN 18 123 (1996): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Korngrößenverteilung. – Normenausschuss Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin (Beuth).
- DIN 18 126 (1996): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung. – Normenausschuss Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin (Beuth).
- DIN 18 130-1 (1998): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche. – Normenausschuss Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin (Beuth).
- DIN 18 196 (1988): Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. – Normenausschuss Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin (Beuth).
- DIN 52 103 (1972): Prüfung von Naturstein; Bestimmung der Wasseraufnahme. – Normenausschuss Bauwesen im Deutschen Institut für Normung e.V.; Berlin (Beuth).
- DURNER, W. (1998): Experimentelle Charakterisierung, Parameteridentifikation und Modellierung von Fließ- und Transportprozessen in strukturierten Böden.
URL <http://soil.tu-bs.de/mitarbeiter/durner/public/Habil.pdf>
- DURNER, W. (2003): Inverse Modellierung von Säulenversuchen zur Identifikation von Stofftransportprozessen im Boden. – Sickerwasserprognose – Forschung und Praxis. Proceedings der 56. Fachtagung des Bayerischen Landesamts für Wasserwirtschaft: 69-88: München (Oldenbourg).
- GARTUNG, E. & NEFF, K. (2000): Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponiebauwerke“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT). – *Bautechnik* **77**, **9**: 615-640; Berlin (Ernst & Sohn).
- GLASS, R. J., STEENHUIS, T. S. & PARLANGE, J.-Y. (1989): Mechanism for Finger Persistence in Homogeneous, Unsaturated, Porous Media: Theory And Verification. – *Soil Science*, **148** (1): 60-70; Baltimore.
- GOLDSCHIEDER, N., HÖTZL, H. & KOTTKE, K. (2001): Microbiological decay of Naphthionate in water samples as a source of misinterpretation of tracer tests. – in: Seiler, K.-P. & Wohnlich, S. (Hrsg): *New Approaches Characterizing Groundwater Flow*, vol. 1: 77-81; Lisse (Balkema).
- GRÄSLE, W. & HORN, R. (1998): Zum Einsatz numerischer Simulationen bei der Planung von Kapillarsperren als Oberflächenabdichtung am Beispiel der Deponie „Blockland“ (Bremen). – *Z. f. Kulturtechnik u. Landentwicklung*, **39**: 199-205; Berlin.
- GRIGULL, U., STRAUB, J. & SCHIEBENER, P. (1990): *Steamtables in SI-Units*. – 3. erw. Ausgabe: 133 S.; Berlin (Springer).
- HADI, S. (1997): *New Hydrological Tracers – Synthesis and Investigation*. – 191 S., Freiburg – ISBN 3-8152-0015-6.

- HARTGE, K. H. & HORN, R. (1991): Einführung in die Bodenphysik. – 2. überarb. u. erw. Auflage: 303 S., 156 Abb., 19 Tab.; Stuttgart (Enke).
- HILL, D. E. & PARLANGE, J.-Y. (1972): Wetting Front Instability in Layered Soils. – Soil Sci. Soc. Am. Proc., **36** (5), 697-702; Madison, Wisc.
- HILLEL, D. (1980): Fundamentals of Soil Physics. – 413 S.; Orlando (Academic Press).
- HILLEL, D. & BAKER, R. S. (1988): A Descriptive Theory of Fingering During Infiltration into Layered Soils. – Soil Science, **146** (1): 51-56; New York.
- HÖLTING, B. (1992): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. – 2. Aufl.: 303 S., 156 Abb., 19 Tab.; Stuttgart (Enke).
- HOPMANS, J. W. & DANE, J. H. (1986): Temperature Dependence of Soil Hydraulic Properties. – Soil Sci. Soc. Am. J., **50**: 4-9; Baltimore.
- HUBER, A. (2002): Deponiegasdränschichten – Geotechnische und geochemische Untersuchungen. – Münchner Geol. Hefte, **16**: XIV + 199 S., 72 Abb., 59 Tab.; München.
- HUDE, N. VON DER, KATZENBACH, R. & NEFF, H. K. (1999): Kapillarsperren als Oberflächenabdichtungssystem - Entwurf, Eignungsprüfung, Herstellung und Qualitätsmanagement. – geotechnik, **22**(2): 143-153; Essen (Glückauf).
- HUDE, N. VON DER, MELCHIOR, S. & MÖCKEL S. (1999): Bau einer Kapillarsperre im Oberflächenabdichtungssystem der Deponie Breiner Moor. – Müll und Abfall, 1999(4): 186-194; Berlin (Erich Schmidt).
- HUDE, N. VON DER, & HOPPE, U. (2000): Dimensionierung und Überprüfung der Elemente eines Kapillarsperrensystems zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. - geotechnik, **23**(1): 48-52; Essen (Glückauf).
- JELINEK, D. (1993): Probabau einer Kapillarsperre auf der Deponie „Am Stempel“. – Wasser und Boden, **45**: 242-264; Hamburg (Parey).
- JELINEK, D. (1996): Die Kapillarsperre als Oberflächenbarriere für Deponien und Altlasten – Langzeitstudien und praktische Erfahrungen in Feldversuchen. - Mitt. Inst. f. Wasserbau u. Wasserwirtschaft, **97**: 141 S. + Anhang; TH Darmstadt (Eigenverlag).
- JELINEK, D. & HUDE, N. VON DER (1994): Kapillarsperrensysteme auf der Deponie “Monte Scherbelino” – Vier Alternativen im Test. – Wasser und Boden, **46**: 60-65; Berlin (Parey).
- KÄMPF, M. (1993): Einfluß der Dampfdiffusion in Sanden der Kapillarsperre. – unveröffentlichte Studienarbeit TU Darmstadt, Institut für Wasserbau: 97 S. +Anhänge; Darmstadt.
- KÄMPF, M. (2000): Fließprozesse in Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten – Grundlagen zur hydraulischen Bemessung. – Mitt. Inst. f. Wasserbau u. Wasserwirtschaft, **109**: 145 S.; Darmstadt
- KÄMPF, M., HOLFELDER, T. & MONTENEGRO, H. (1998): Bemessungskonzept für Kapillarsperrensysteme. – in: BURKHARDT, G. & EGLOFFSTEIN, T. (Hrsg.): Oberflächenabdichtungssysteme für Deponien und Altlasten 98. – Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, **109**: 131-145; Berlin.
- KÄSS, W. (1992): Geohydrologische Markierungstechnik. –in: MATTHESS, G. (Hrsg.): Lehrbuch der Hydrologie, **9**: 519 S., 234 Abb., 30 Tab., 4 Farbtafeln; Borntraeger (Berlin).
- KLOTZ, D. (1982): Verhalten hydrologischer Tracer in ausgewählten fluvioglazialen Kiesen, Hangschutt-Kiesen und tertiären Kies-Sanden aus Bayern. – Beitr. z. Geol. d. Schweiz – Hydrologie, **28** (2): 245-256; Bern.
- KLOTZ, D. (1991): Erfahrungen mit Säulenversuchen zur Bestimmung der Schadstoffmigration. – GSF-Institut für Hydrologie, Bericht 7/91: 118 S.; Neuherberg (GSF).

- KLOTZ, D. (1999): Untersuchungen zum Migrations- und Transformationsverhalten von Terbutylazin im unterirdischen Wasser, durchgeführt in verschiedenen Skalenebenen. – 8. Gumpensteiner Lysimetertagung, 13. und 14. April 1999; Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irnding.
- KINDSMÜLLER, W. (1999): Gleichwertigkeitsnachweis für Deponieoberflächenabdichtungssysteme unter besonderer Berücksichtigung von Kapillarsperren.- in: AKADEMIE FÜR BAUEN UND UMWELT (Hrsg.): Die Kapillarsperre – Innovative Oberflächenabdichtung für Deponien und Altlasten. – 209 S.; Berlin (Springer).
- KUNTSCHKE, K. (1999): Qualitätssicherung beim Bau von Oberflächenabdichtungen. - in: AKADEMIE FÜR BAUEN UND UMWELT (Hrsg.): Die Kapillarsperre – Innovative Oberflächenabdichtung für Deponien und Altlasten. – 209 S.; Berlin (Springer).
- KUNTZE, H, RÖSCHMANN, G., & SCHWERDTFEGER, G. (1994): Bodenkunde. – 4. Aufl.: 424 S.; Stuttgart (Ulmer).
- LANG, H. (1982): Zur Bestimmung von Verteilungsgleichgewichten zwischen Lockergesteinen und wäßrigen Radionukleid-Lösungen mittels verschiedener Batch-Verfahren. – Dt. Gewässerkundl. Mitt., **26**, 3: 69-73; Koblenz.
- LANGGUTH, H.-R. & VOIGT, R. (1980): Hydrogeologische Methoden. – 486 S.; Berlin (Springer).
- LIU, H. H. & DANE, J. H. (1993): Reconciliation between Measured and Theoretical Temperature Effects on Soil Water Retention Curves. – Soil Sci. Soc. Am. J., **57**: 1202-1207; Madison, Wisc.
- LIU, Y., STEENHUIS, T. & PARLANGE, J. Y. (1994a): Formation and persistence of fingered flow fields in coarse grained soils under different moisture contents. – J. Hydrology, **159**: 187-195; Amsterdam (Elsevier).
- LIU, Y., STEENHUIS, T. & PARLANGE, J. Y. (1994b): Closed-form solution for finger width in sandy soils at different water contents. – Water Resour. Res., **30** (4): 949-952; Washington.
- LU, T. X., BIGGAR, J. W. & NIELSEN, R. D. (1994a): Water movement in glass bead porous media I. Experiments of capillary rise and hysteresis. – Water Resour. Res., **30** (12): 3275-3281; Washington.
- LU, T. X., BIGGAR, J. W. & NIELSEN, R. D. (1994b): Water movement in glass bead porous media II. Experiments of infiltration and finger flow. – Water Resour. Res., **30** (12): 3283-3290; Washington.
- LUXMOORE, R. J., JARDINE, G. V., WILSON, J. R., JONES, J. R. & ZELANY, L. W. (1990): Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hillslope. – Geoderma, **46**: 139-154; Amsterdam (Elsevier).
- MALOSZEWSKI, P. (1981): Computerprogramm für die Berechnung der Dispersion und der effektiven Porosität in geschichteten porösen Medien. – GSF-Bericht R 269; Neuherberg (GSF).
- MALOSZEWSKI, P. (1987): Mathematische Modelle für lineare Sorptions- und Desorptionsvorgänge. – GSF- Institut für Hydrologie, Jahresbericht 1987: 102-114; Neuherberg (GSF).
- MALOSZEWSKI, P. (1991): Bemerkungen über die Interpretation von Markierungsversuchen im Grundwasser. – GSF- Institut für Hydrologie, Jahresbericht 1991: 2-19; Neuherberg (GSF).
- MELCHIOR, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. – Hamburger Bodenkdl. Arb., **22**: 330 S. +Anhang; Hamburg.
- MELCHIOR, S. & MIEHLICH, G. (1987): Untersuchungen zum Wasserhaushalt mehrschichtiger Oberflächenabdichtungssysteme auf der Deponie Georgswerder, Hamburg. – Mitt. d. Dt. Bodenkundl. Ges., **55**(I), 213-218; Oldenburg.
- MILLER, D. E. & GARDNER, W. H. (1962): Water Infiltration into Stratified Soil. – Soil Sci. Soc. Am. Proc., **26**, 115-118; Madison, Wisc.

- MIYAZAKI, T. (1988): Water Flow in Unsaturated Soil in Layered Slopes. – J. Hydrology, **102**: 201-214; Amsterdam (Elsevier).
- MIYAZAKI, T. (1993): Water Flow in Soils. – 296 S.; New York (Dekker).
- MUALEM, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. – Water Resour. Res., **12** (3): 513-522; Washington.
- MUALEM, Y. & FRIEDMAN, S. P. (1991): Theoretical Prediction of Electrical Conductivity in Saturated and Unsaturated Soil. – Water Resour. Res., **27** (10): 2771-2777; Washington.
- NYHAN, J.W. (1990): Calibration of the CREAMS Model for Landfill Cover Designs Limiting Infiltration of Precipitation at Waste Repositories. – Hazardous Waste & Hazardous Materials, **7**(2): 169-184; New York (Lieber).
- PLAGGE, R. (1991): Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit im Boden. – Bodenökologie und Bodengenese, **3**: 152 S.; Berlin.
- PRINZ, H. (1991): Abriß der Ingenieurgeologie. – 2., neu bearb. u. erw. Aufl.: 466 S., 352 Abb., 74 Tab.; Stuttgart (Enke).
- RANÇON, D. (1980): Application de la technique des barrières capillaires aux stockages en tranchées. in: IAEA (1980): Underground Disposal of Radioactive Wastes. Proceedings of the International Atomic Energy Agency Conference, Vienna, Austria. Publication scientific technical information, 528(1): 241-265; Wien.
- REHFUESS, K. E. (1990): Waldböden – Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. – 2. Aufl.: 294 S., 119 Abb., 94 Übersichten; Hamburg (Parey).
- REICHERT, B. (1991): Anwendung natürlicher und künstlicher Tracer zur Abschätzung des Gefährdungspotentials bei der Wassergewinnung durch Uferfiltration. – Schr. Angew. Geol., **13**: I-XIV, 1-226; Karlsruhe.
- RITSEMA, C. J. & DEKKER, L. W. (1994): How water moves in a water repellent sandy soil, 2. Dynamics of fingered flow. – Water Resour. Res., **30**(9): 2625-2629; Washington.
- ROSSI, C. & NIMMO, J. R. (1994): Modeling of soil water retention from saturation to oven dryness. – Water Resour. Res., **30** (3): 701-708; Washington.
- ROTH, J. & SCHWARZMÜLLER, H. (1999): Planungsdetails, Kostenvergleich und Qualitätssicherung beim Bau von Kapillarsperren. - in: AKADEMIE FÜR BAUEN UND UMWELT (Hrsg.): Die Kapillarsperre – Innovative Oberflächenabdichtung für Deponien und Altlasten. – 209 S.; Berlin (Springer).
- ROUTSON, R. C., JANSON, G. & ROBINSON, A.V. (1977): ²⁴¹Am, ²³⁷Np and ⁹⁹Tc Sorption on Two United States Subsoils from Different Weathering Intensity Areas. – Health Physics, **33**: 311-317; Baltimore (Williams & Wilkins).
- RUSSO, D. (1988): Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties. – Water Resour. Res., **24** (3): 453-459; Washington.
- SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., BRÜMMER, G., HARTGE, K.-H. & SCHWERTMANN, U. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde, Scheffer/Schachtschabel. – 13. durchgesehene Aufl.: 491 S., 220 Abb., 102 Tab. 1 Farbtafel; Stuttgart (Enke).
- SCHEIBKE, R., ZURMÜHL, T. & DURNER, W. (1991): Hochauflösende Datenerfassung zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften ungestörter Bodensäulen. – Mitt. d. Dt. Bodenkundl. Ges., **66** (I), 217-220; Oldenburg.
- SCHEIDEGGER, A. E. (1961): General Theory of Dispersion in Porous Media. – J. Geophys. Res., **66** (10): 3273-3278; Washington D.C.
- SCHLICHTING, E., BLUME, H.-P. & STAHR, K. (1995): Bodenkundliches Praktikum. – 2. Aufl.: 295 S., 46 Abb., 60 Tab.; Berlin (Blackwell).

- SCHWEICH, D. & SARDIN, M. (1981): Adsorption, Partition, Ion Exchange and Chemical Reactions in Batch Reactors or in Columns – A Review. – *J. Hydrology*, **50**: 1-33; Amsterdam (Elsevier).
- SELKER, J., LECLERQ, P., PARLANGE, J.-Y. & STEENHUIS, T. (1992a): Fingering Flow in Two Dimensions – 1. Measurement of Matric Potential. – *Water Resour. Res.*, **28** (9): 2513-2521; Washington.
- SELKER, J., PARLANGE, J.-Y. & STEENHUIS, T. (1992b): Fingering Flow in Two Dimensions – 2. Predicting Finger Moisture Profile. – *Water Resour. Res.*, **28** (9): 2523-2528; Washington.
- SHE, H. Y. & SLEEP, B. E. (1998): The effect of temperature on capillary pressure-saturation relationship for air-water and perchloroethylene systems. – *Water Resour. Res.*, **34** (9): 2587-2597; Washington.
- Smart, P. L. & Laidlaw, I. M. S. (1977): An Evaluation of Some Fluorescent Dyes for Water Tracing. – *Water Resour. Res.*, **13** (1): 15-33; Washington.
- SN 670 125a (1983): Filtermaterialien; Qualitätsvorschriften. – Schweizer Normen-Vereinigung.
- STEINERT, B. (1999): Kapillarsperren für die Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten - Bodenphysikalische Grundlagen und Kippinnenuntersuchungen. – *Hamburger Bodenkdl. Arb.*, **45**: 250 S. +Anhang ; Hamburg.
- STEINERT, B., MELCHIOR, S., BURGER, K., BERGER, K., TÜRK, M. & MIEHLICH, G. (1997): Dimensionierung von Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. – *Hamburger Bodenkdl. Arb.*, **32**: 362 S.; Hamburg.
- STORMONT, J.C. (1996): The Effectiveness of Two Capillary Barriers on a 10% Slope. – *Geotechnical and Geological Engineering*, **14**: 243-267; Dordrecht (Kluwer).
- TAMAI, N., ASAEDA, T. & JEEVARAJ, C. G. (1987): Fingering in two-dimensional, homogeneous, unsaturated porous media. – *Soil Science*, **144** (2): 107-112; New York.
- Technische Anleitung Siedlungsabfall (1993): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz – Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen; Köln (Bundesanzeiger).
- VANDERBORGHT, J., GÄHWILLER, P. & FLÜHLER, H. (2002): Identification of Transport Processes in Soil Cores Using Fluorescent Tracers. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **66**: 774-787; Madison, Wisc.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**: 892-898; Madison, Wisc.
- VAN GENUCHTEN, M. TH., LEIJ, F.J. & YATES, S.R. (1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. – pdf-Version des Handbuchs; U.S. Environmental Protection Agency; Oklahoma.
- VIELHABER, B. (1995): Temperaturabhängiger Wassertransport in Deponieoberflächenabdichtungen. – *Hamburger Bodenkdl. Arb.*, **29**: 200 S. +Anhang; Hamburg.
- WHITE, I., COLOMBERA, P. M. & PHILIP, J. R. (1977): Experimental studies of wetting front instability induced by gradual change and by heterogeneous porous media. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **41**: 483-489; Madison, Wisc.
- WÖSTEN, J.H.M., & VAN GENUCHTEN, M. TH. (1988): Using Texture and Other Soil Properties to Predict the Unsaturated Soil Hydraulic Functions. – *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52**: 1762-1770; Madison, Wisc.
- WOHNLICH, S. (1991): Kapillarsperren – Versuche und Modellberechnungen. – *Schr. Angew. Geol.*, **15**: I-XVII, 1-127; Karlsruhe.
- WOHNLICH, S. & BAUER, E. (1999): Aufbau und Wirkungsweise der Kapillarsperre. – in: *AKADEMIE FÜR BAUEN UND UMWELT* (Hrsg.): *Die Kapillarsperre – Innovative Oberflächenabdichtung für Deponien und Altlasten*. – 209 S.; Berlin (Springer).

- WOHNLICH, S., BALZ, K., & BARTH, C. (2000): Einzelfallnachweis für alternative Oberflächenabdichtungen am Beispiel der Kapillarsperre. – *Wasser und Boden*, 52 (5): 15-18; Berlin (Parey).
- ZISCHAK, R. (1997): Alternatives Oberflächenabdichtungssystem „Verstärkte mineralische Abdichtung mit untenliegender Kapillarsperre“ - Wasserbilanz und Gleichwertigkeit. - *Schr. Angew. Geol.*, 47: I-XVI, 1-179; Karlsruhe.
- ZISCHAK, R. & HÖTZL, H. (1997): In-situ tracer investigations on the water balance of an alternative surface covering system on a sanitary landfill. - in: KRANJC, A (Ed.) (1997): *Tracer Hydrology* 97. - 450 S.; Rotterdam (Balkema).

7 Anhang

7.1 Testmaterialien

7.1.1 Bodenphysikalische Kennwerte

Bodenphysikalische Kennwerte der Testmaterialien				
Material	KS		KBS	
Korngrößenverteilung nach DIN 18 123-5				
Bodenart (DIN 4022)	gS, ms*, fs', fg'		mG, fg	
Arbeitsweise	Trockensiebung		Trockensiebung	
Trockenmasse [g]	494,53		1610,7	
Maschenweite [mm]	Rückstand [Gew. %]	Durchgang [Gew. %]	Rückstand [Gew. %]	Durchgang [Gew. %]
20	-	-	0,0	100,0
16	-	-	11,1	88,9
8	-	-	44,4	44,5
4	0,02	99,98	33,0	11,5
2	5,0	95,0	10,9	0,6
1	19,8	75,3	0,4	0,2
0,5	34,9	40,4	-	-
0,25	24,8	15,6	-	-
0,125	13,3	2,3	0,0	0,2
0,063	1,4	0,9	-	-
Schale	0,9	0,0	0,2	0,0
Dezentilwerte [mm]				
d ₁₀	0,18		3,3	
d ₁₅	0,23		4,0	
d ₂₀	0,27		4,6	
d ₃₀	0,37		5,8	
d ₅₀	0,60		8,5	
d ₆₀	0,74		10,1	
d ₈₅	1,44		15,2	
Ungleichförmigkeitszahl [-]				
U = d ₆₀ / d ₁₀	4,1		3,1	
Krümmungszahl [-]				
C _c = (d ₃₀ ² / (d ₁₀ *d ₆₀))	1,0		1,0	
Einteilung grobkörniger Böden nach DIN 18 196				
Benennung	enggestufter Sand (SE)		enggestufter Kies (GE)	
Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte k_f [m/s]				
Hazen (berechnet)	3,8E-04		1,3E-01	
Beyer (berechnet)	2,9E-04		9,9E-02	
Bialas (berechnet)	1,8E-04		1,2E-01	
Seelheim (berechnet)	1,3E-03		2,6E-01	
DIN 18 130 (Labor) *	3,1E-04		5,9E-02	
Korndichte (Luftpyknometer) [g/cm³]				
ρ _s	2,64		3,08	
Dichte bei lockerster und dichtester Lagerung nach DIN 18 126				
Dichteste Lagerung	Dichte [g/cm ³]	Porenanteil [-]	Dichte [g/cm ³]	Porenanteil [-]
	1,77	0,33	nicht bestimmt	
Lockerste Lagerung	Dichte [g/cm ³]	Porenanteil [-]	Dichte [g/cm ³]	Porenanteil [-]
	1,45	0,45	nicht bestimmt	

* aus BARTH 2004

7.1.2 Kleinsäulenversuche - Einbauparameter

Kleinsäulenversuche	KS		KBS	
	Sorption	Desorption	Sorption	Desorption
Gesamtmasse [g]	14964	14964	18008	18095
Wassergehalt [Gew%]	2,0	2,0	0,0	0,0
Probenvolumen [cm ³]	9236	9236	9236	9236
Feuchtdichte [g/cm ³]	1,62	1,62	1,95	1,96
Trockendichte [g/cm ³]	1,59	1,59	1,95	1,96
Porenanteil n [-]	0,40	0,40	0,37	0,37

7.1.3 VAN GENUCHTEN-Parameter

VAN GENUCHTEN-Parameter		
Material	KS	KBS
Daten- grundlage	pF-Kurve	Korngrößen- verteilung
Programm	RETC	SOILPROP
α_{VG} [1/cm]	0,0248	1,23
n_{VG} [-]	3,763	2,79
θ_t [-]	0,0345	0,01
θ_s [-]	0,3488	0,37
R^2 [-]	1,0000	0,9213

7.2 Analytik

7.2.1 Fluoreszenzspektralphotometer Shimadzu RF-5000

Fluoreszenzspektralphotometer Shimadzu RF-5000	
Geräteeinstellungen	
Verfahren	SynchronScan
Spaltbreite	10 nm
Scangeschwindigkeit	medium
Response	0,5 s
Empfindlichkeit	high oder low (konzentrationsabhängig)
Küvetten	
Präzisionsküvetten aus Quarzglas SUPRASIL® (Fa. Hellma), Schichtdicke 10,00 mm	
Nachweisgrenzen	
U	7E-09 g/l
SRB	6E-09 g/l
Na	8E-08 g/l
P	1E-07 g/l

7.2.2 Feldfluorimeter GGUN-FL

Feldfluorimeter GGUN-FL	
Hersteller	Geomagnetism Group, Institute of Geology University of Neuchâtel, Switzerland
Gerätespezifikationen	
Typ	Filterfluorimeter
Detektierbare Tracer	U, Na
Messintervall	10 s oder 4 min
Nachweisgrenzen	
U	5,00E-08
Na	nicht bestimmt, da nicht für Na verwendet

7.3 Batch-Versuche

7.3.1 Ergebnisse Uranin

Uranin						
C_0 [g/l]	$C_2 \cdot 10^{-9}$ [g/g]	σ_n (3)	S [%]	σ_n (3)	K_d [cm ³ /g]	σ_n (3)
1,00E-05	0,64	0,35	2,69	1,48	0,069	0,039
5,00E-06	0,36	0,21	2,95	1,68	0,076	0,044
1,00E-06	0,036	0,032	1,38	1,24	0,035	0,032
5,00E-07	0,002	0,003	0,16	0,27	0,004	0,007
1,00E-07	0,004	0,002	1,38	0,72	0,035	0,018
5,00E-08	0,001	0,001	0,89	0,80	0,023	0,021

Angabe der Mittelwerte und Standardabweichungen σ_n (Anzahl der Versuche)

7.3.2 Ergebnisse Pyranin

Pyranin						
C_0 [g/l]	$C_2 \cdot 10^{-9}$ [g/g]	σ_n (3)	S [%]	σ_n (3)	K_d [cm ³ /g]	σ_n (3)
2,00E-04	22,30	3,68	4,50	0,74	0,118	0,020
1,00E-04	29,21	3,93	11,66	1,57	0,331	0,050
2,00E-05	4,55	1,82	9,30	3,72	0,259	0,115
1,00E-05	5,83	1,58	21,76	5,89	0,708	0,250
2,00E-06	1,59	0,27	31,74	5,46	1,178	0,289
1,00E-06	0,67	0,32	25,38	12,13	0,914	0,588

Angabe der Mittelwerte und Standardabweichungen σ_n (Anzahl der Versuche)

7.3.3 Ergebnisse Sulforhodamin B

Sulforhodamin B						
C_0 [g/l]	$C_2 \cdot 10^{-9}$ [g/g]	σ_n (3)	S [%]	σ_n (3)	K_d [cm ³ /g]	σ_n (3)
4,00E-04	377,81	106,47	36,97	10,42	1,534	0,617
2,00E-04	184,94	56,73	38,44	11,79	1,653	0,720
4,00E-05	50,46	3,05	50,52	3,06	2,566	0,319
2,00E-05	16,20	1,77	31,95	3,50	1,181	0,192
4,00E-06	3,77	0,66	37,15	6,53	1,506	0,413
2,00E-06	2,29	0,09	43,85	1,68	1,955	0,136

Angabe der Mittelwerte und Standardabweichungen σ_n (Anzahl der Versuche)

7.4 Versuchsanlage Säule

7.4.1 Verwendete Materialien/Geräte

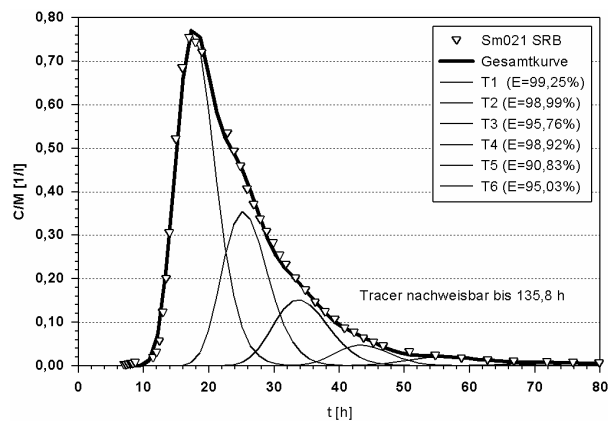
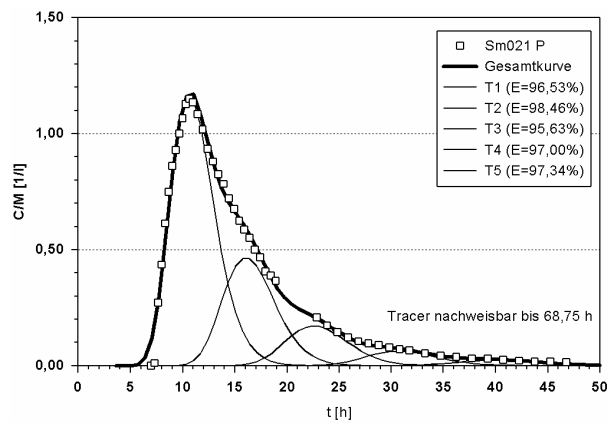
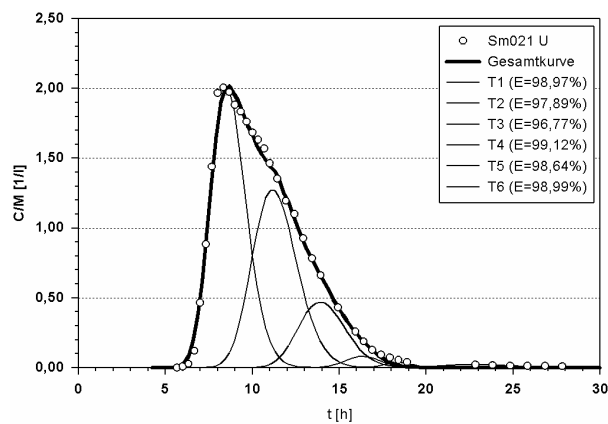
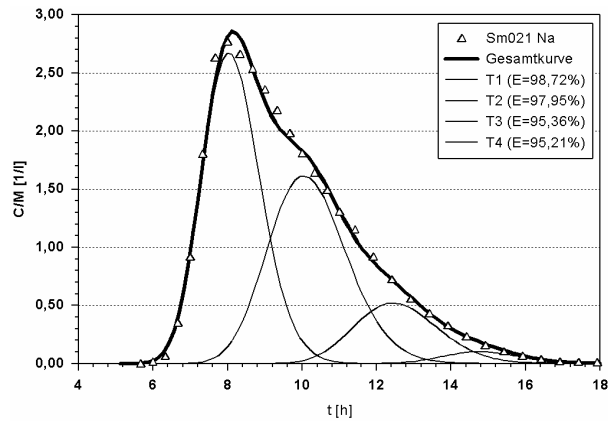
VERSUCHSANLAGE SÄULE	
Versuchssäule	
Säule	Plexiglas, Länge 0,50 m, Innendurchmesser 0,10 m
Verteilerplatten	Plexiglas, mit achtstrahliger Schlitzfräsung
	Gewindestangen, Spanschrauben
Berechnungsanlage	
Pumpen	Masterflex 7521-35
	Masterflex Economy Drive 7554-52
Pumpenköpfe	Masterflex 7014-20
	Masterflex 7015-20
Pumpenschläuche	Masterflex 5402-14 Norprene
	Masterflex 5402-15 Norprene
Schläuche	PVC, diverse Abmessungen
Messtechnik	
Leitfähigkeitssonde	VDSF Umwelttechnik
Datalogger	21X; Fa.Campbell Scientific. USA
Feldfluorimeter	GGUN-FL02; Universität Neuchatel, Schweiz
Probenautomat	
Probennehmer	Eigenbau (Linearanordnung)

7.4.2 Einbauparameter

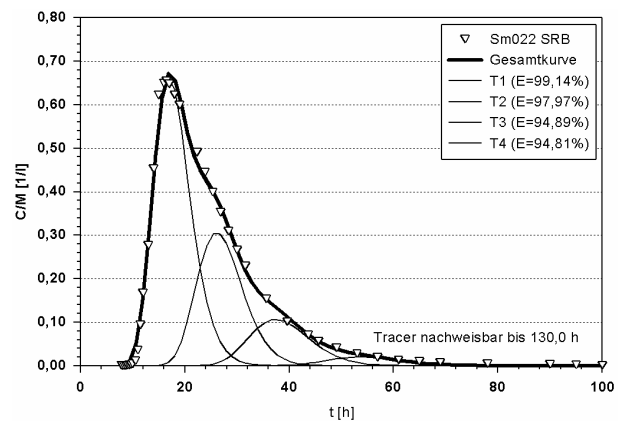
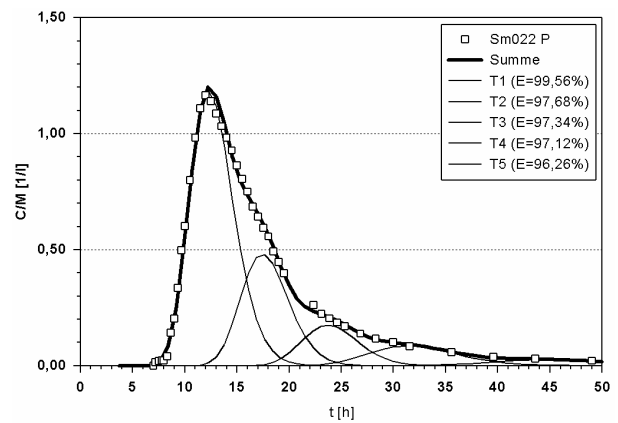
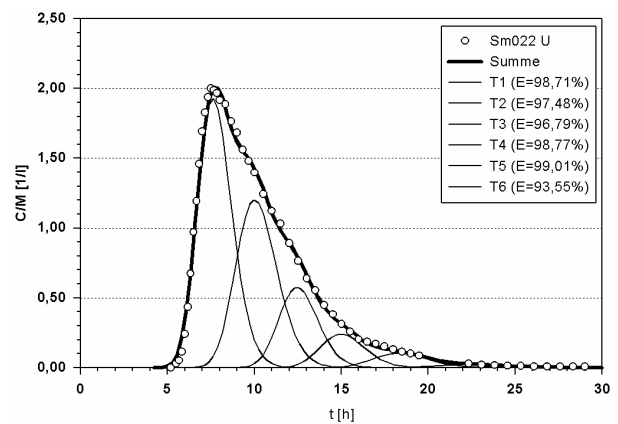
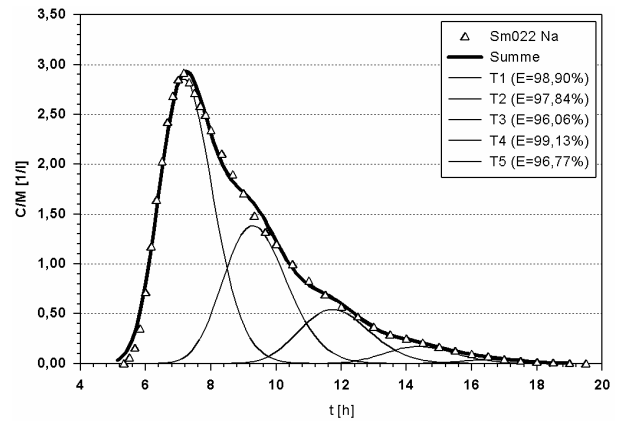
Säulenversuche - Einbauparameter	
Parameter	KS
Gesamtmasse [g]	6560
Wassergehalt [Gew%]	2,0
Probenvolumen [cm ³]	3927
Feuchtdichte [g/cm ³]	1,67
Trockendichte [g/cm ³]	1,64
Porenanteil n [-]	0,38

7.5 Säulenversuche mit momentaner Eingabe

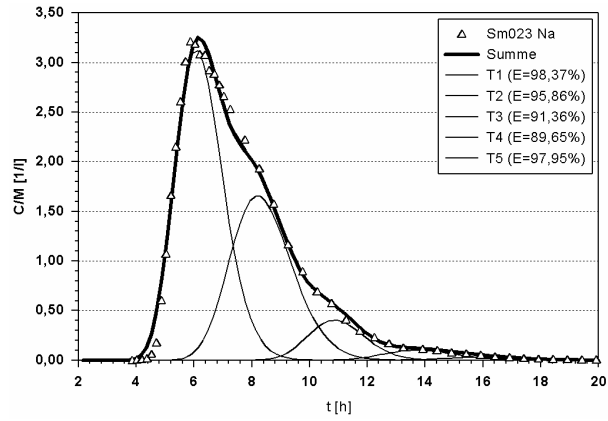
7.5.1 Sm021



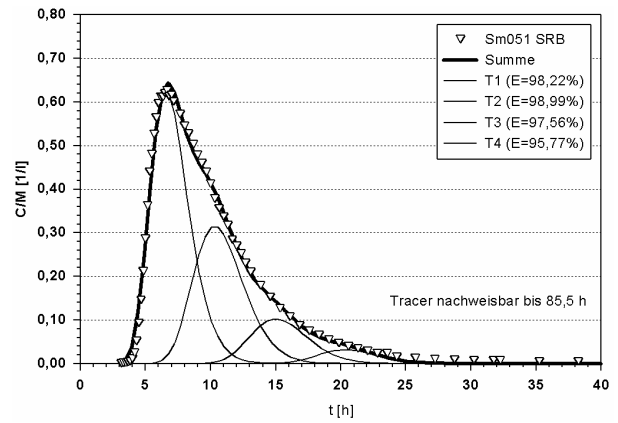
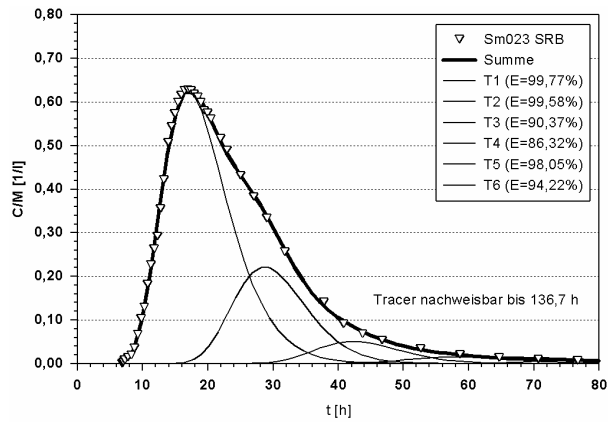
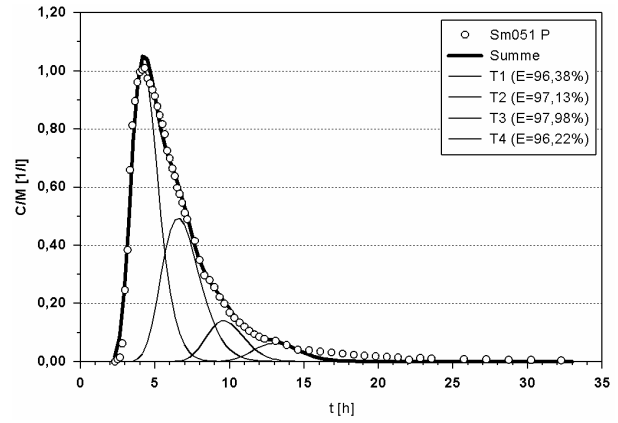
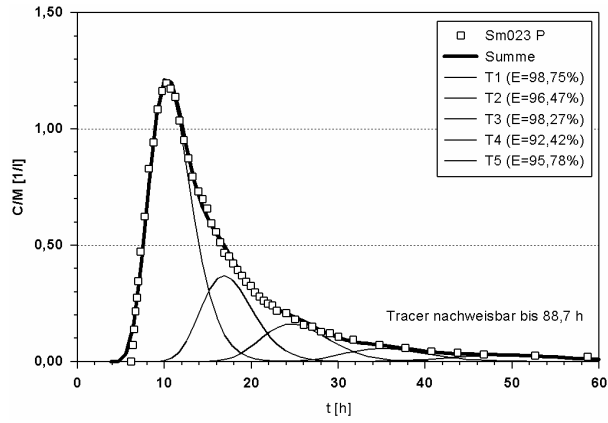
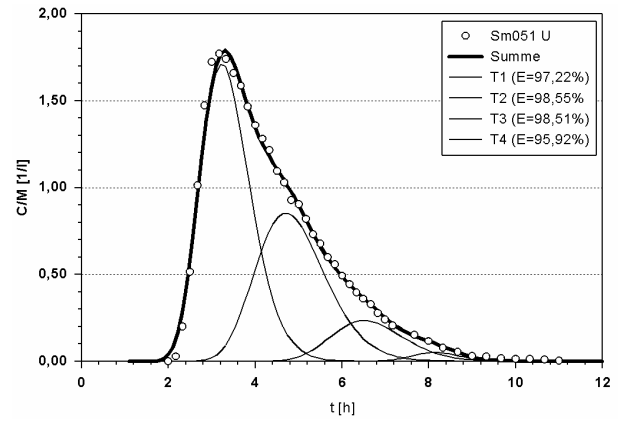
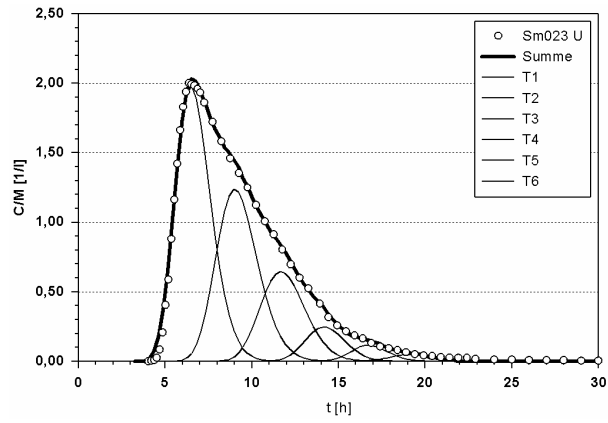
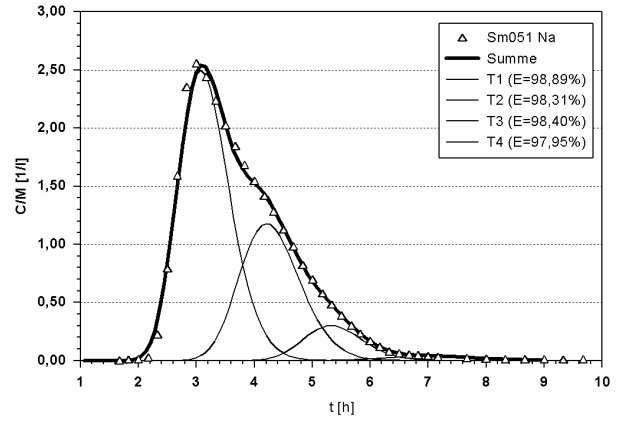
7.5.2 Sm022



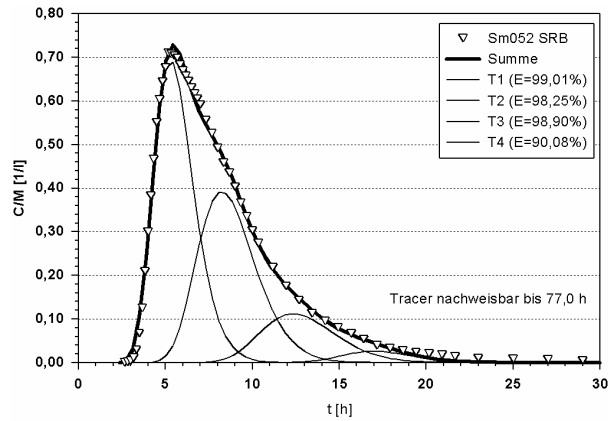
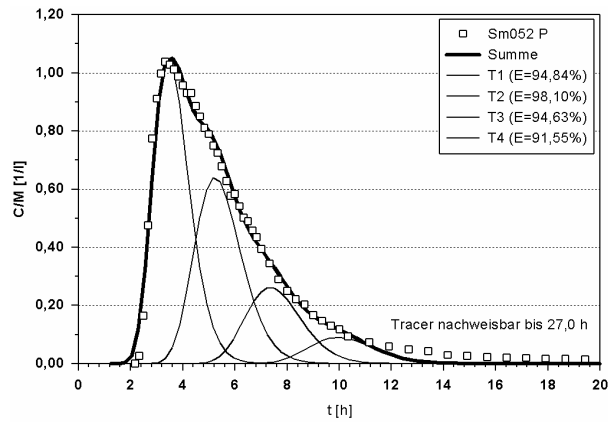
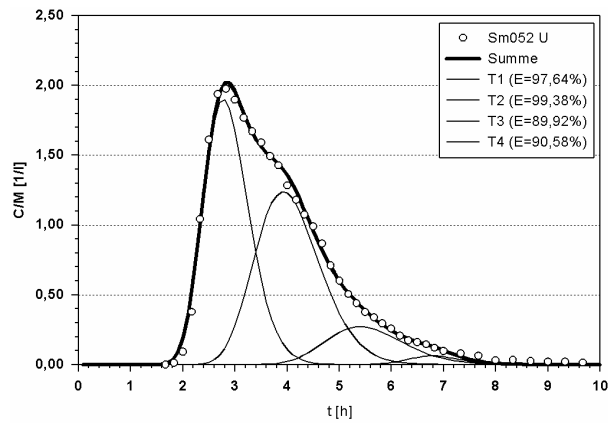
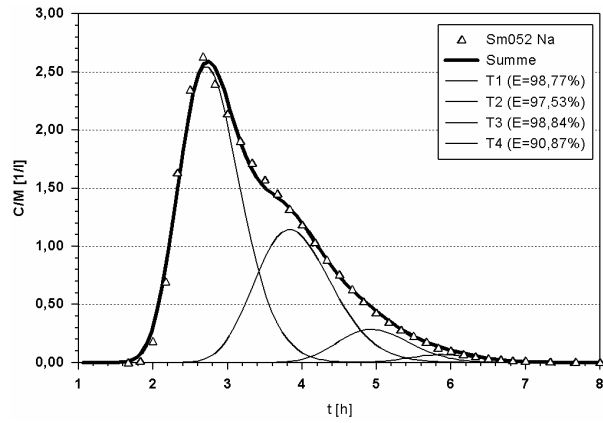
7.5.3 Sm023



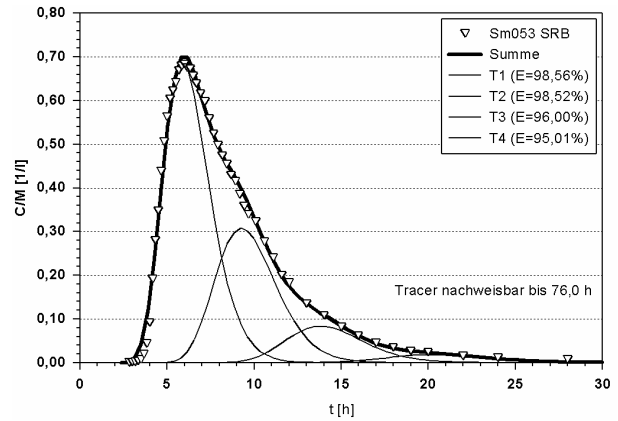
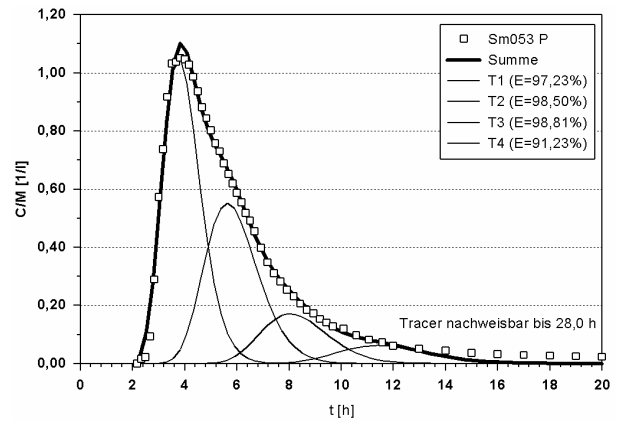
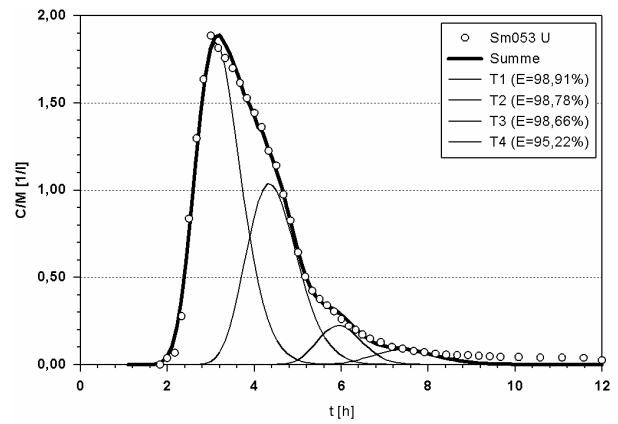
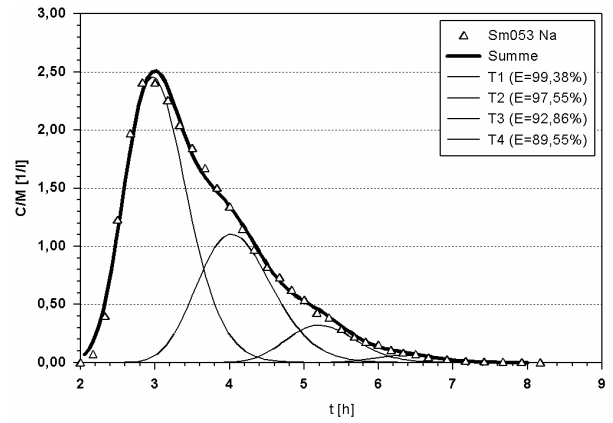
7.5.4 Sm051



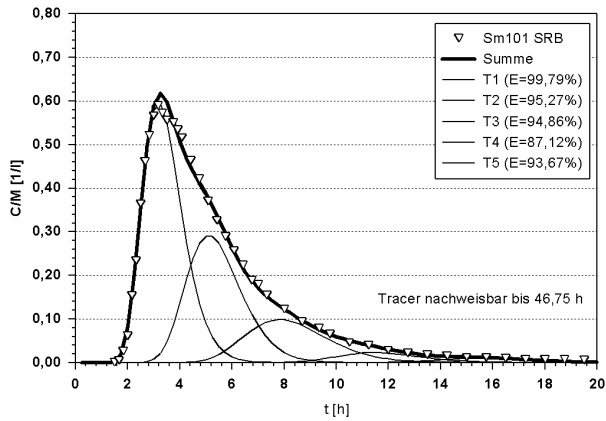
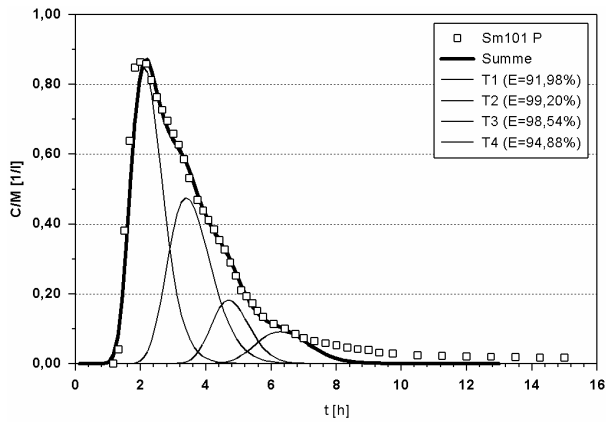
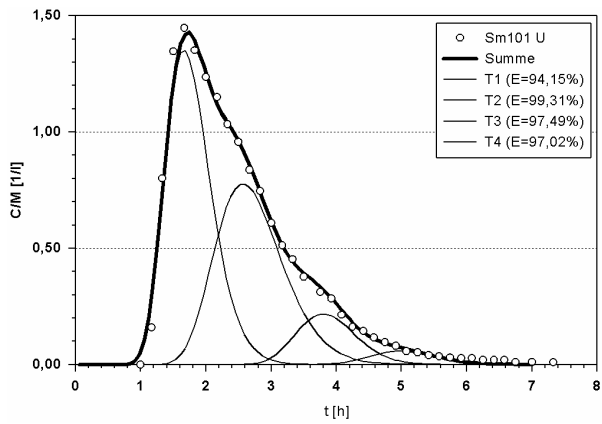
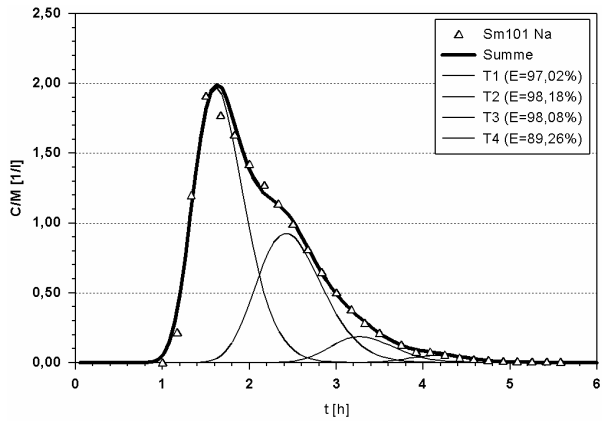
7.5.5 Sm052



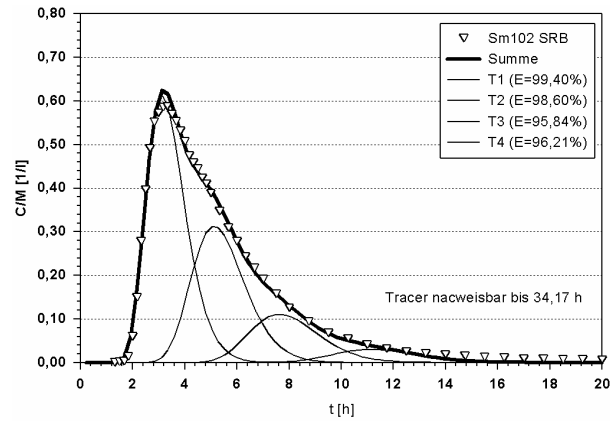
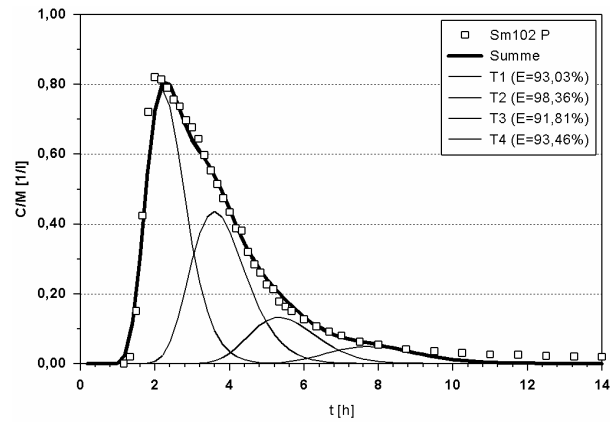
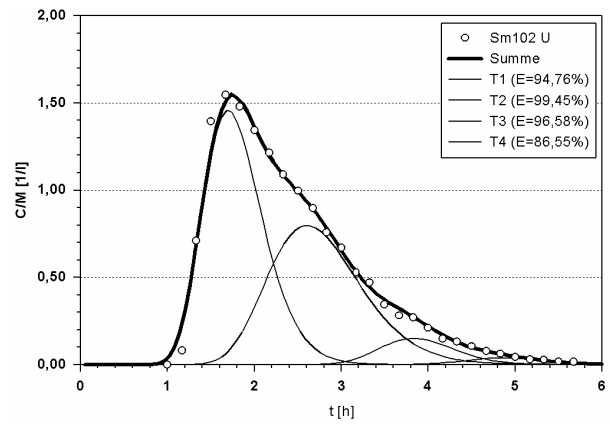
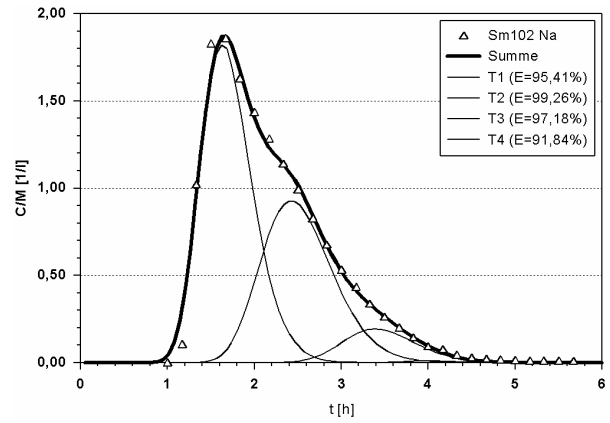
7.5.6 Sm053



7.5.7 Sm101

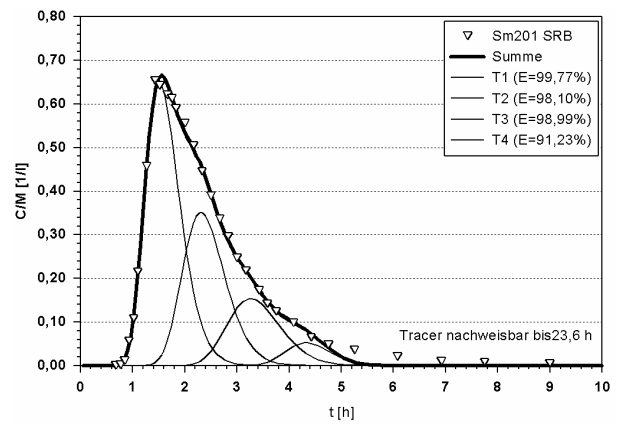
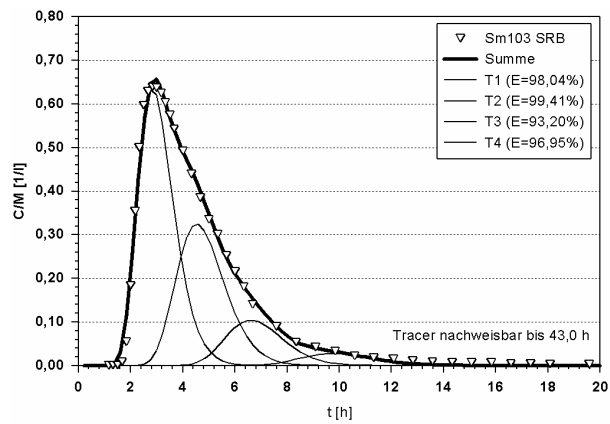
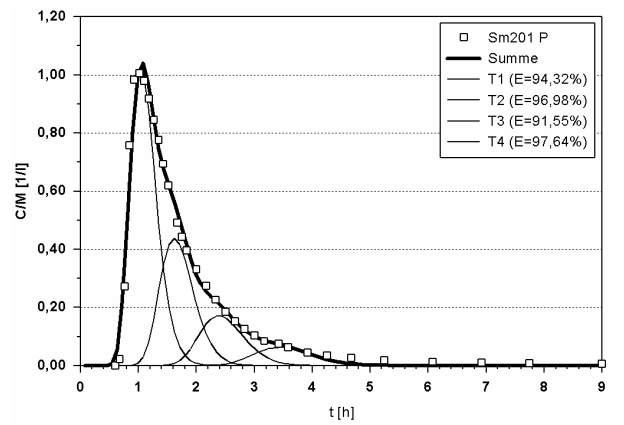
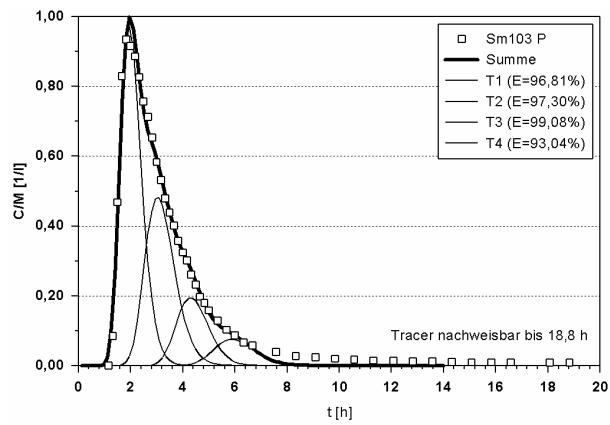
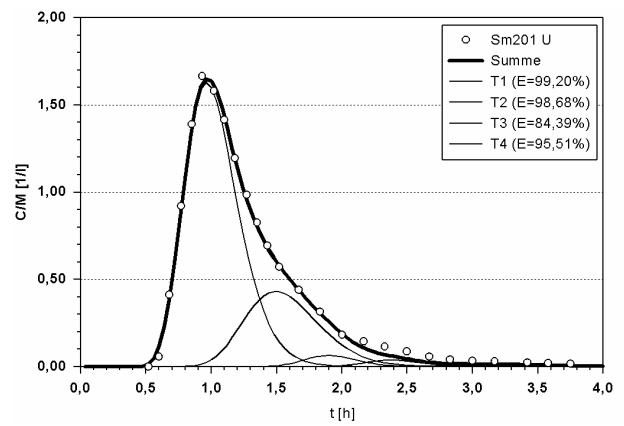
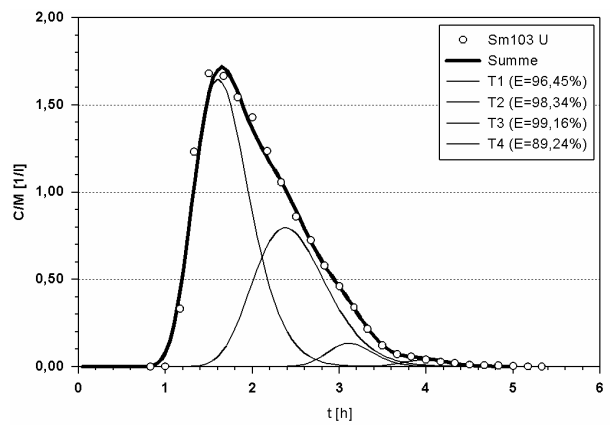
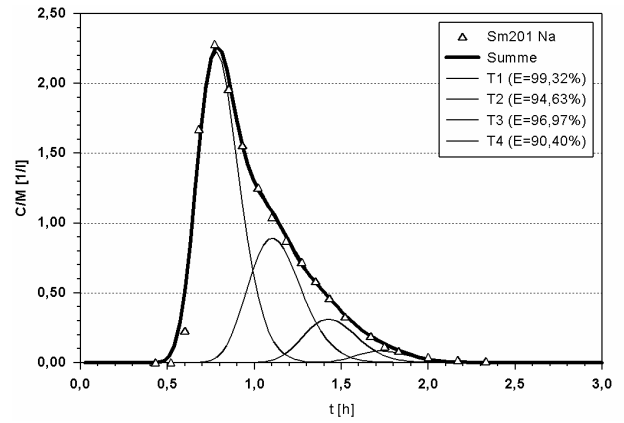
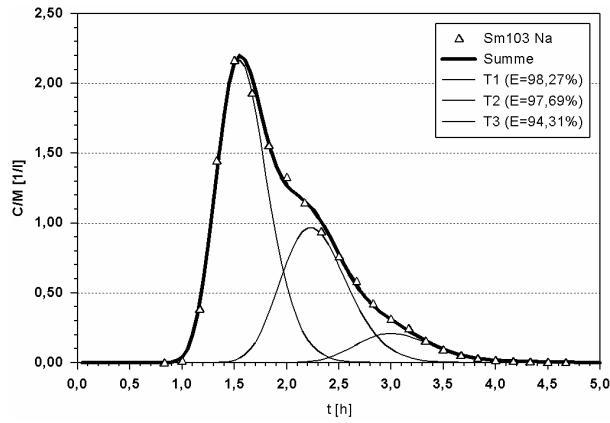


7.5.8 Sm102

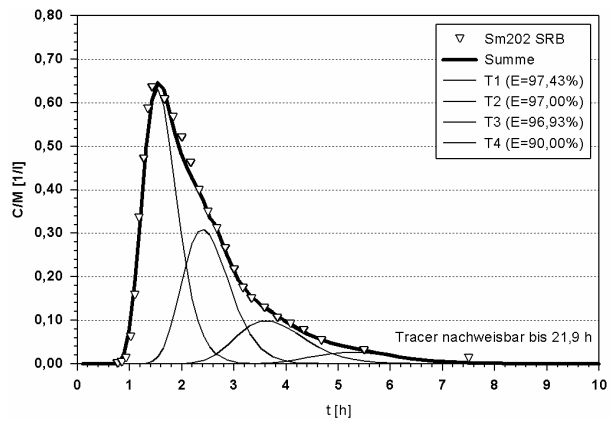
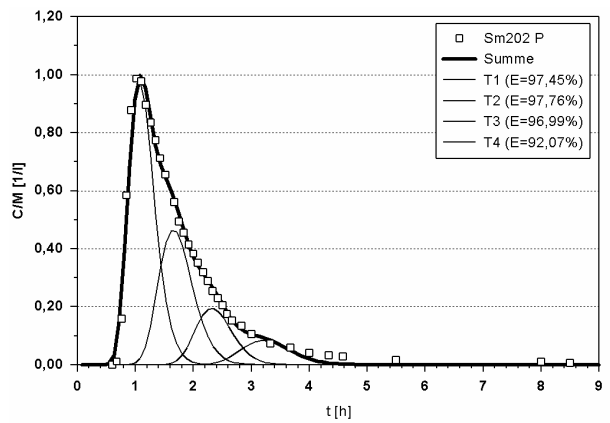
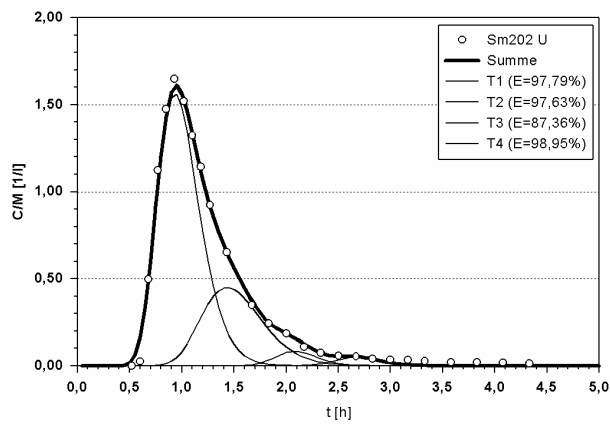
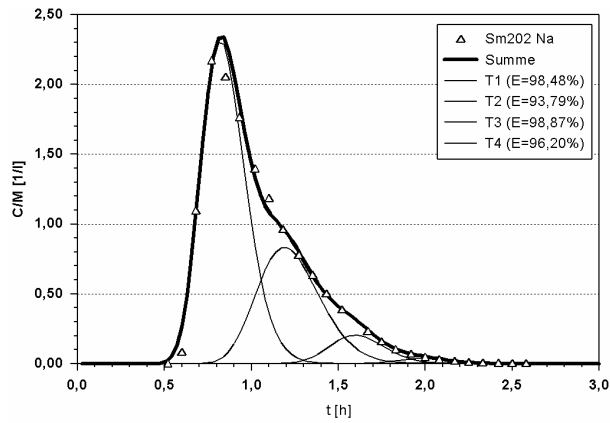


7.5.9 Sm103

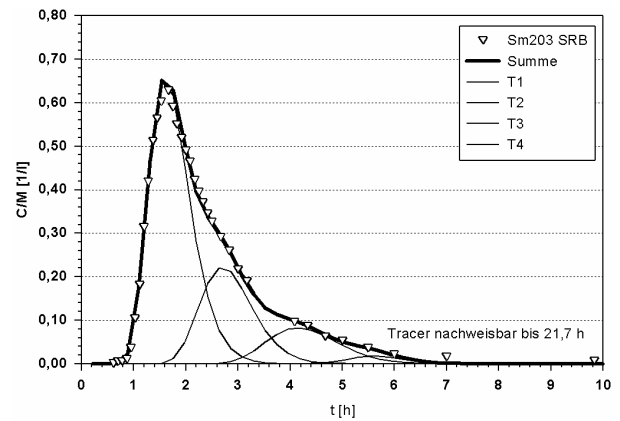
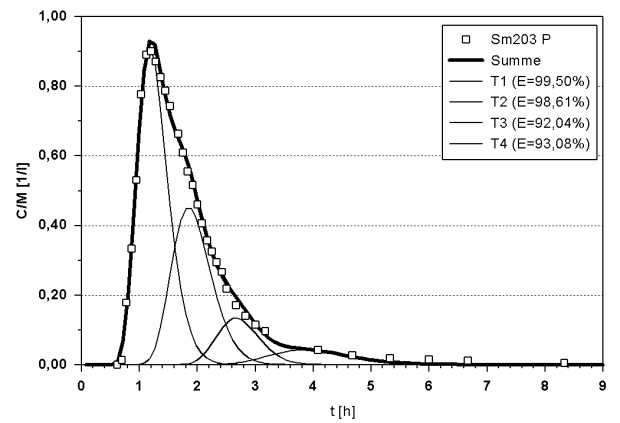
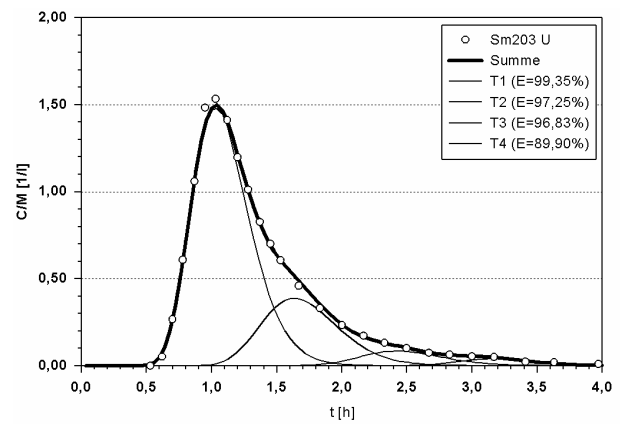
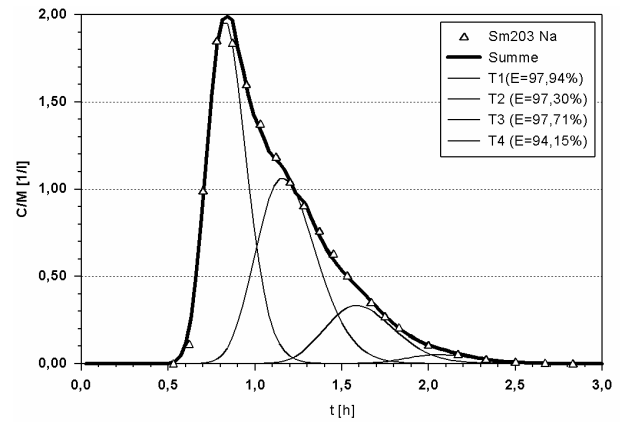
7.5.10 Sm201



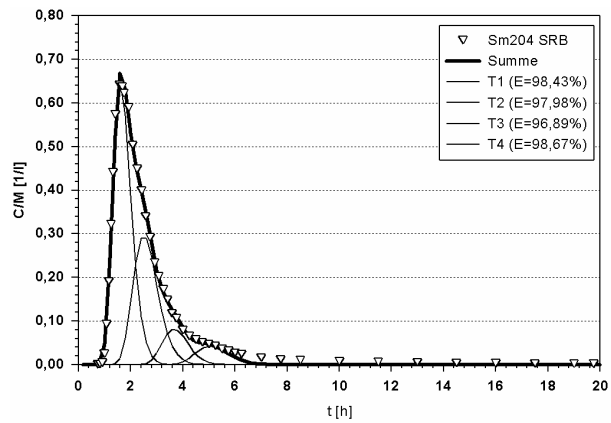
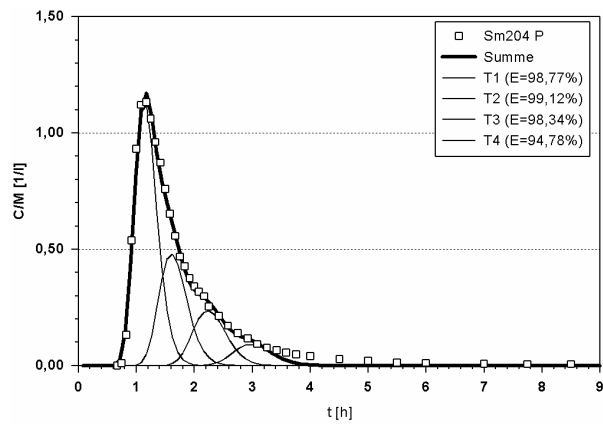
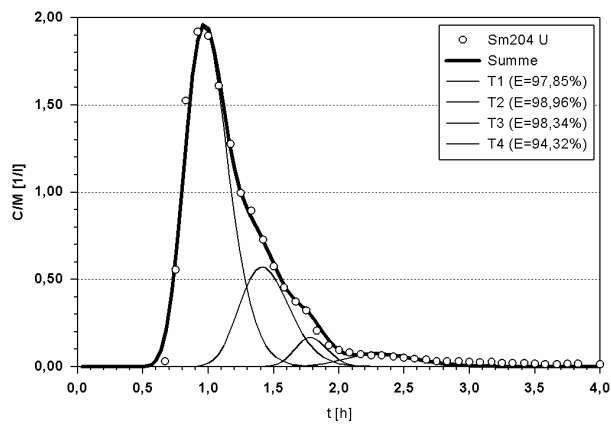
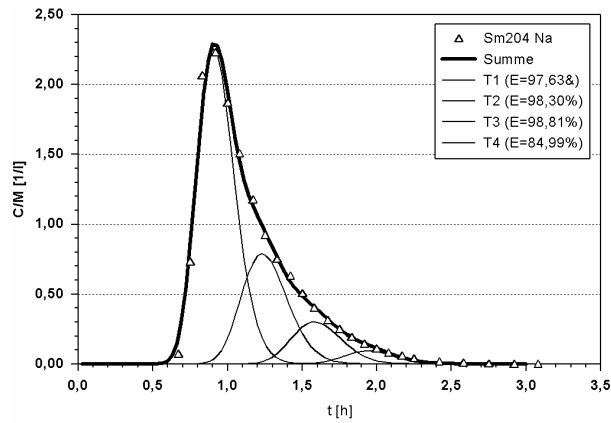
7.5.11 Sm202



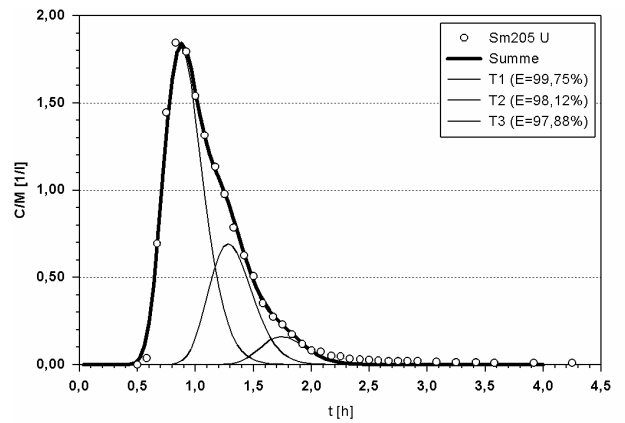
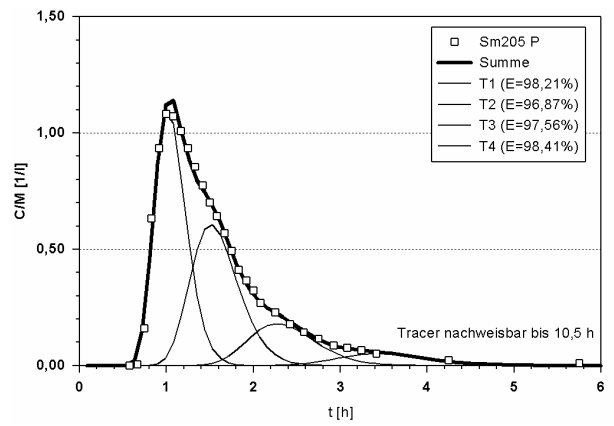
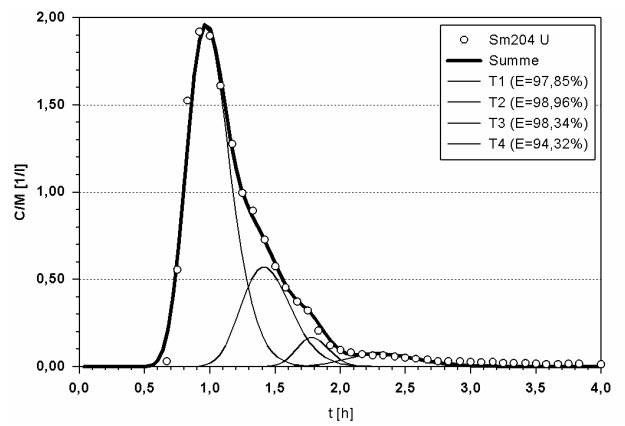
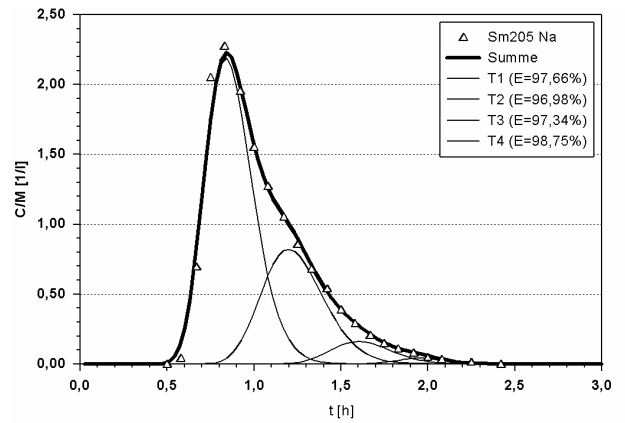
7.5.12 Sm203



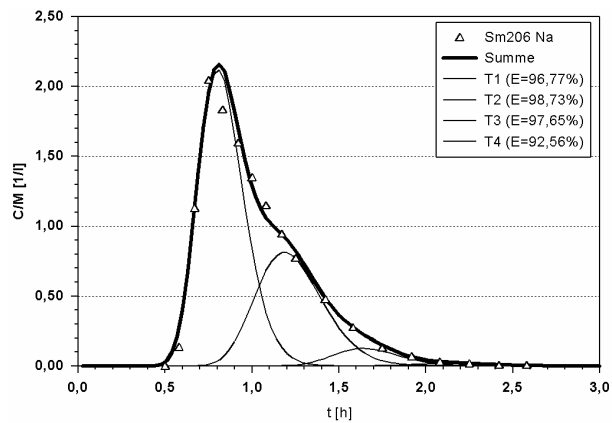
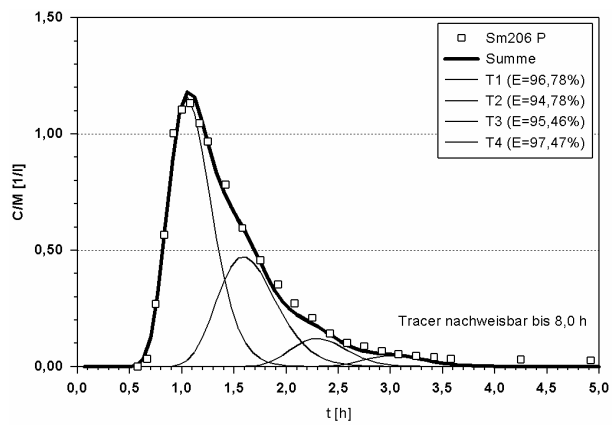
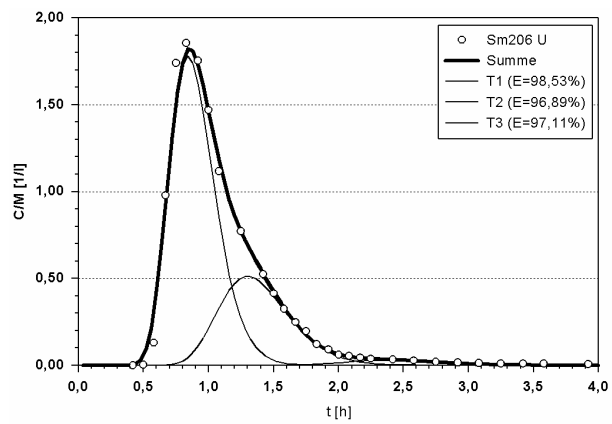
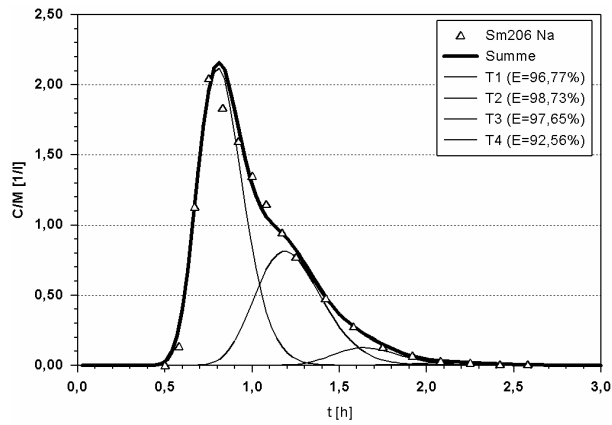
7.5.13 Sm204



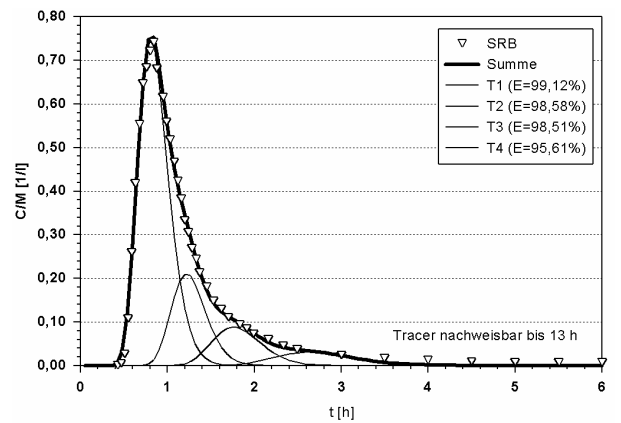
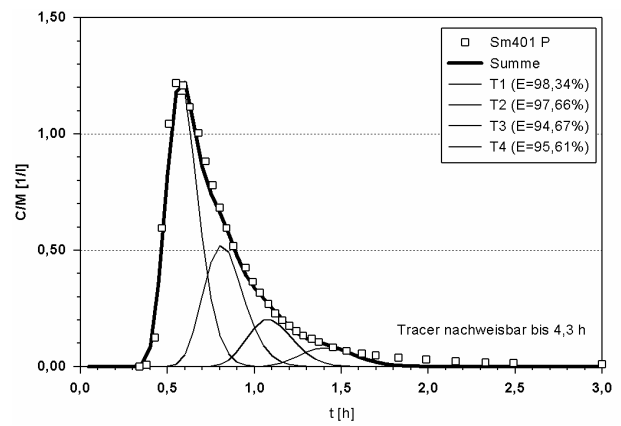
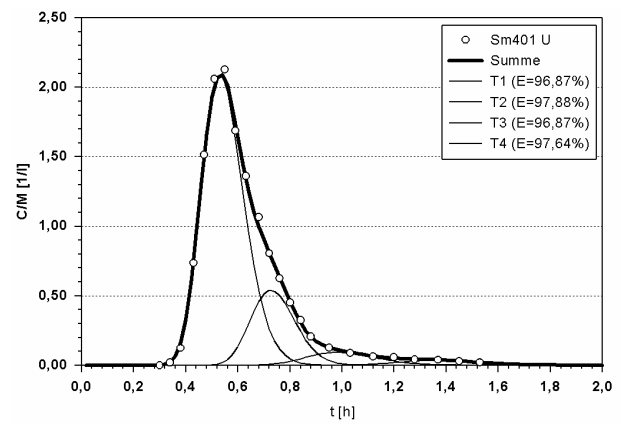
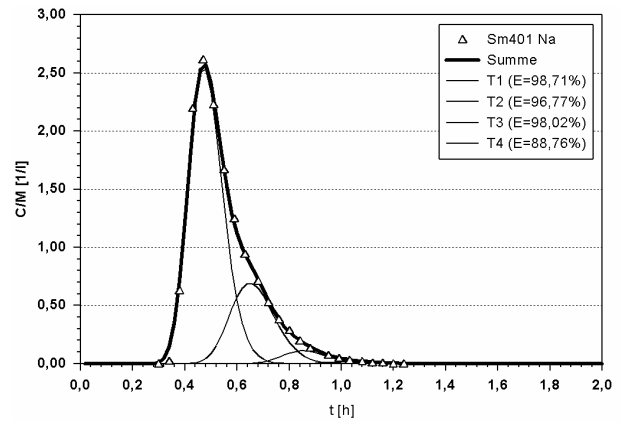
7.5.14 Sm205



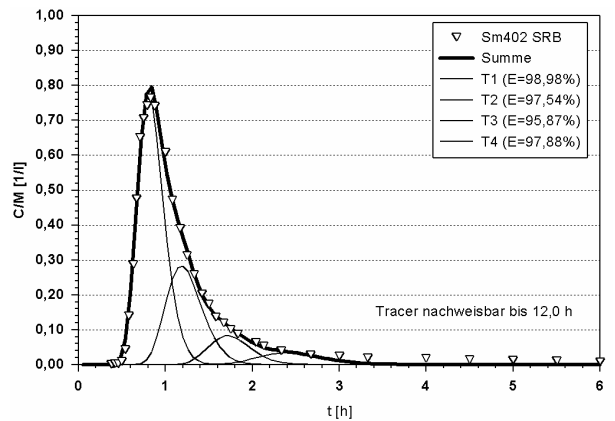
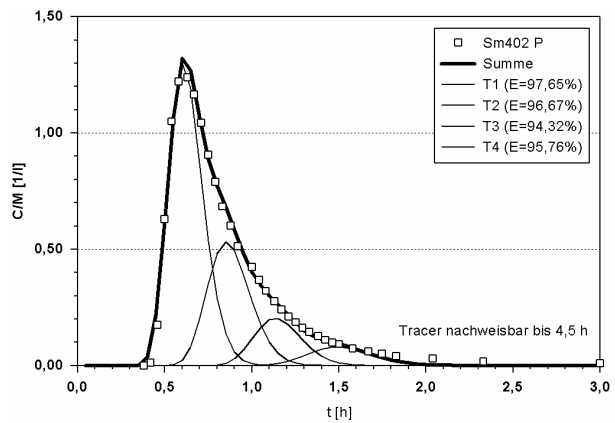
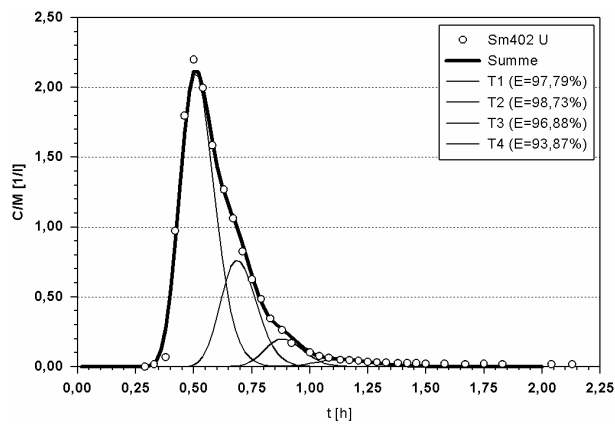
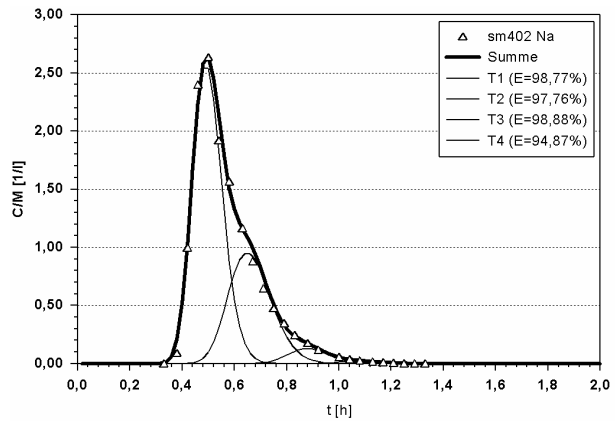
7.5.15 Sm206



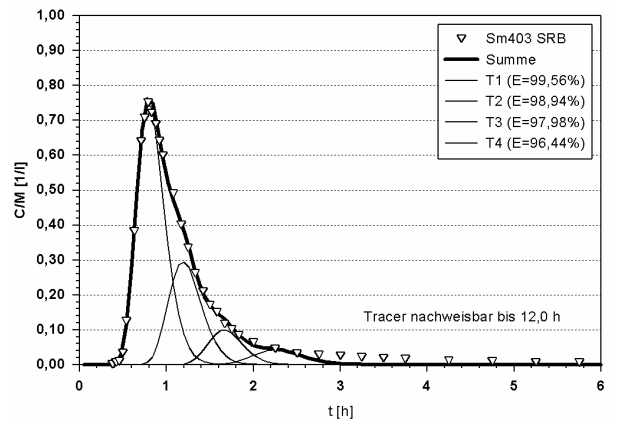
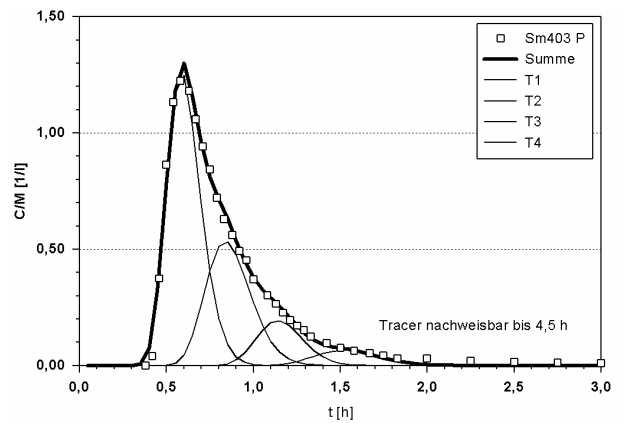
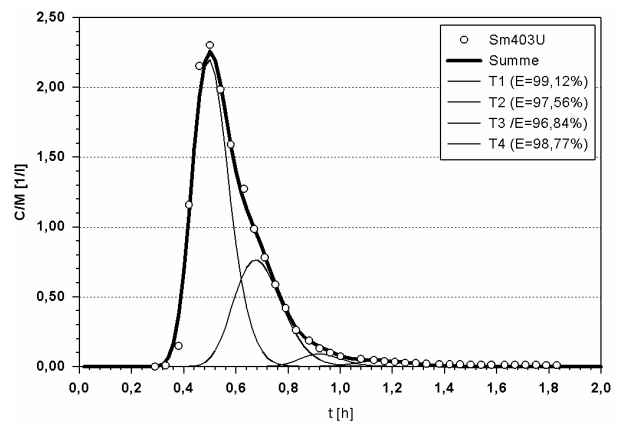
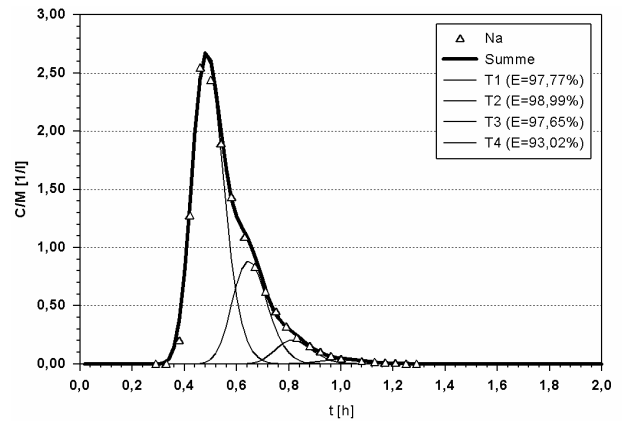
7.5.16 Sm401



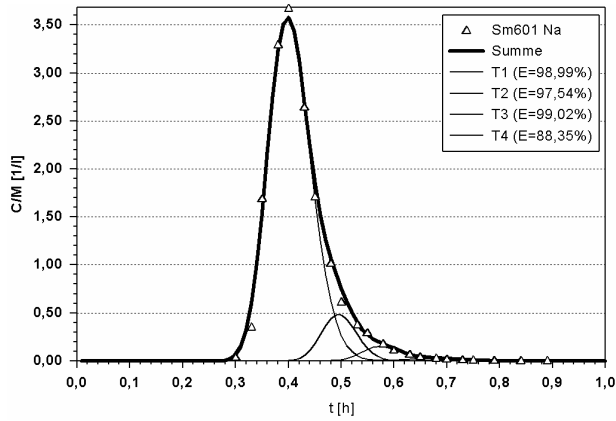
7.5.17 Sm402



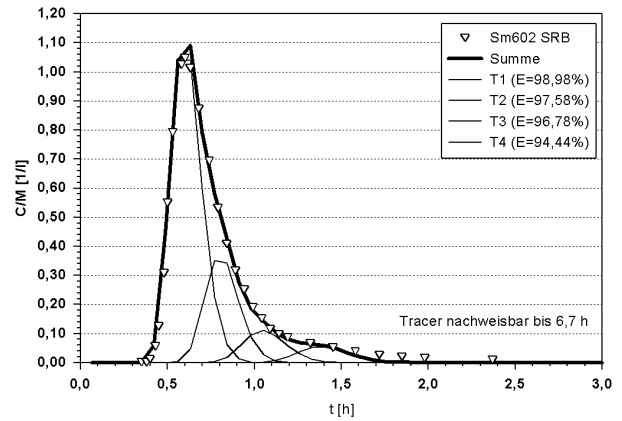
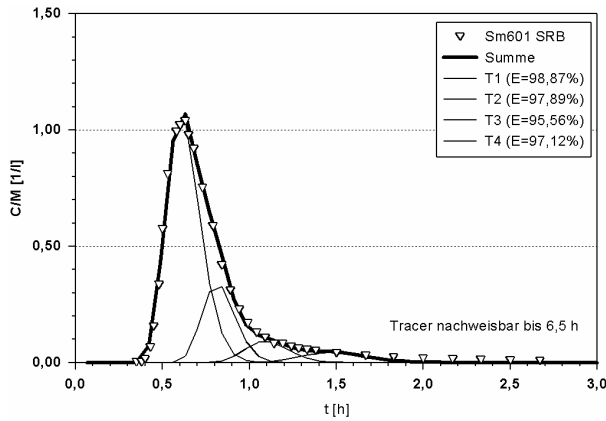
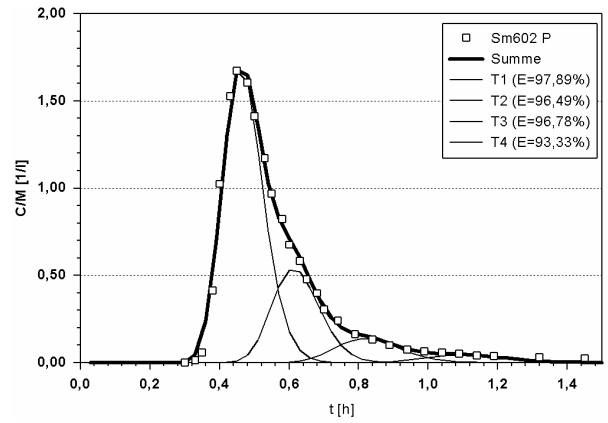
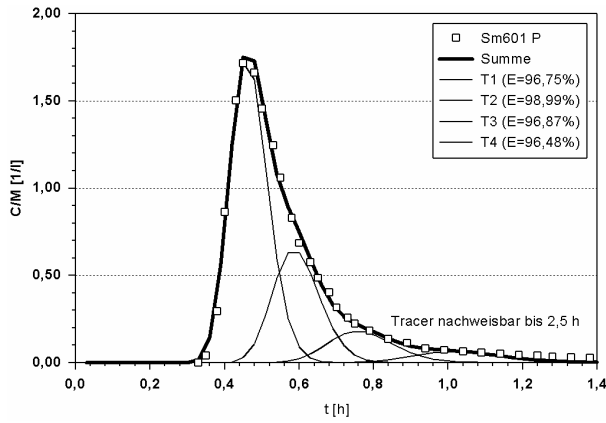
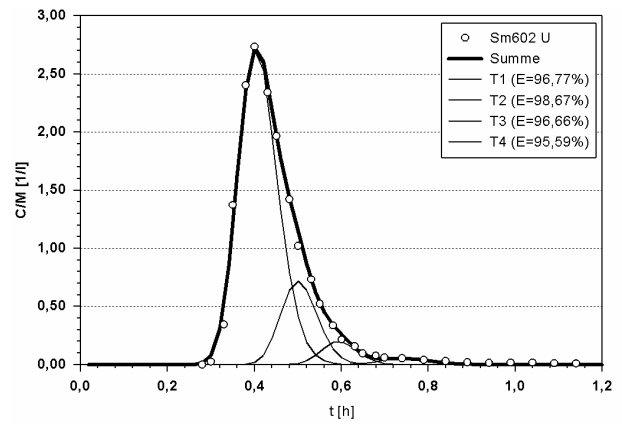
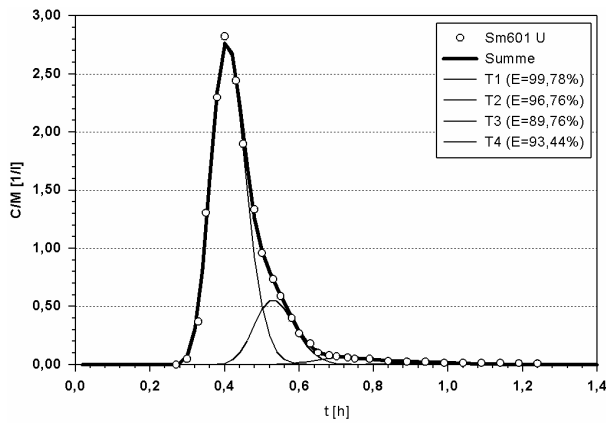
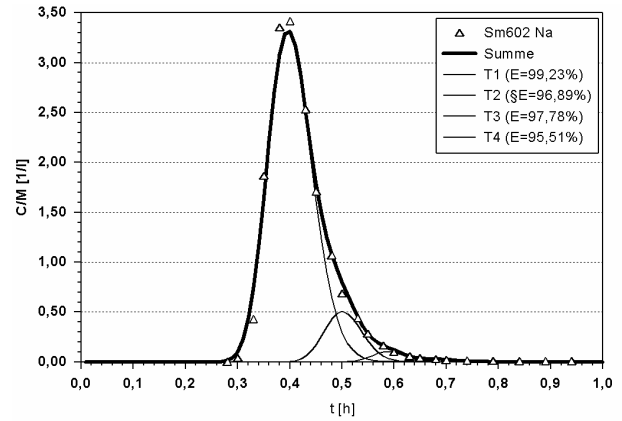
7.5.18 Sm403



7.5.19 Sm601

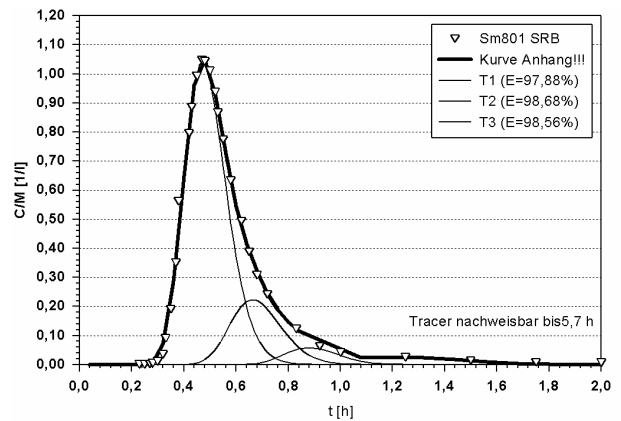
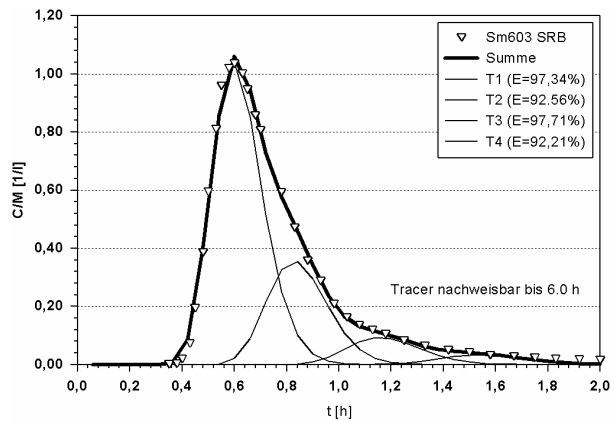
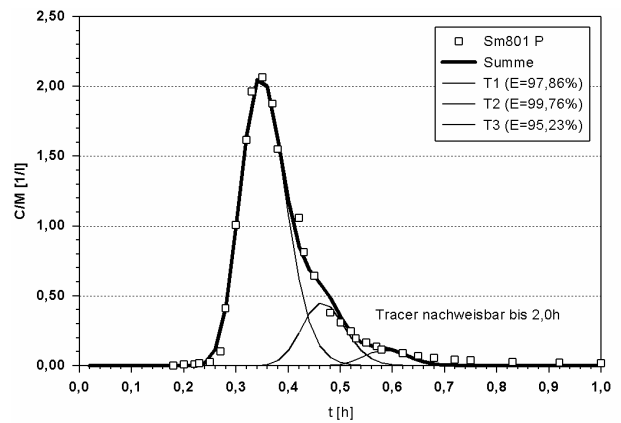
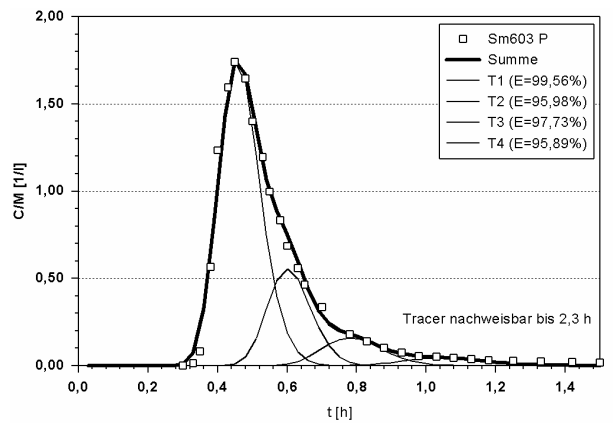
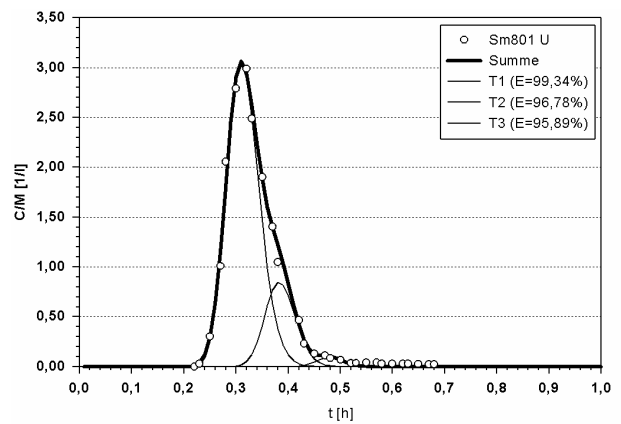
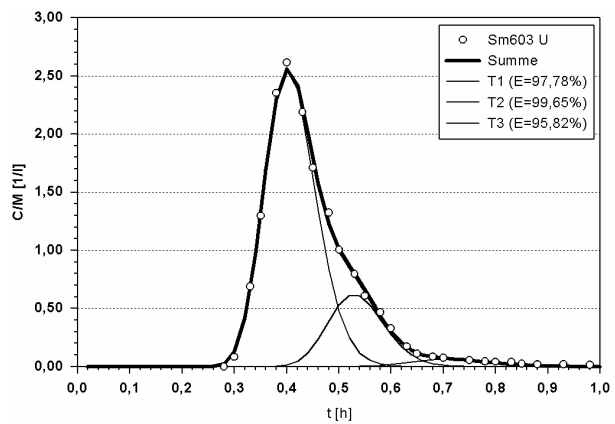
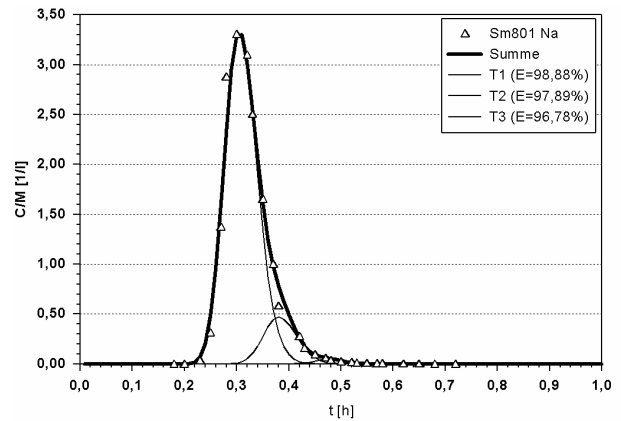
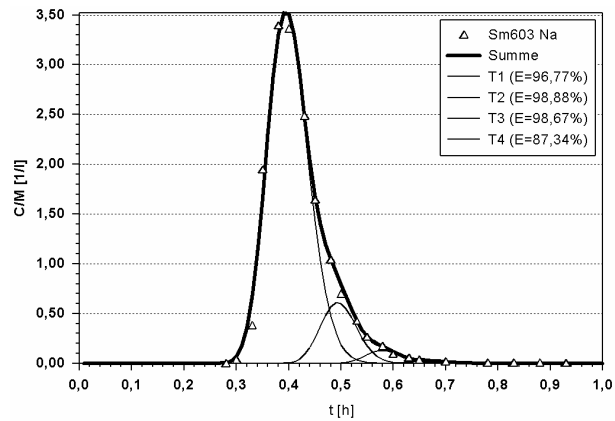


7.5.20 Sm602

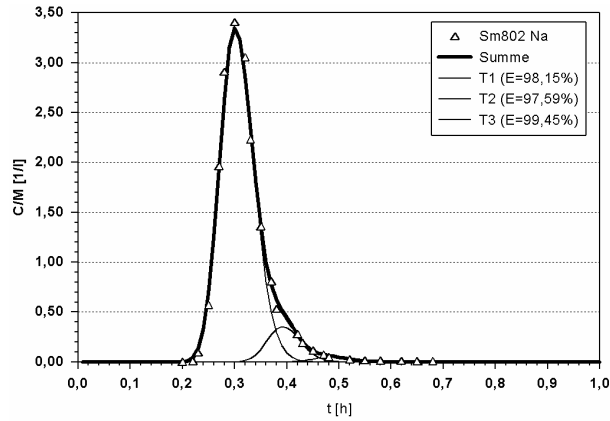


7.5.21 Sm603

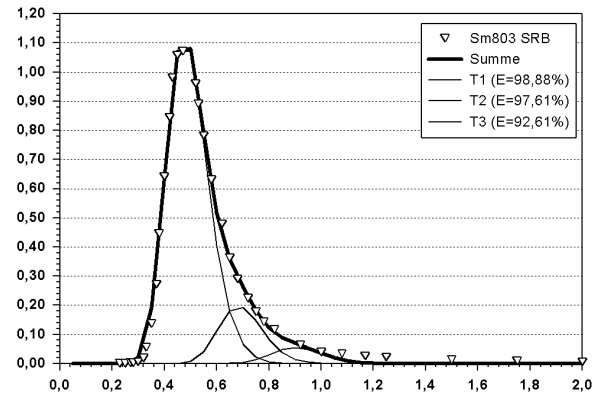
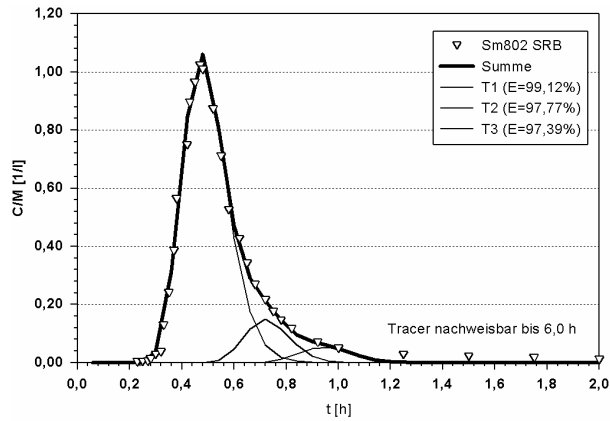
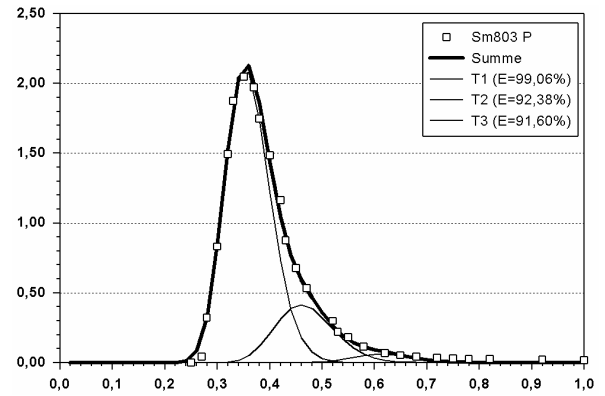
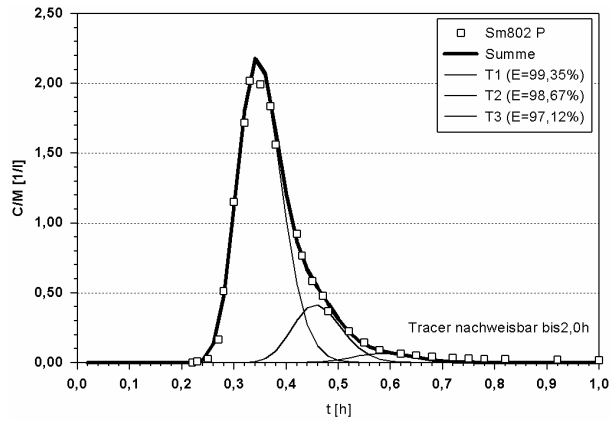
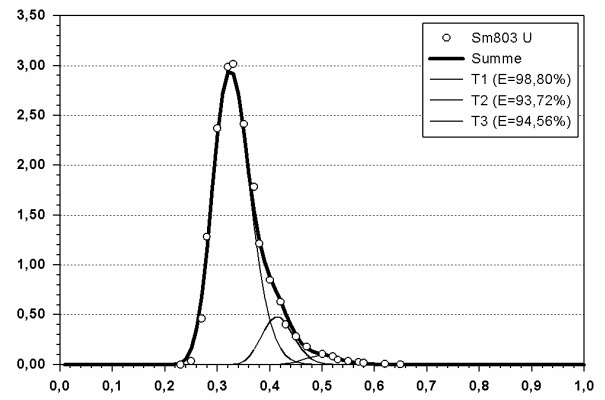
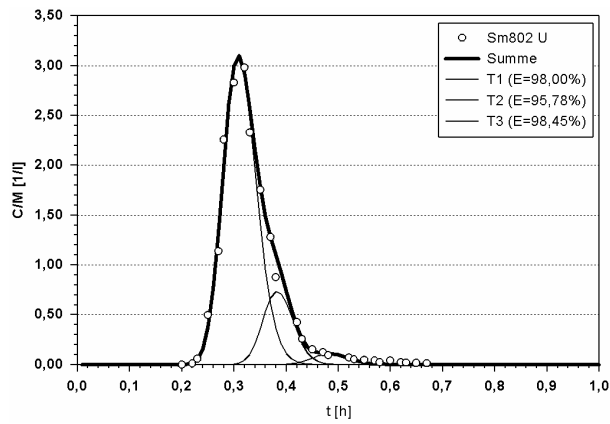
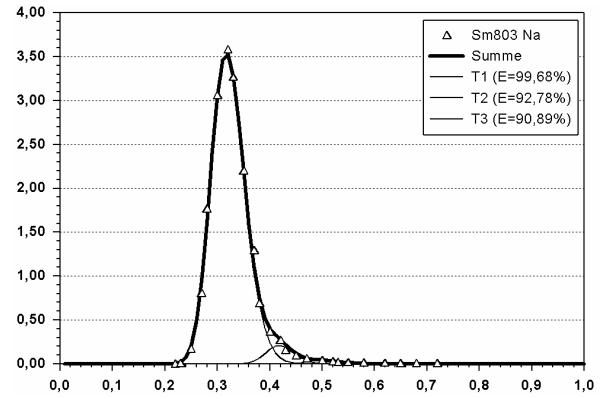
7.5.22 Sm801



7.5.23 Sm802



7.5.24 Sm803



7.6 Versuchsanlage Tank

7.6.1 Verwendete Materialien und Geräte

VERSUCHSANLAGE TANK		
Versuchstank		
Glasbecken	Glas, Wandstärke 10 mm, Stahlrahmen L × B × H: 1,50 m × 0,5 m × 0,75 m	
Stahlgestell	Stahl, L × B × H: 1,50 m × 0,5 m × 0,75 m	
Hebevorrichtung	Wagenheber Hi-Lift, Hubhöhe 1,5 m; Fa. Därr	
Beregnungsanlage		
Pumpe	Masterflex 7521-35	
	Masterflex Economy Drive 7554-52	
Pumpenköpfe	Masterflex 7014-20	
	Masterflex 7015-20	
Pumpenschläuche	Masterflex 5402-14 Norprene	
	Masterflex 5402-15 Norprene	
Schläuche	PVC, diverse Abmessungen	
Messtechnik		
PC		
Messkarte	ME-300; Fa. Meilhaus	
Relaiskarte	PC 263; Fa. Amplicon	
Drucksonde (Tensiometer)	Differenzdruckaufnehmer 204D; Fa. Setra, USA	
Switchwafer	W1260/1P-12T; Fa. Scanivalve Corp., USA	
Controller	Solenoid Controller CTLR 10P/S2-S6; Fa. Scanivalve Corp., USA	
Tensiometer	Keramikerze	Keramik P 80, Länge 80 mm, Durchmesser 6,5 mm Wandstärke 0,75 mm, Porengröße 0,001 mm; Fa. KPM
	Außenschlauch	PE, 3×5 mm
	Innenschlauch	PVC, 1×2 mm
	Kanüle	Erosa-Injektionskanüle, 0,9×40 mm, Luer, steril
	Winkelstück	PP, ID 3 mm
	Absperrventil	PC, Luer-Lock-System
	3-Wege-Hahn	PC, Luer-Lock-System
Temperatursonden	PT 100-Sonden, Typ wk 63.2; Fa. Tmg	
Messumformer für PT 100	LKM 214; Fa. Geratherm	
Leitfähigkeitssonden	Elektroden Edelstahl 4301, Isolierkörper POM, Kabel PVS 5,3 mm AD; Fa. Pero	
Drucksonde (KS-Abfluss)	Fa. Campbell Scientific; USA	
Verstärker für Drucksonde	LAU 64.200; Fa. Sensor Techniques Limited	
Kippwaage (KBS-Abfluss)	ARG100; Fa. Campbell Scientific; USA	
Feldfluorimeter	GGUN-FL02; Universität Neuchatel, Schweiz	
Probenautomat		
Probennehmer (Linearanordnung)	Eigenbau	

7.6.2 Einbauparameter

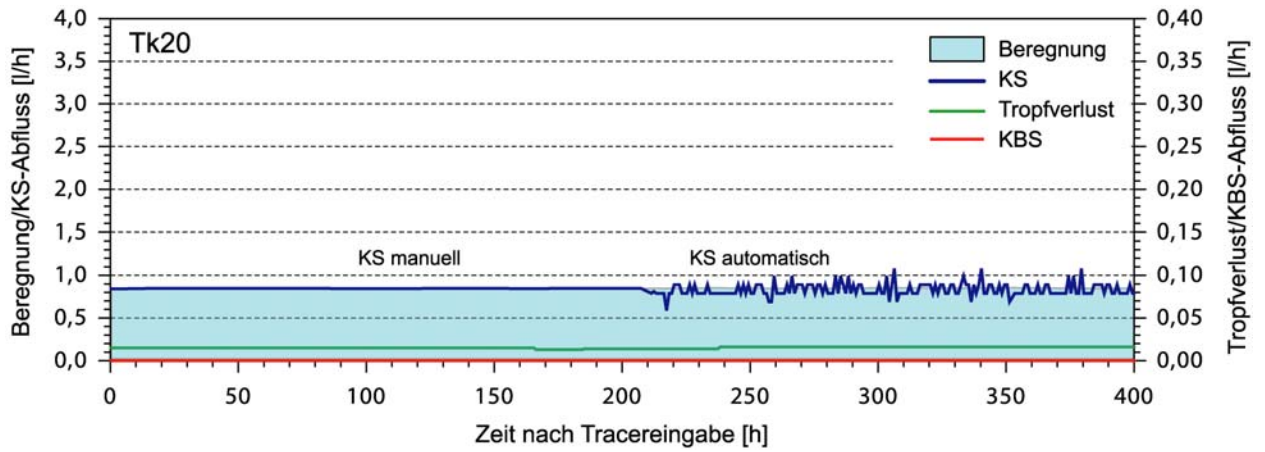
Versuchskapillarsperre		
Material	KS	KBS
Mächtigkeit [m]	0,40	0,15
Trockenmasse [kg]	480	210
Einbauwassergehalt [Gew.%]	2,5	1
Trockendichte [g/cm ³]	2,01	1,60
Porenanteil [-]	0,35	0,39
Trenngeotextil	nicht vorhanden	
Neigung	15,6°	
Tensiometer	12	-
LF-Sonden	14	-
Temperatursonden	1*	-
Belastung [l/d]	~20, ~40, ~60, ~80	

* zusätzlich eine Sonde für Raumtemperatur

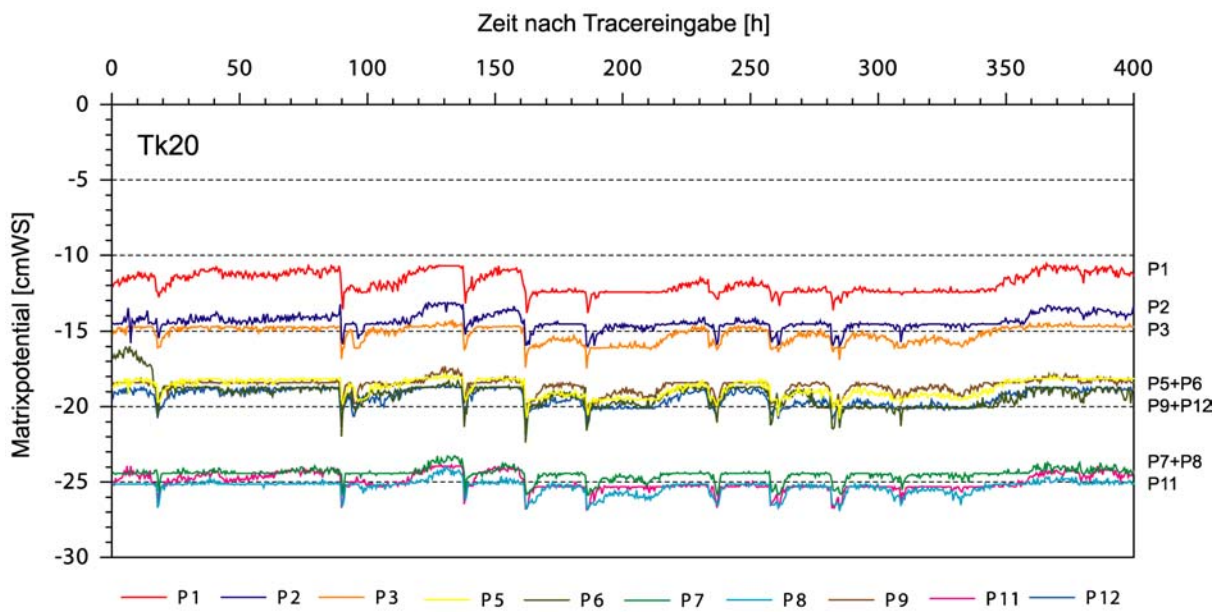
7.7 Tankversuche mit kontinuierlicher Eingabe

7.7.1 Tk20

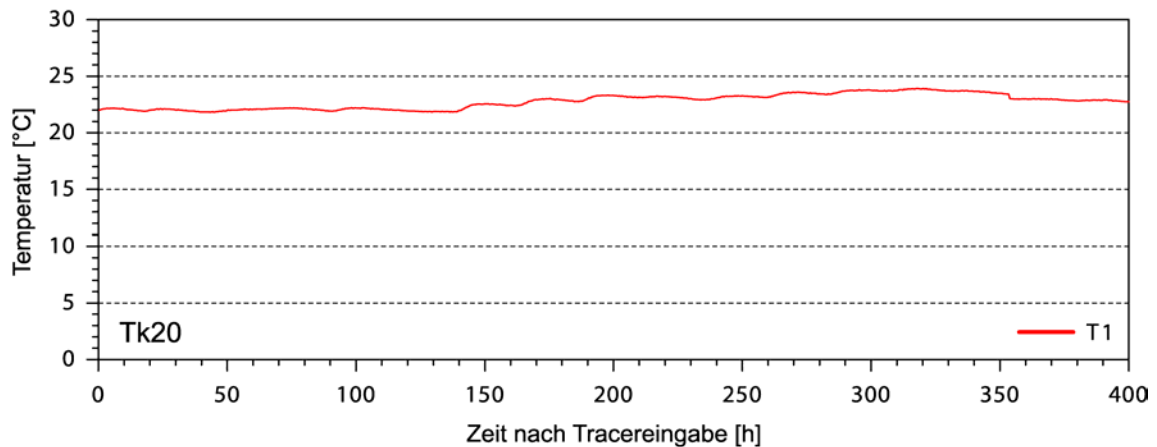
Abflussganglinien



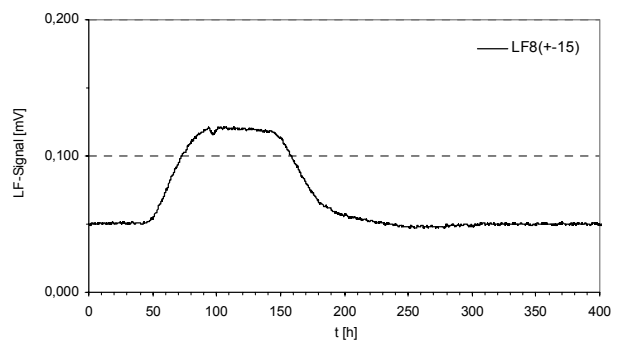
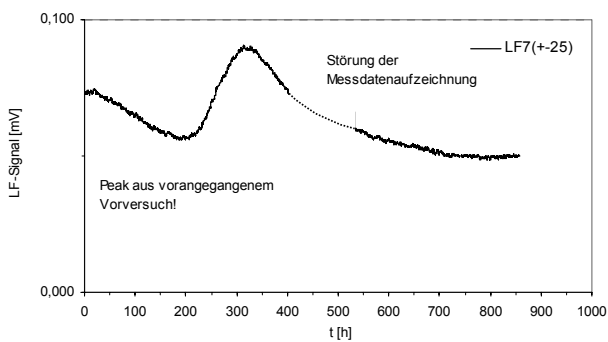
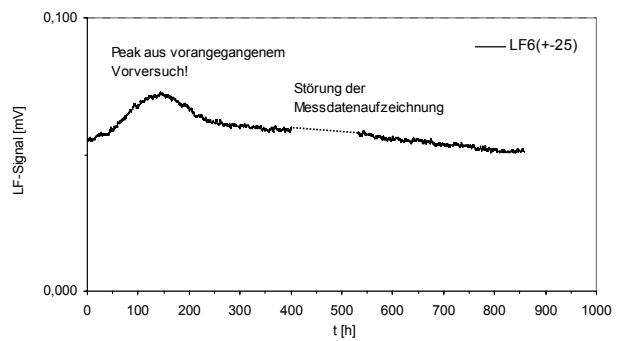
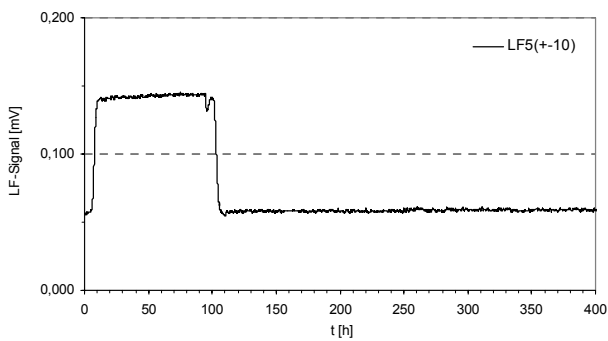
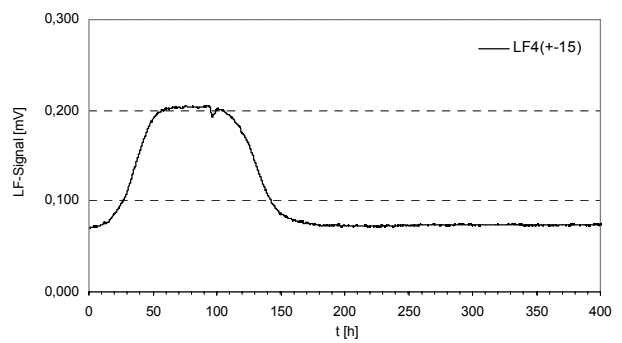
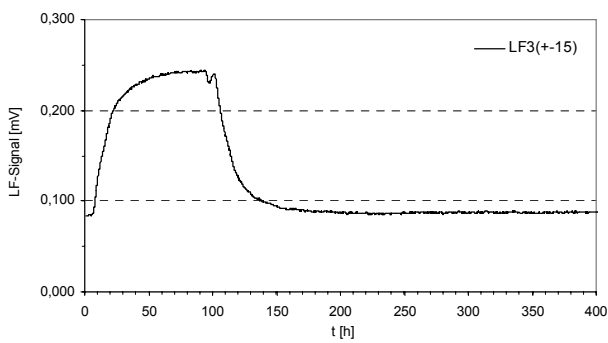
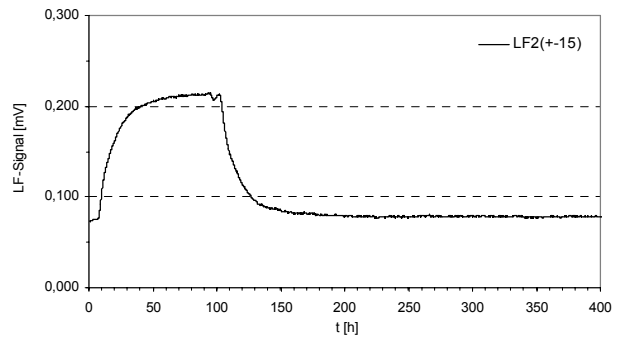
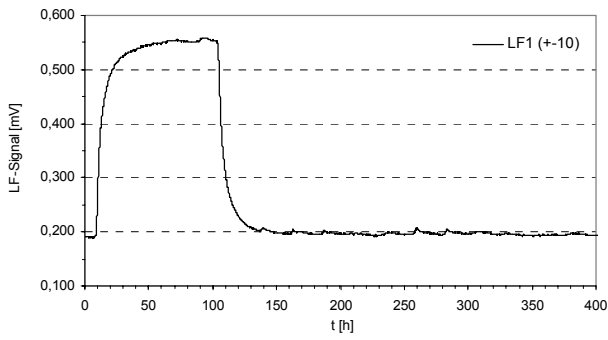
Matrixpotential

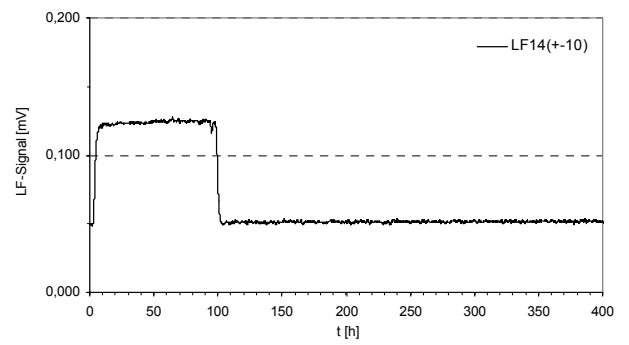
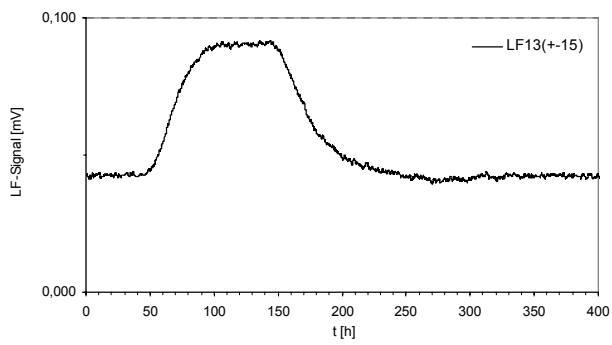
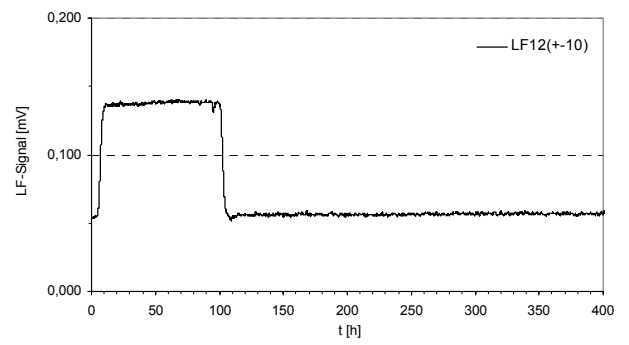
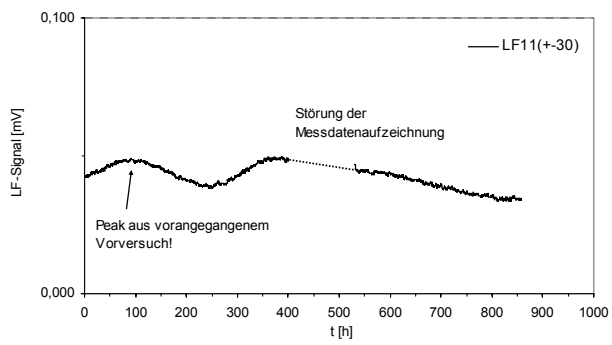
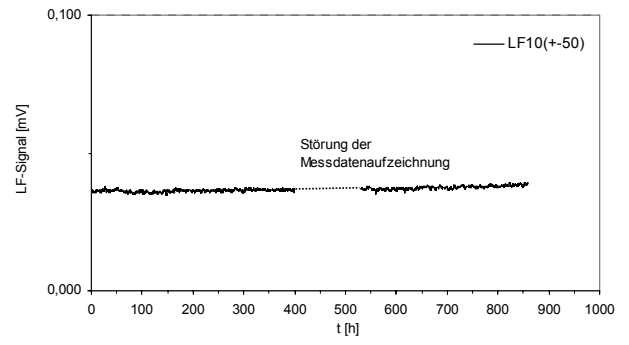
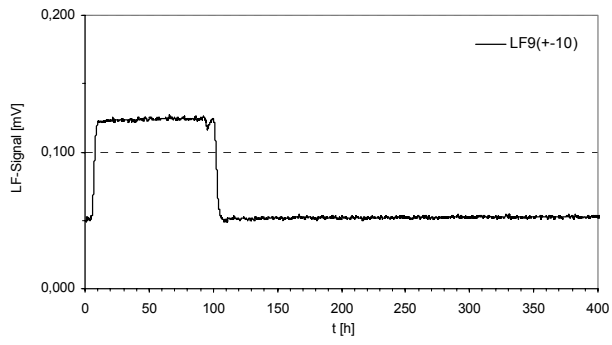


Temperatur



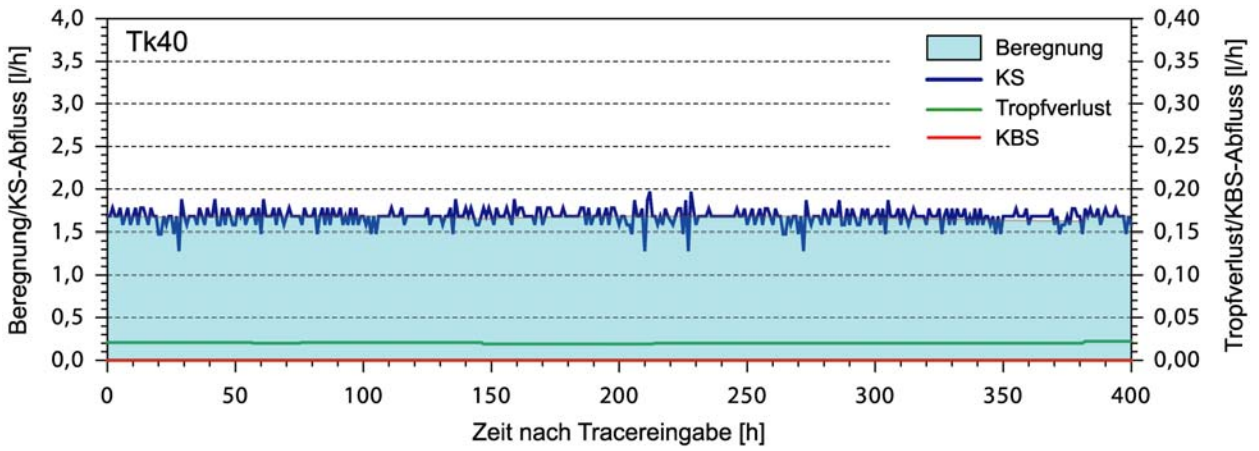
Messsignal der LF-Sonden



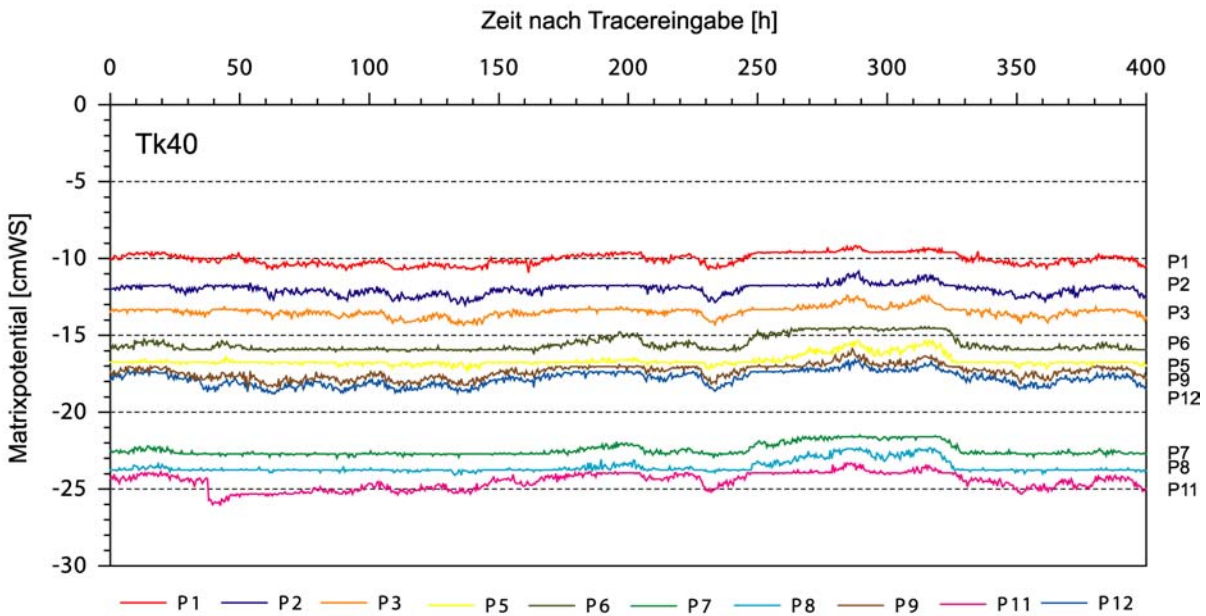


7.7.2 Tk40

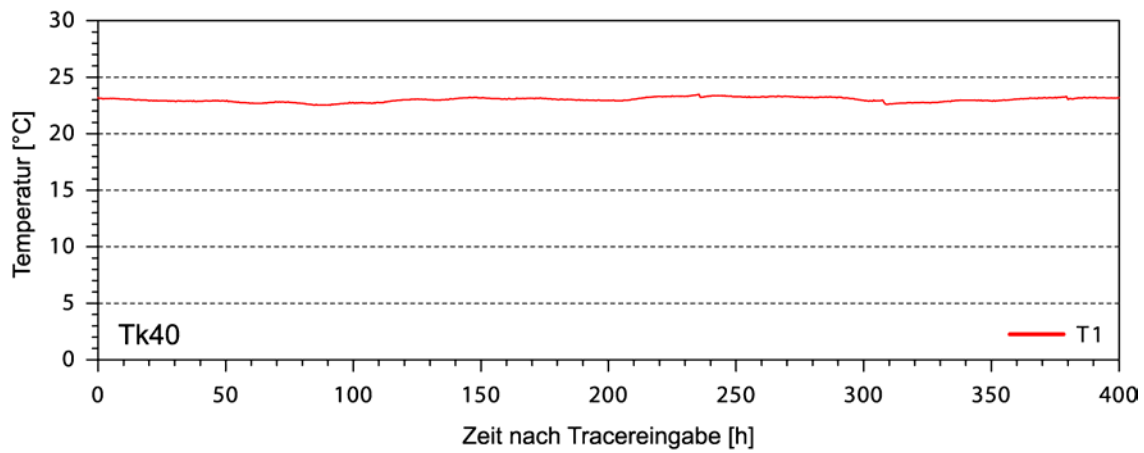
Abflussganglinien



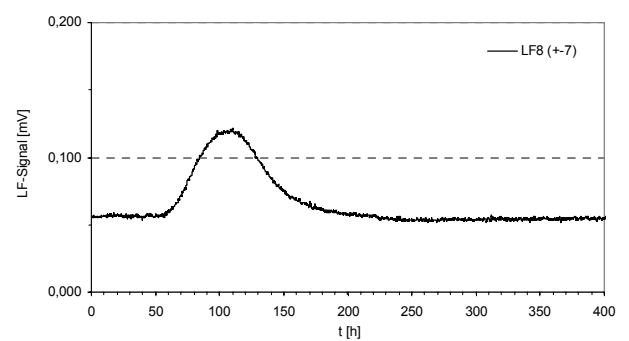
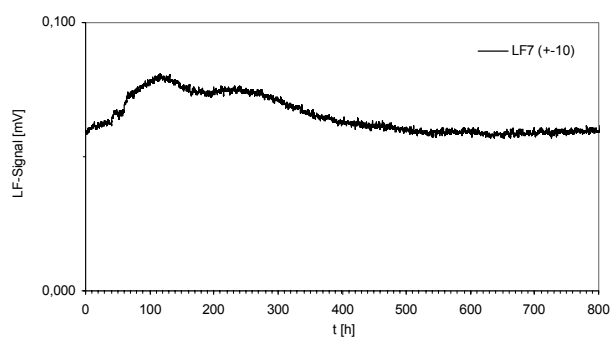
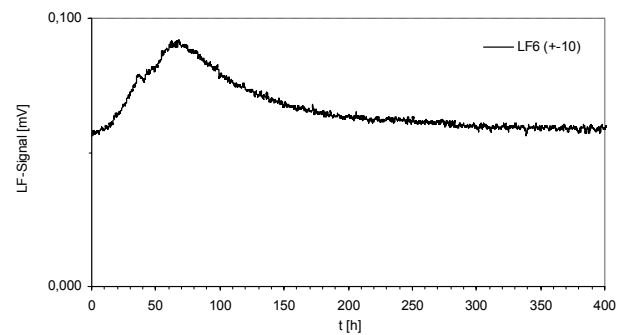
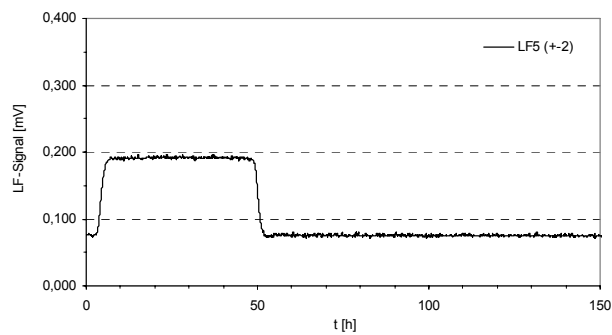
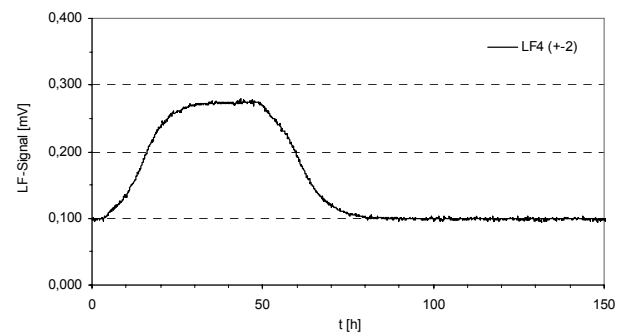
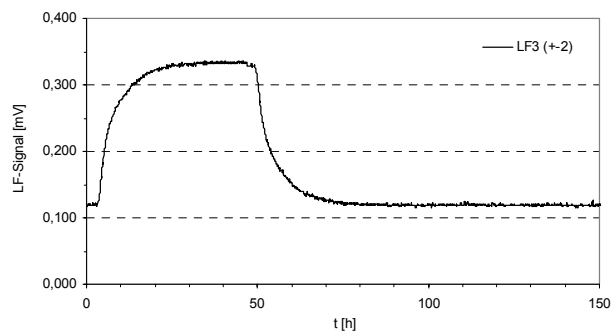
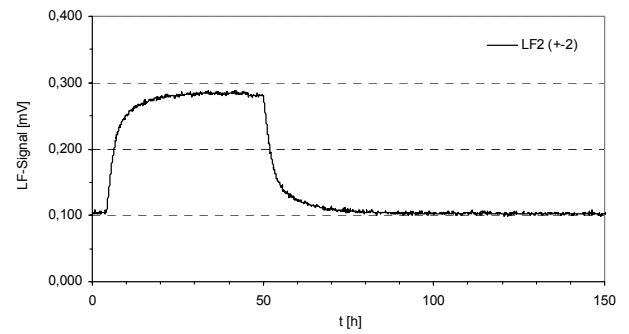
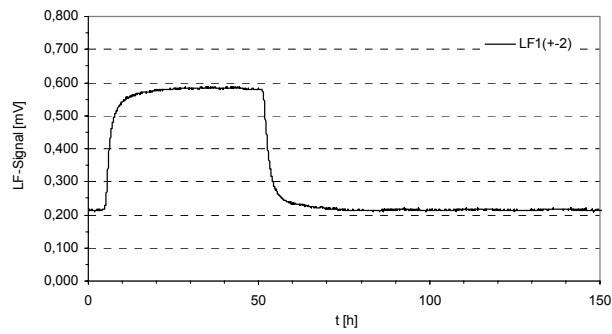
Matrixpotential

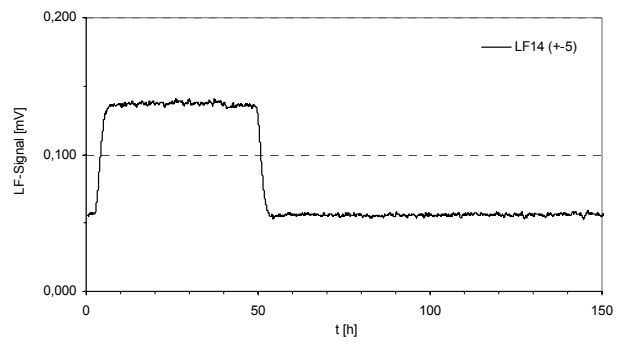
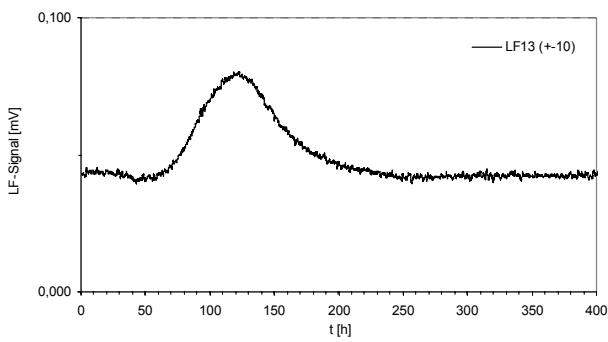
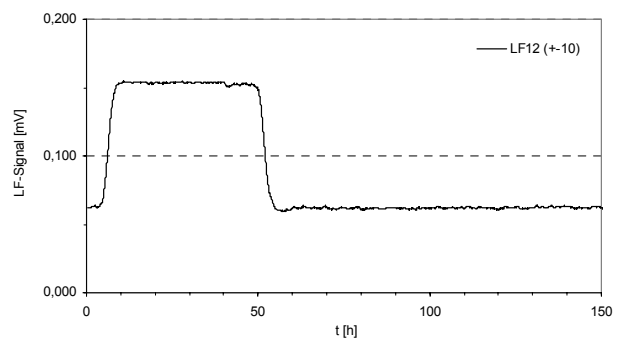
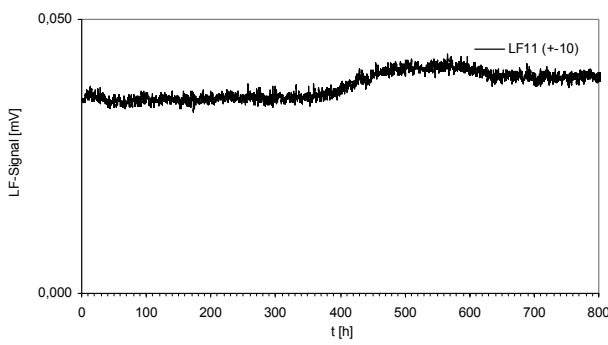
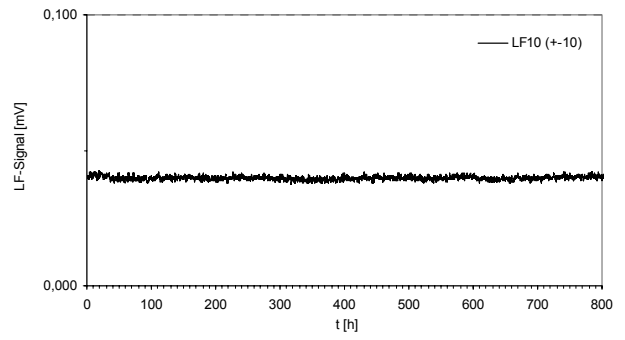
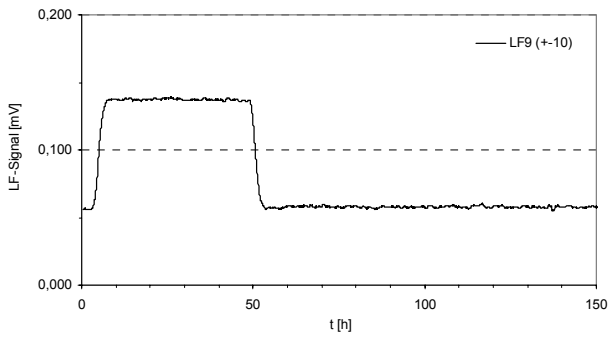


Temperatur



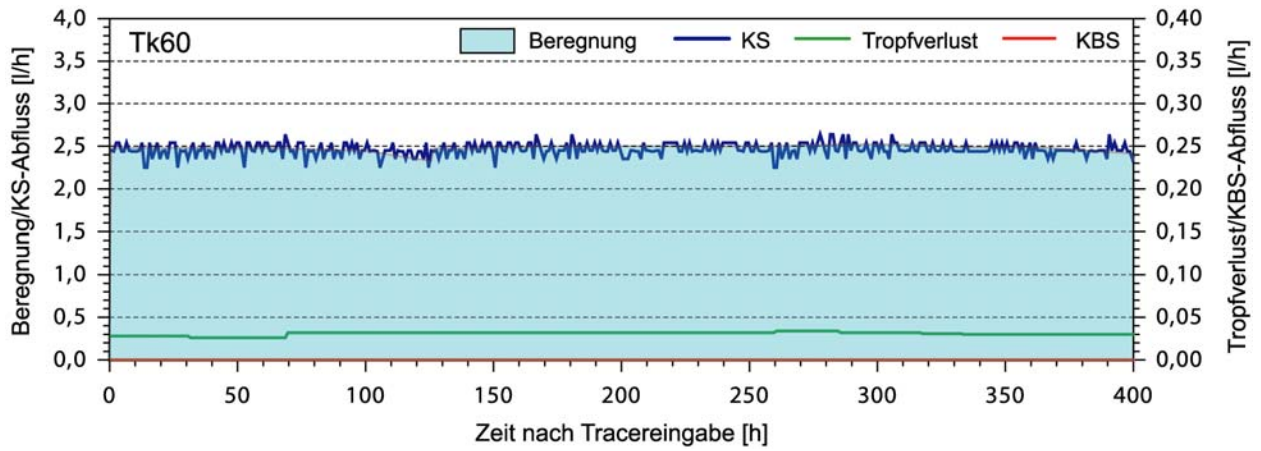
Messsignal der LF-Sonden



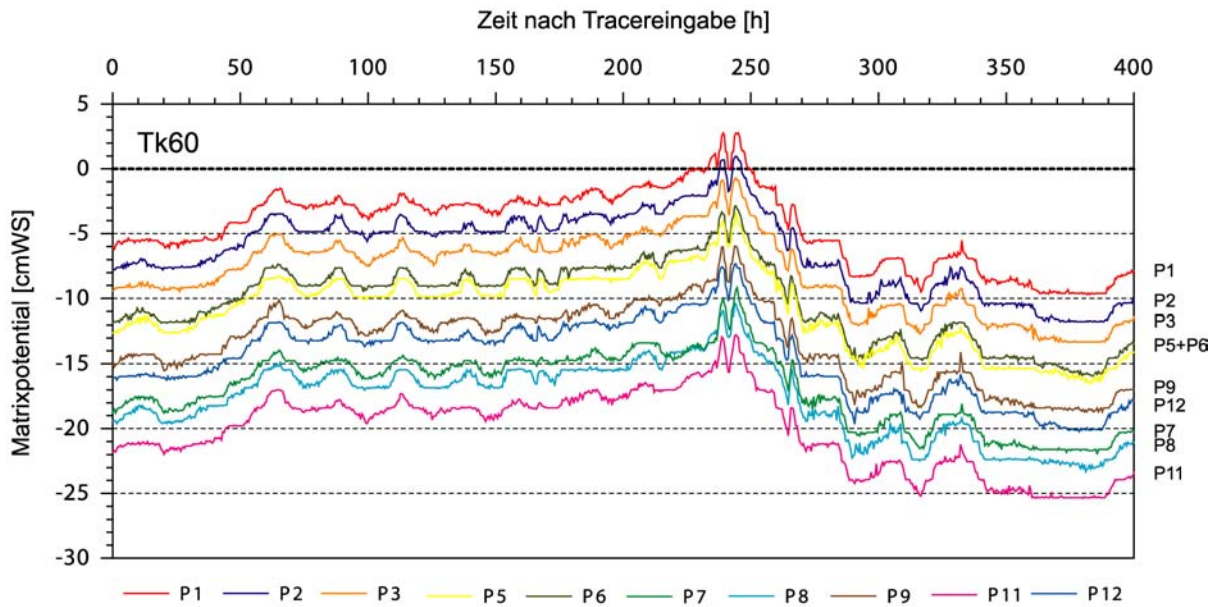


7.7.3 Tk60

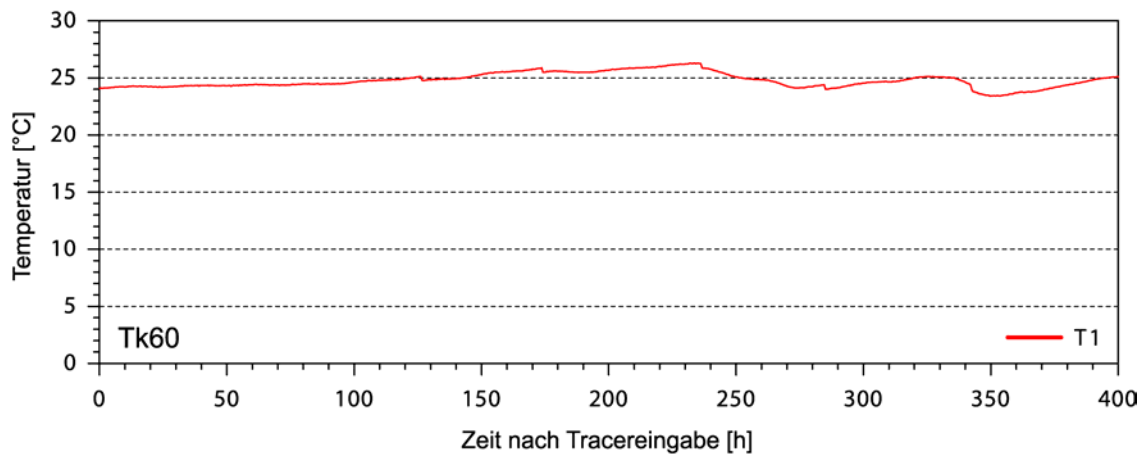
Abflussganglinien



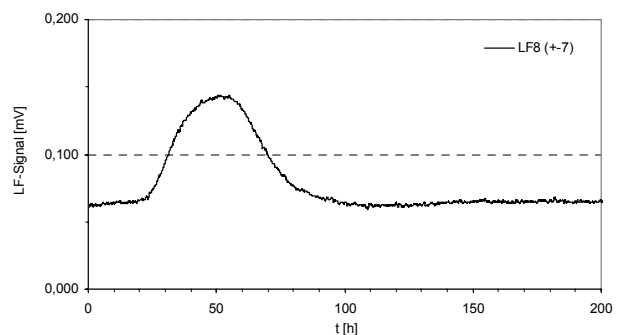
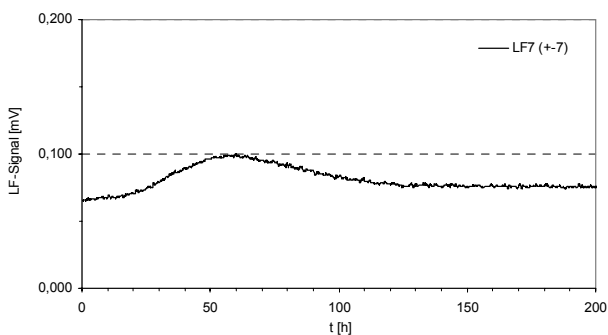
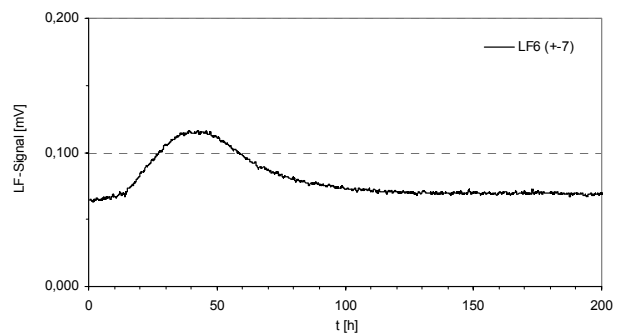
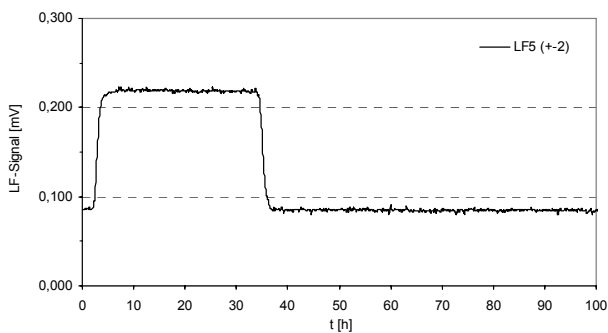
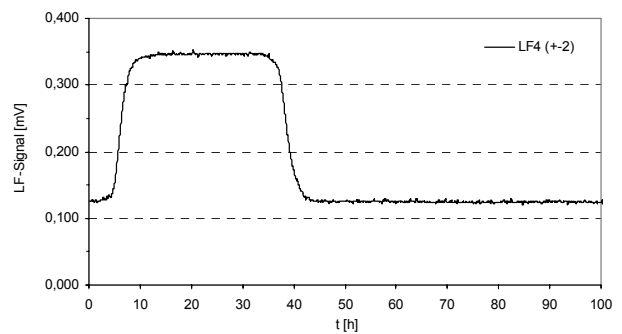
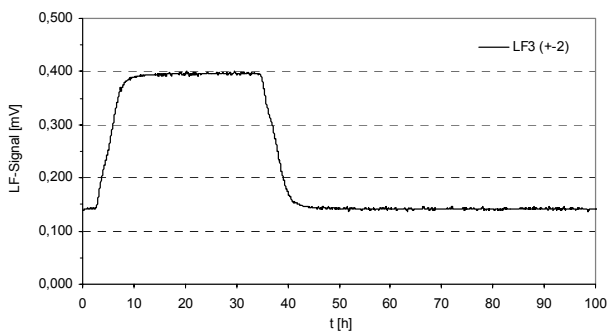
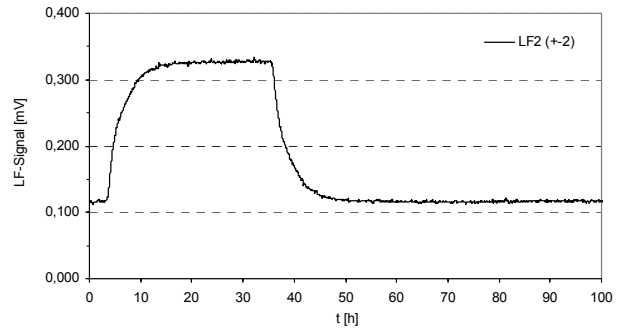
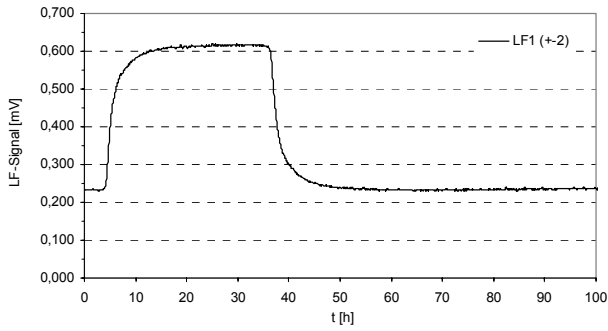
Matrixpotential



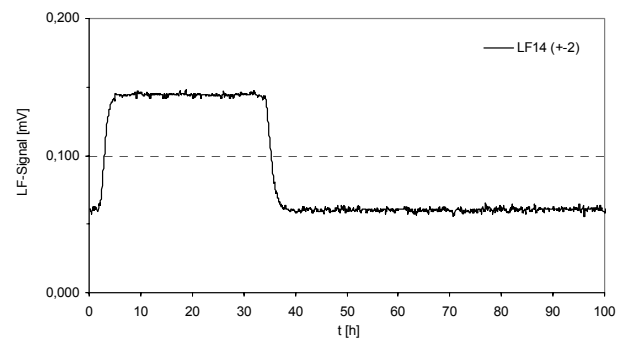
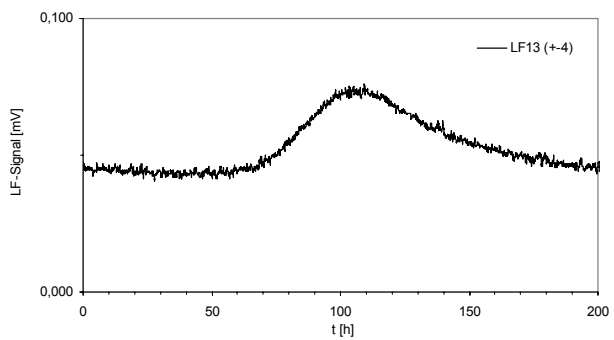
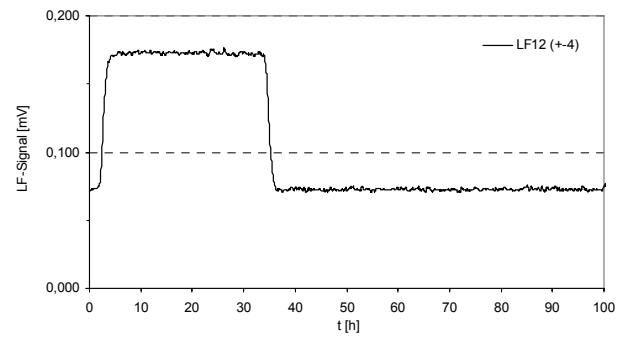
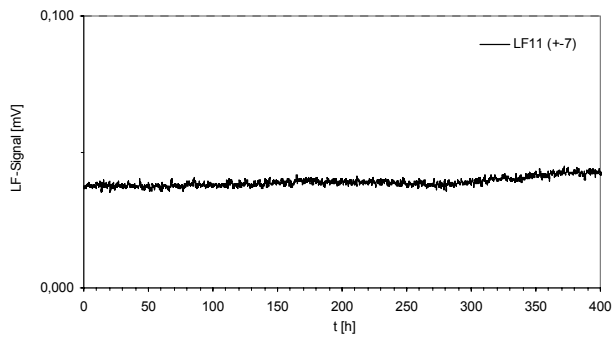
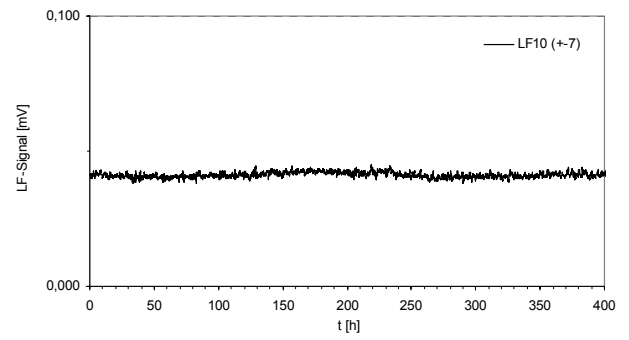
Temperatur



Messsignal der LF-Sonden

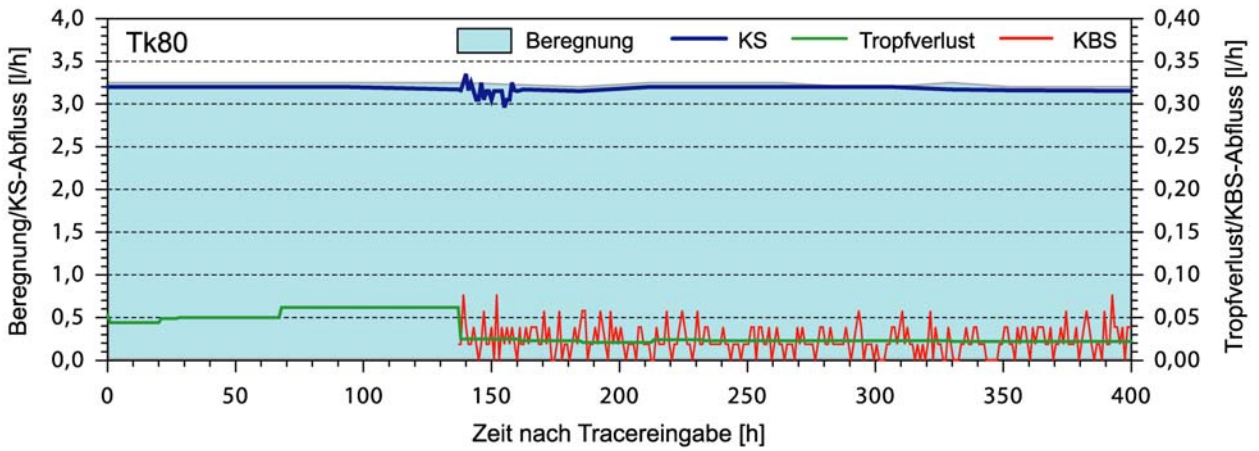


*Ausfall von Sonde LF9,
daher keine Messwerte vorliegend*

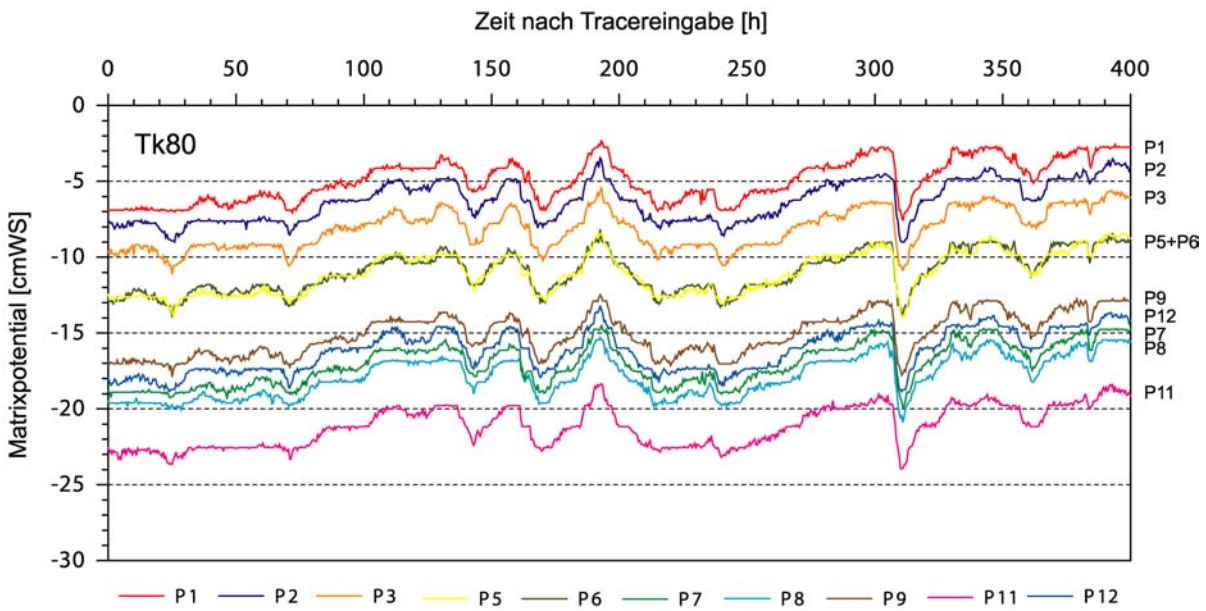


7.7.4 Tk80

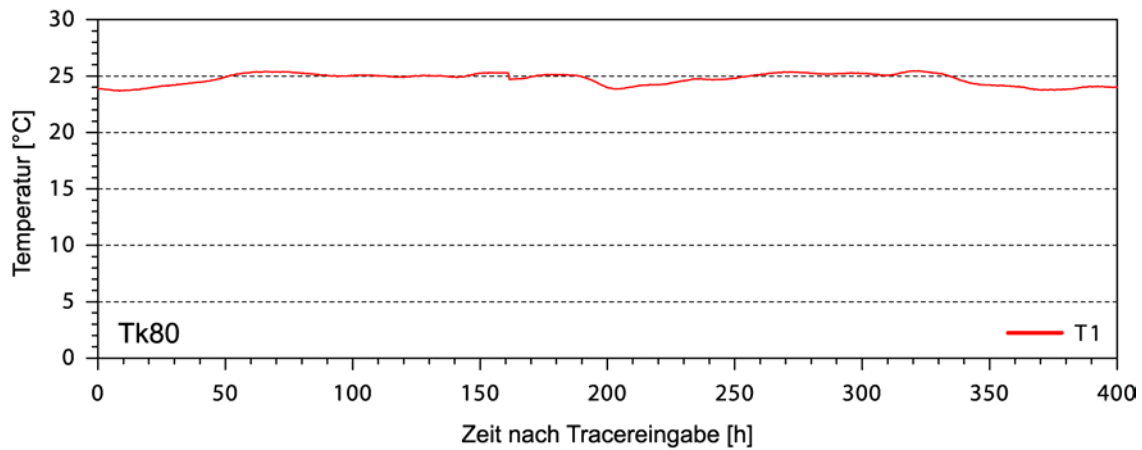
Abflussganglinien



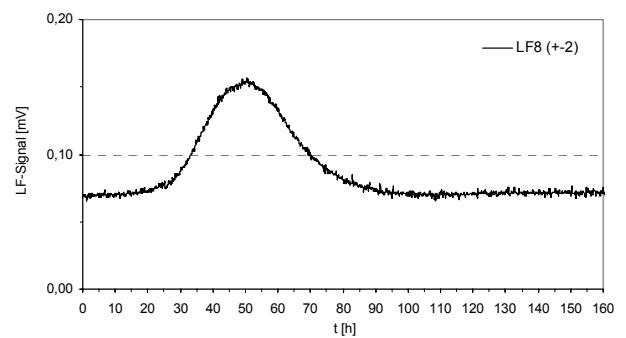
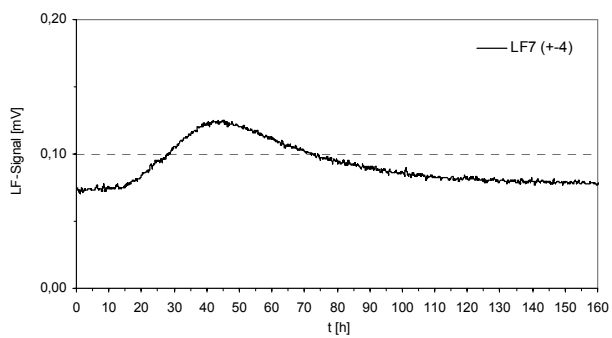
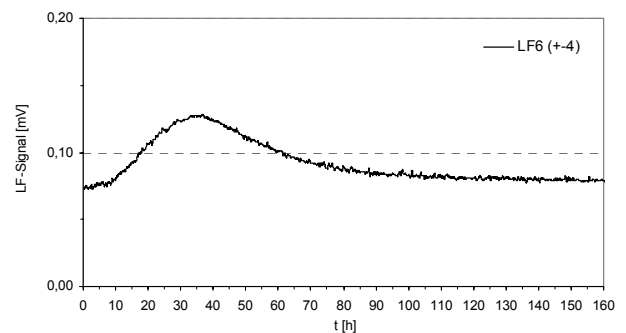
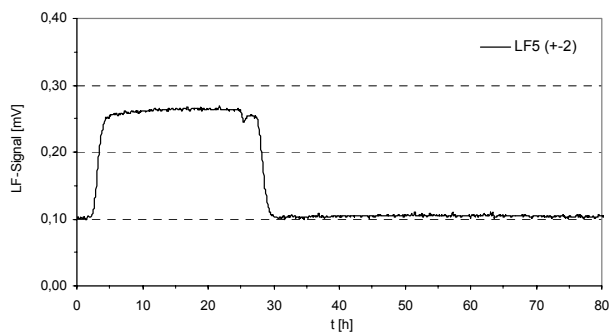
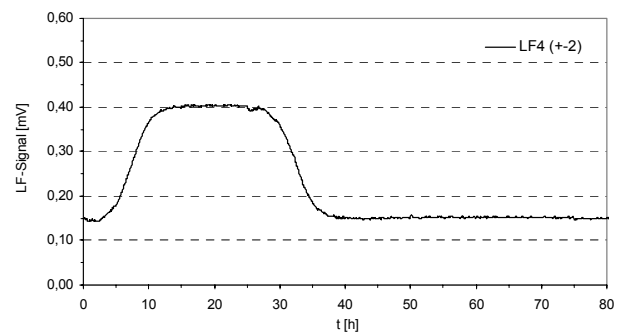
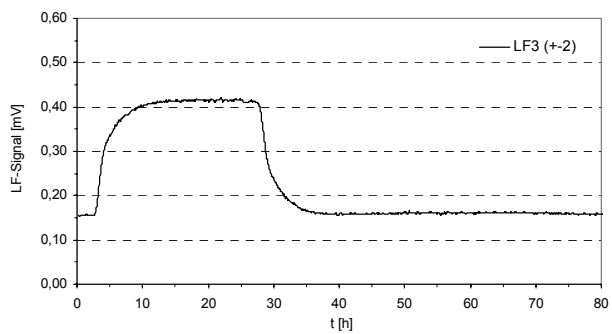
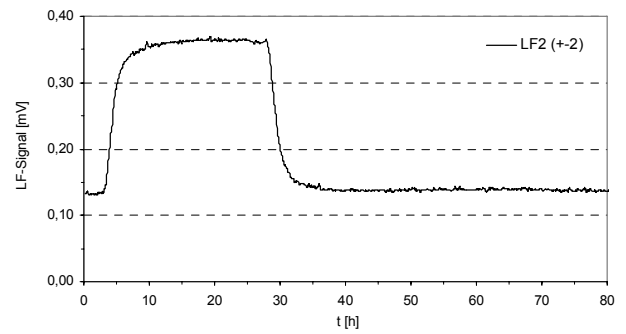
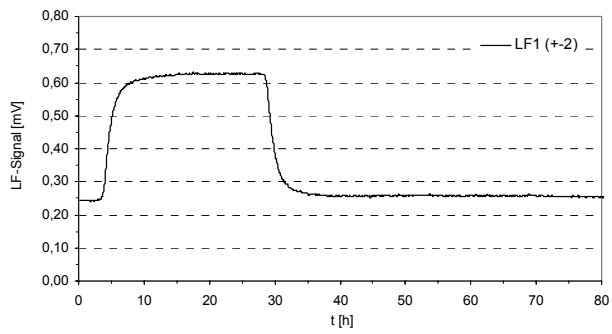
Matrixpotential



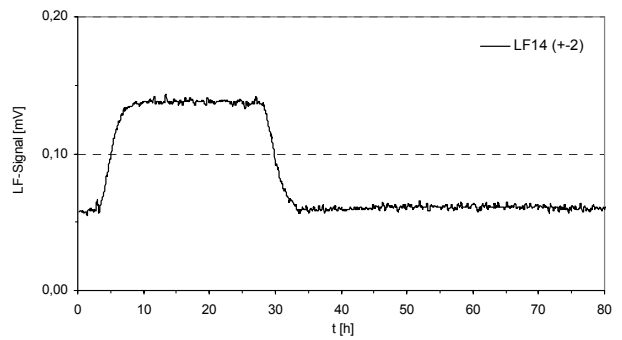
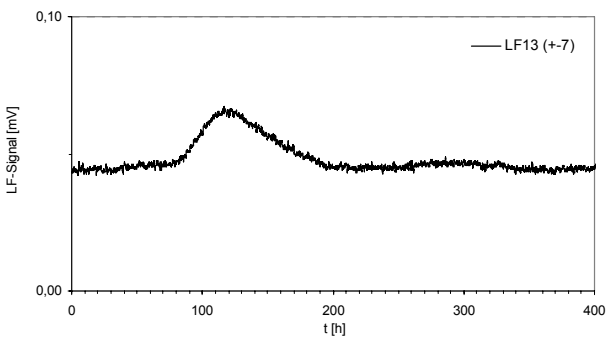
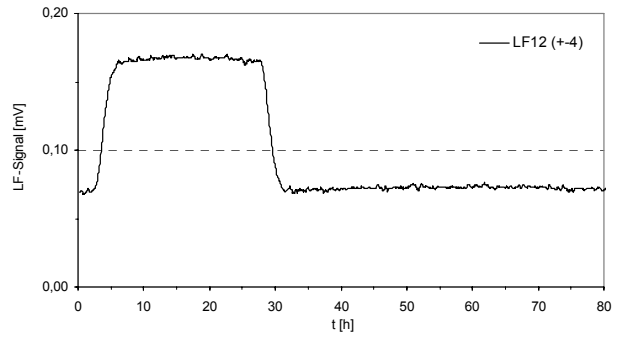
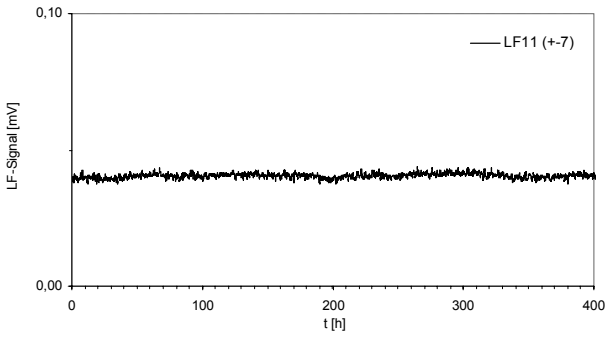
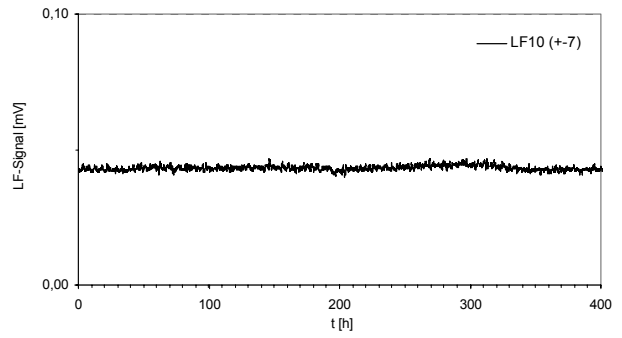
Temperatur



Messsignal der LF-Sonden



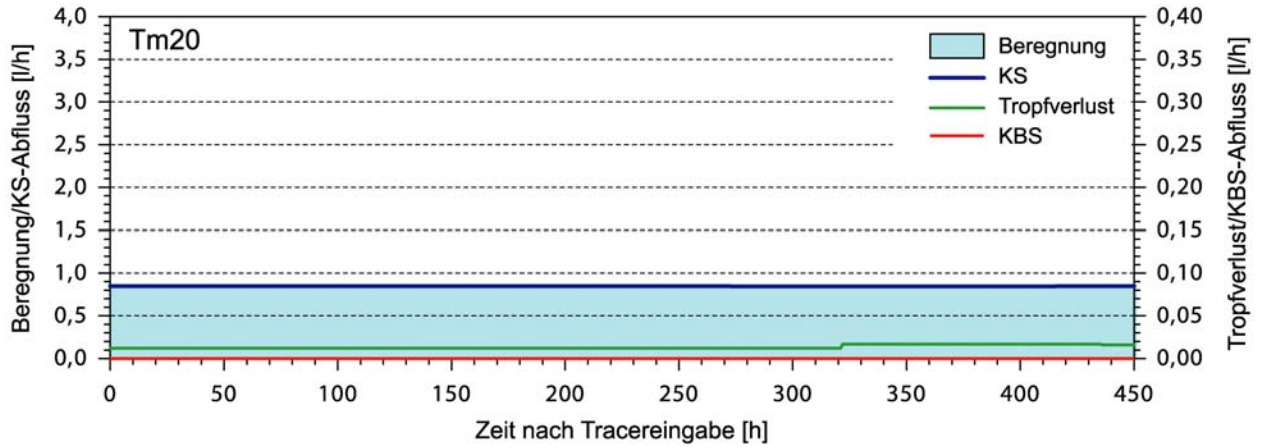
*Ausfall von Sonde LF9,
daher keine Messwerte vorliegend*



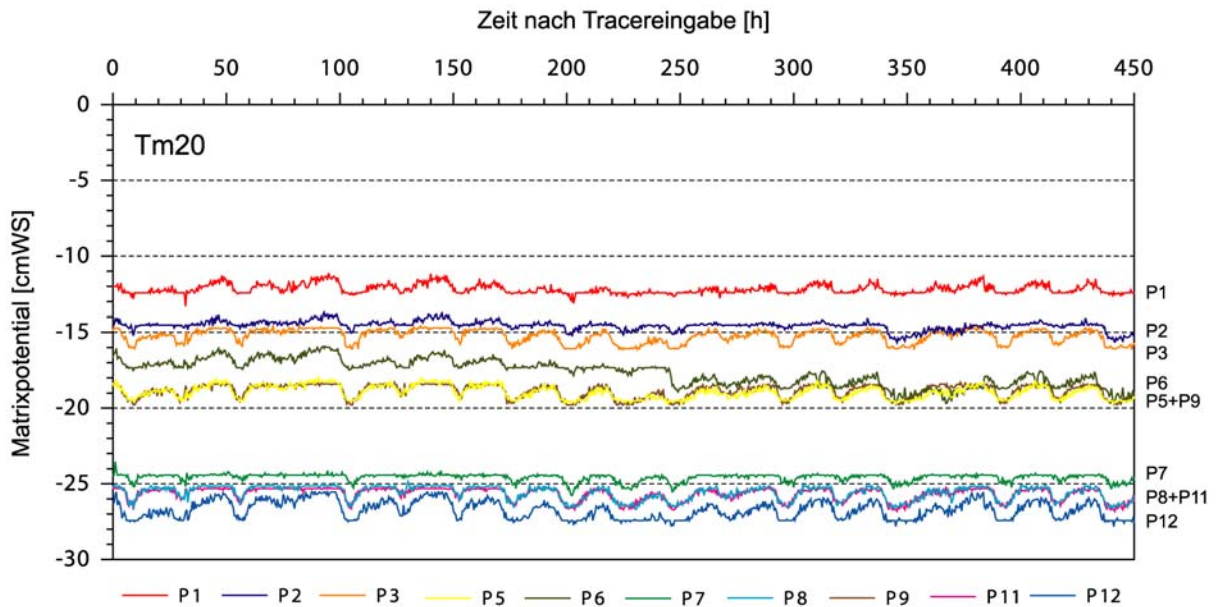
7.8 Tankversuche mit momentaner Eingabe

7.8.1 Tm20

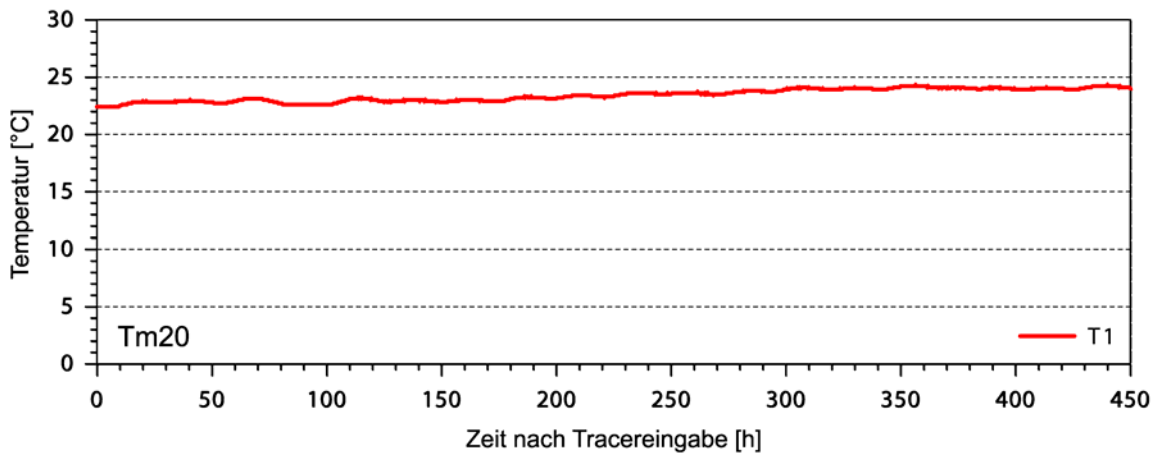
Abflussganglinien



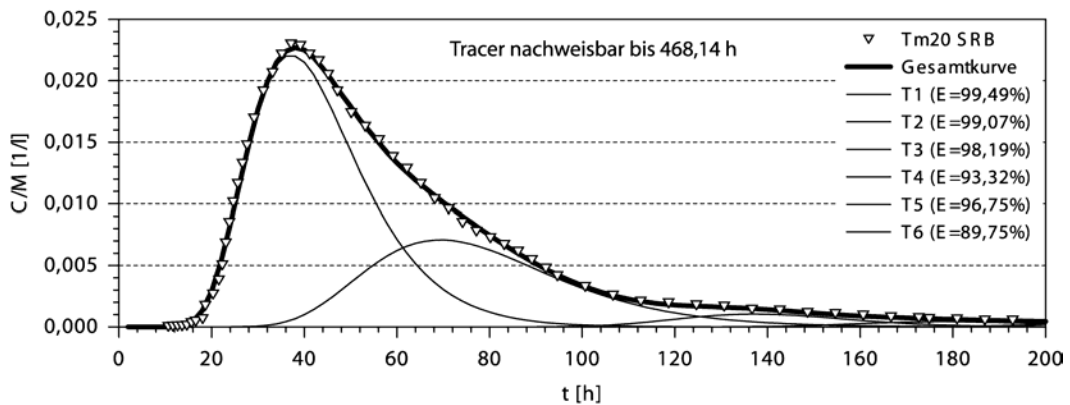
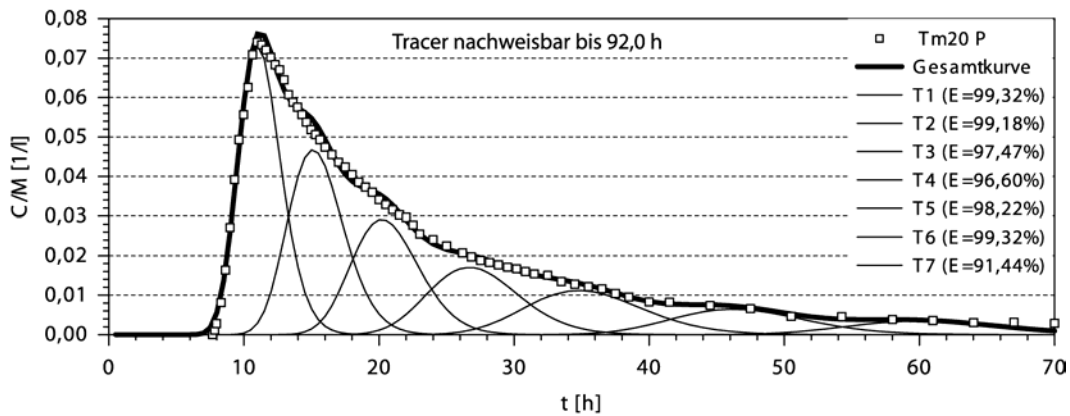
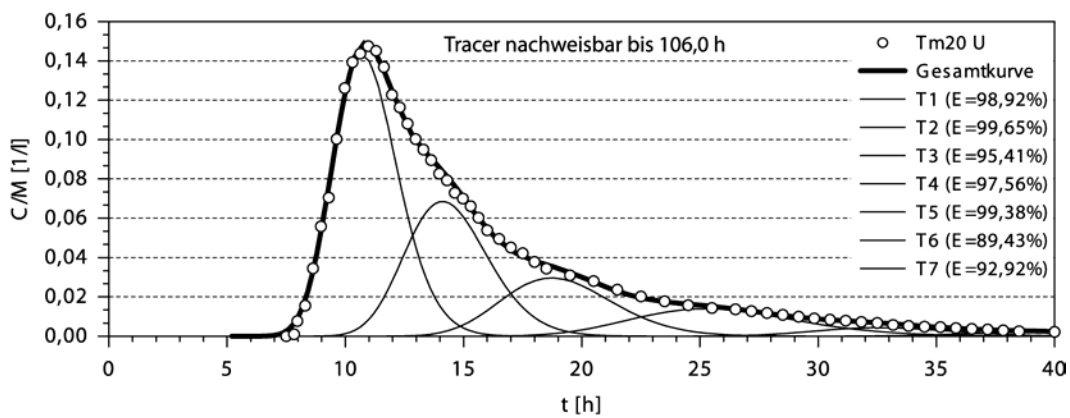
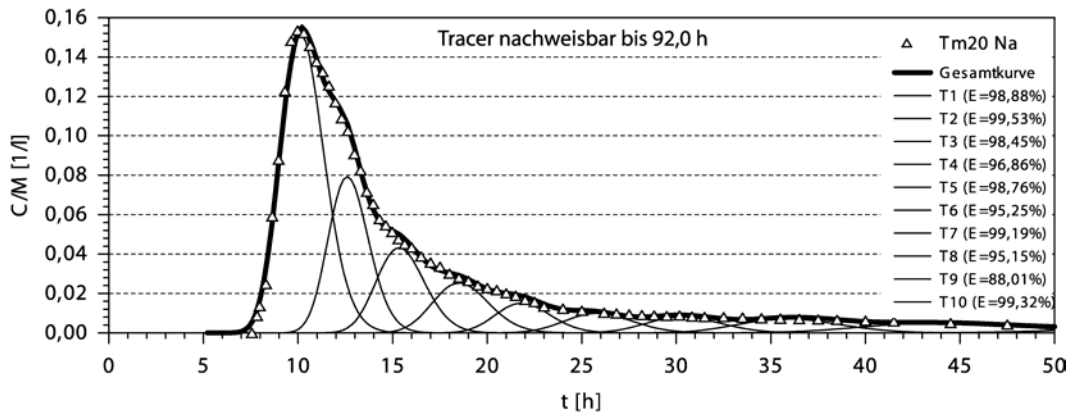
Tensiometer



Temperatur

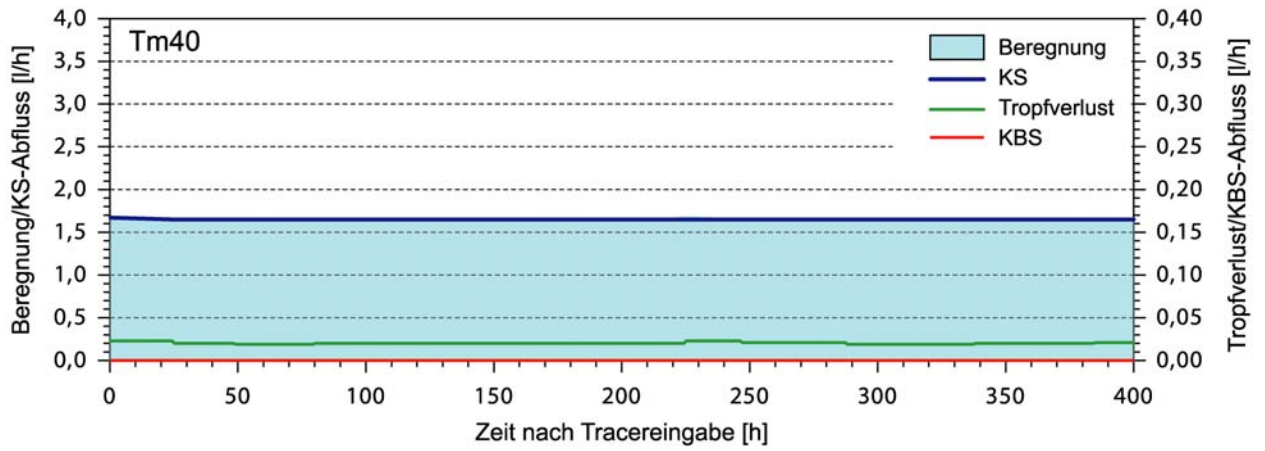


Tracerdurchgangskurven

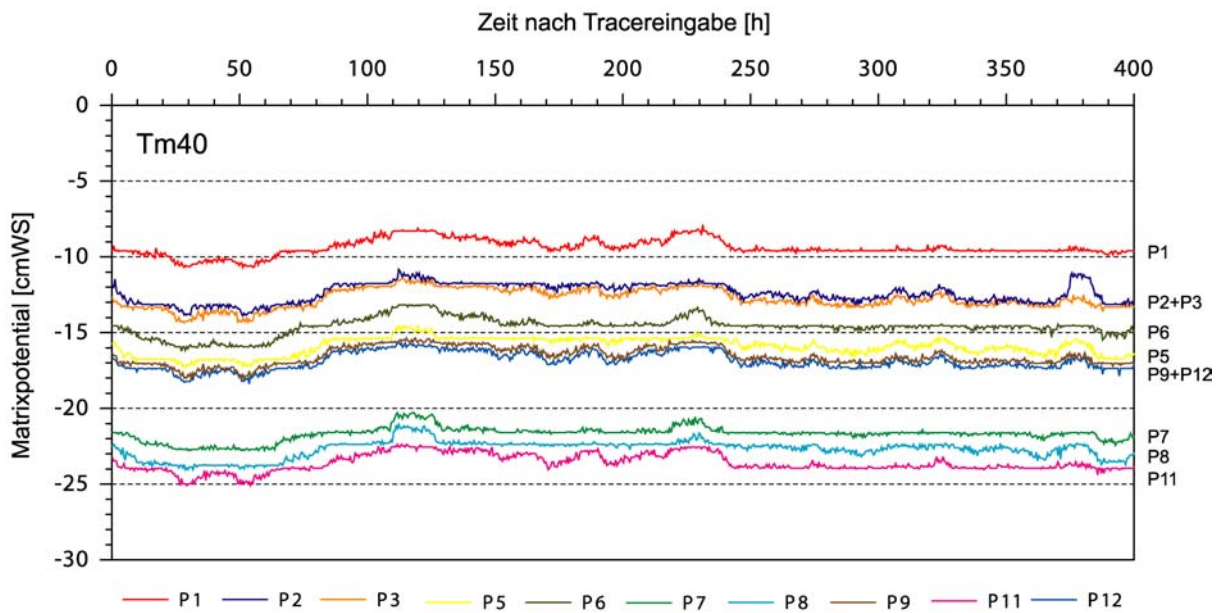


7.8.2 Tm40

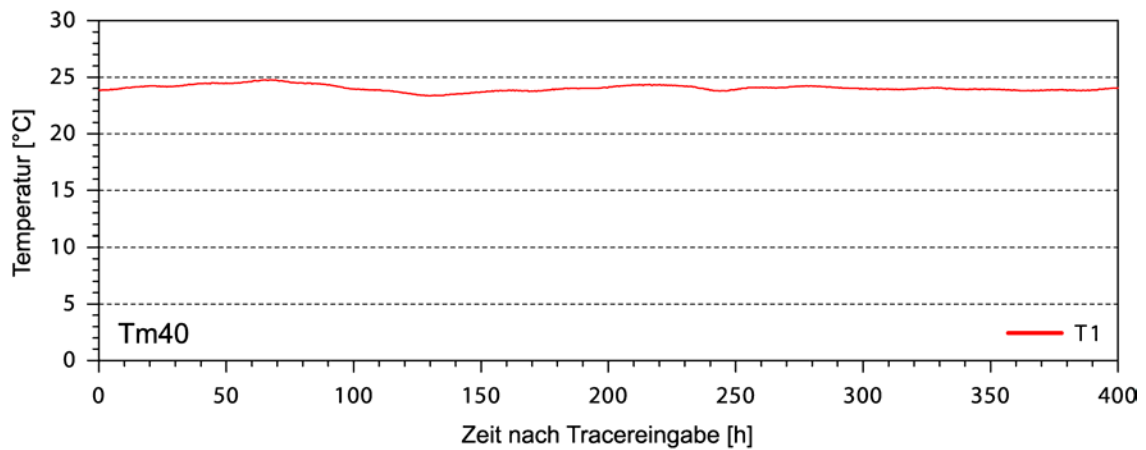
Abflussganglinien



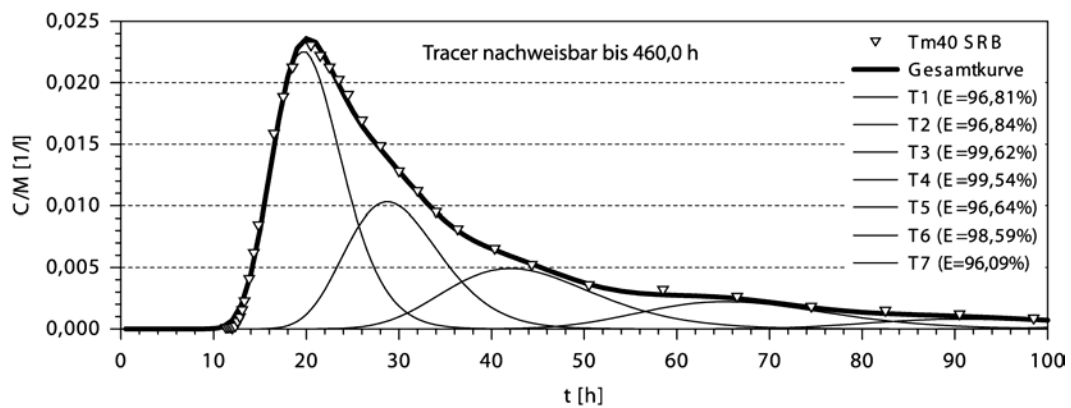
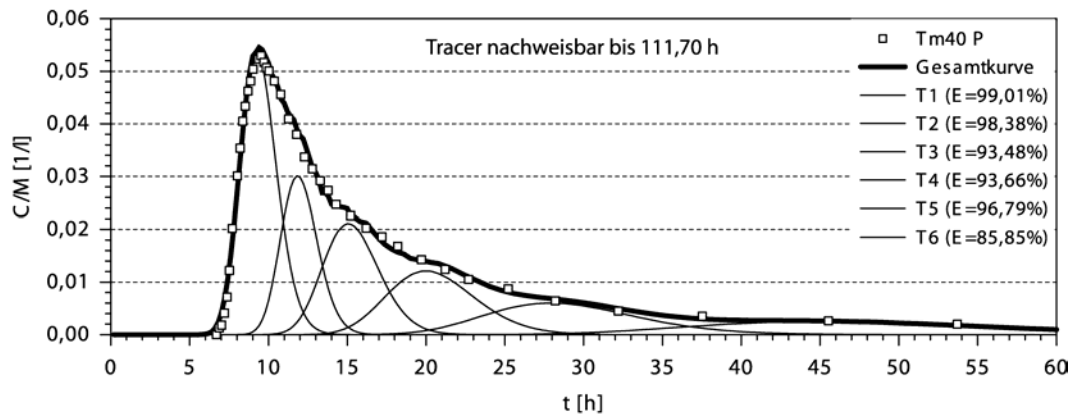
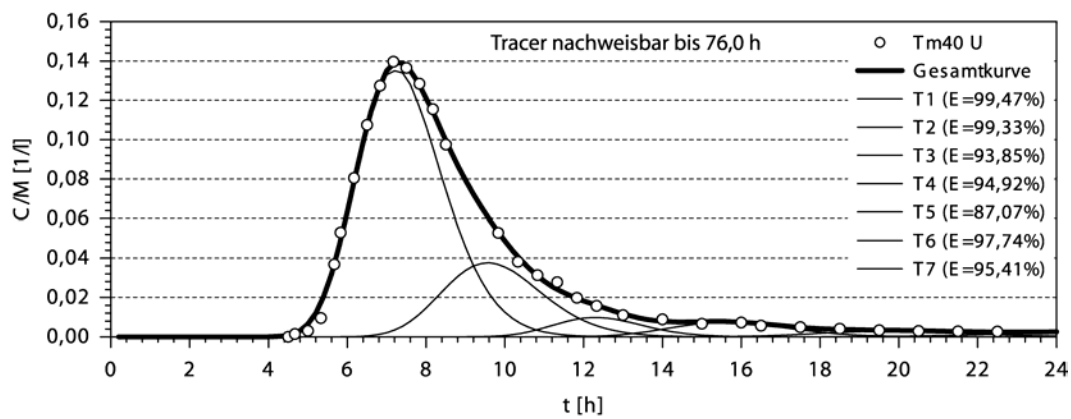
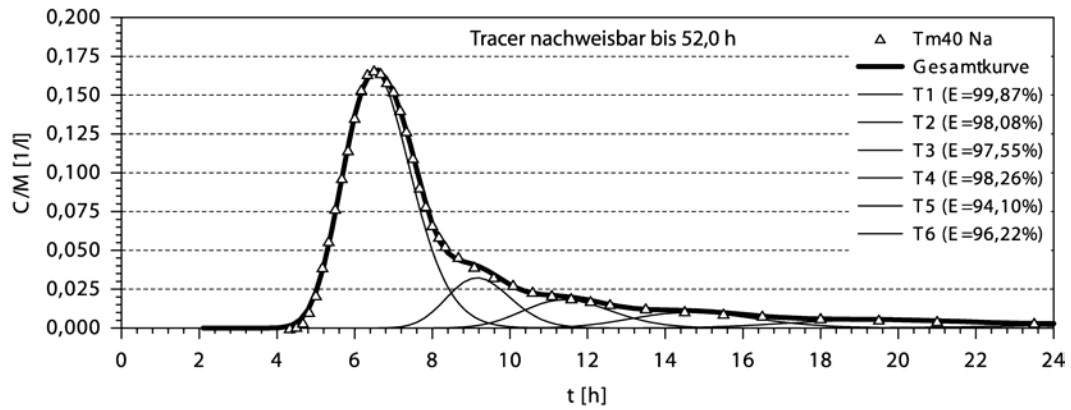
Matrixpotential



Temperatur

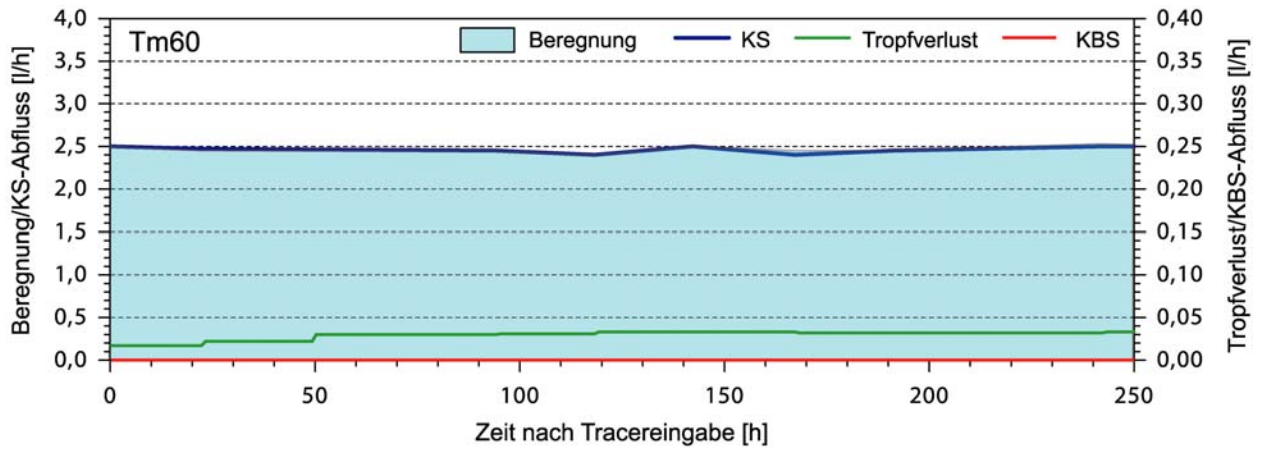


Tracerdurchgangskurven

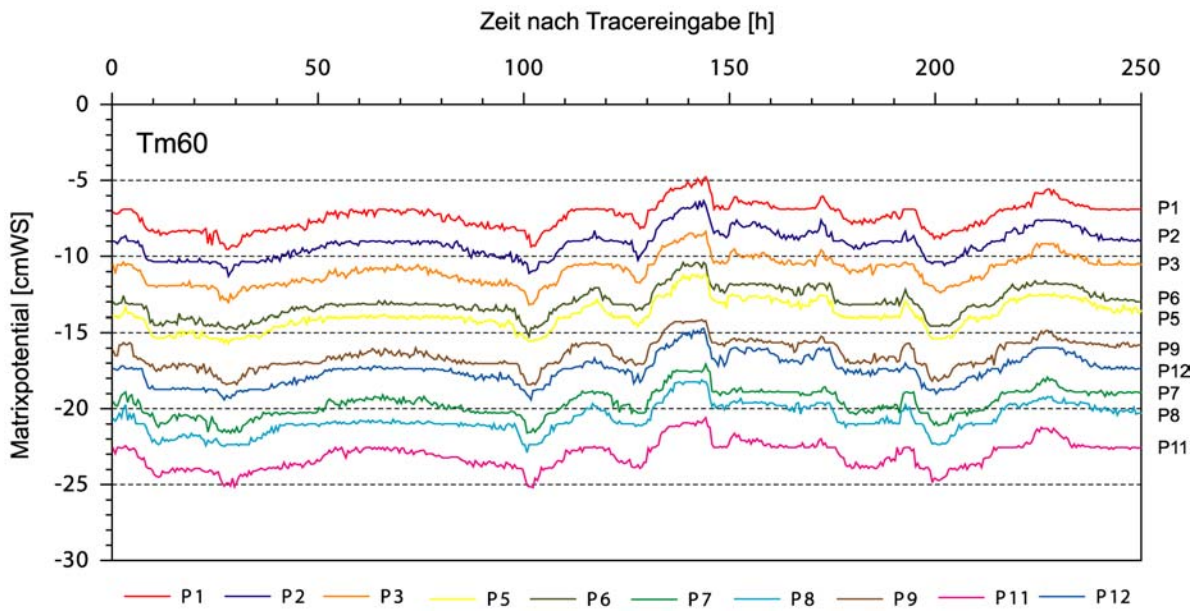


7.8.3 Tm60

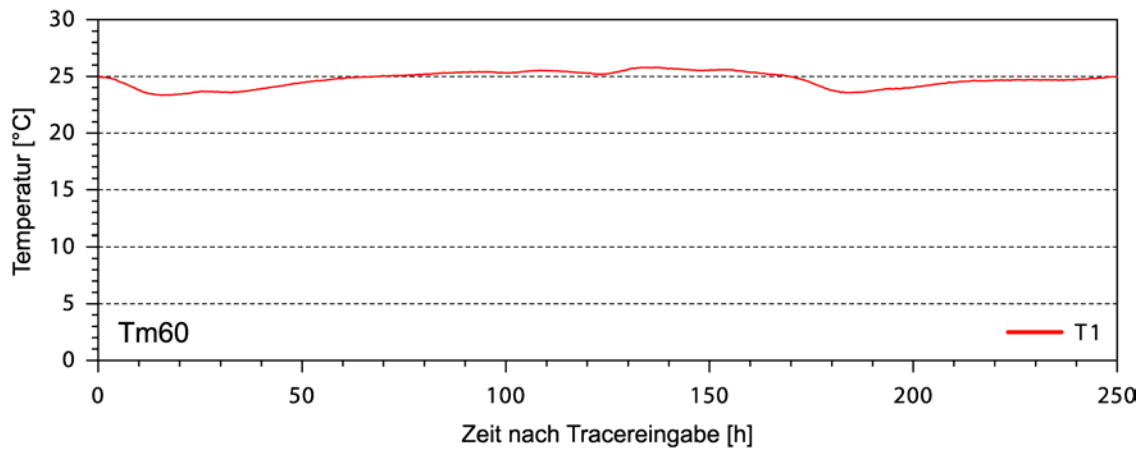
Abflussganglinien



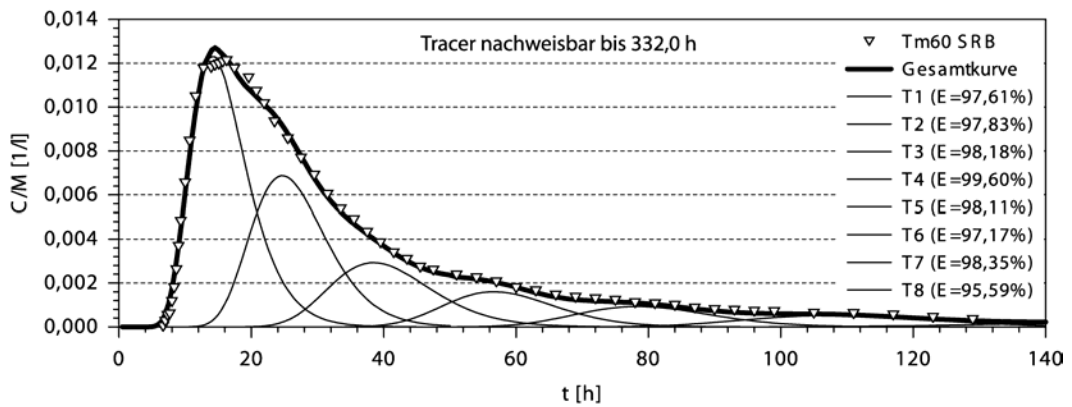
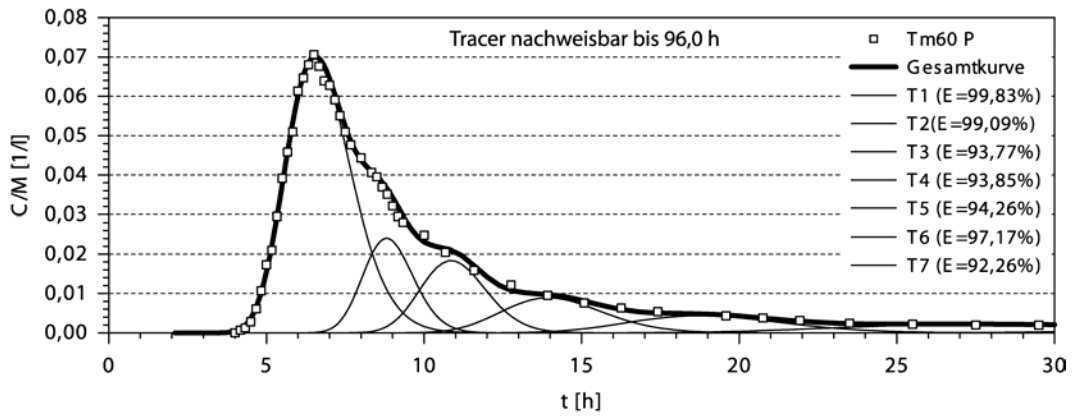
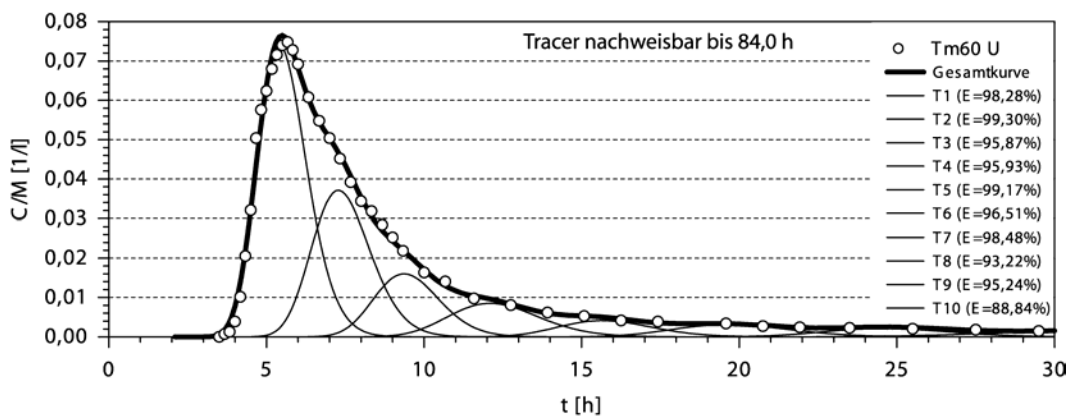
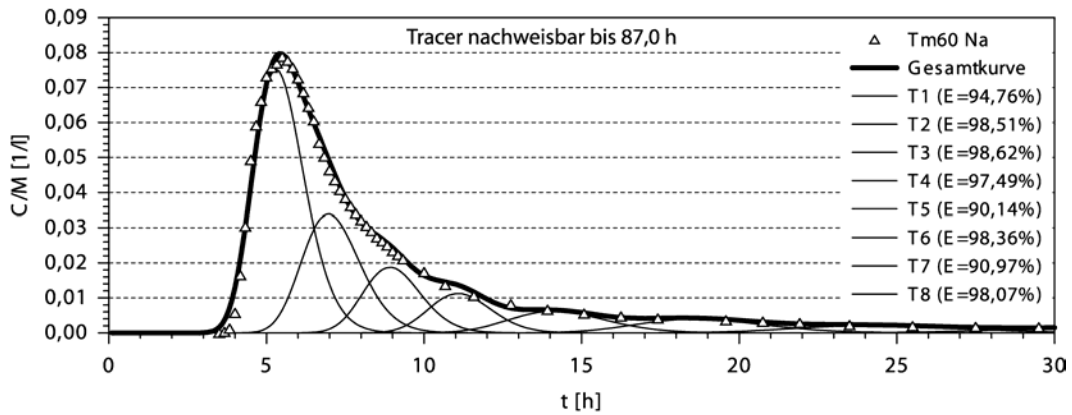
Matrixpotential



Temperatur

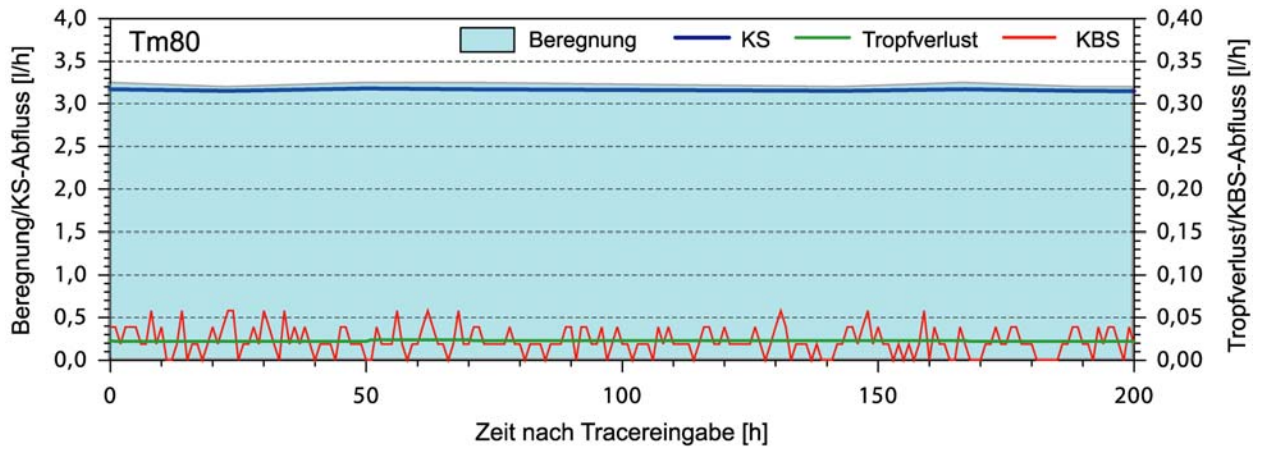


Tracerdurchgangskurven

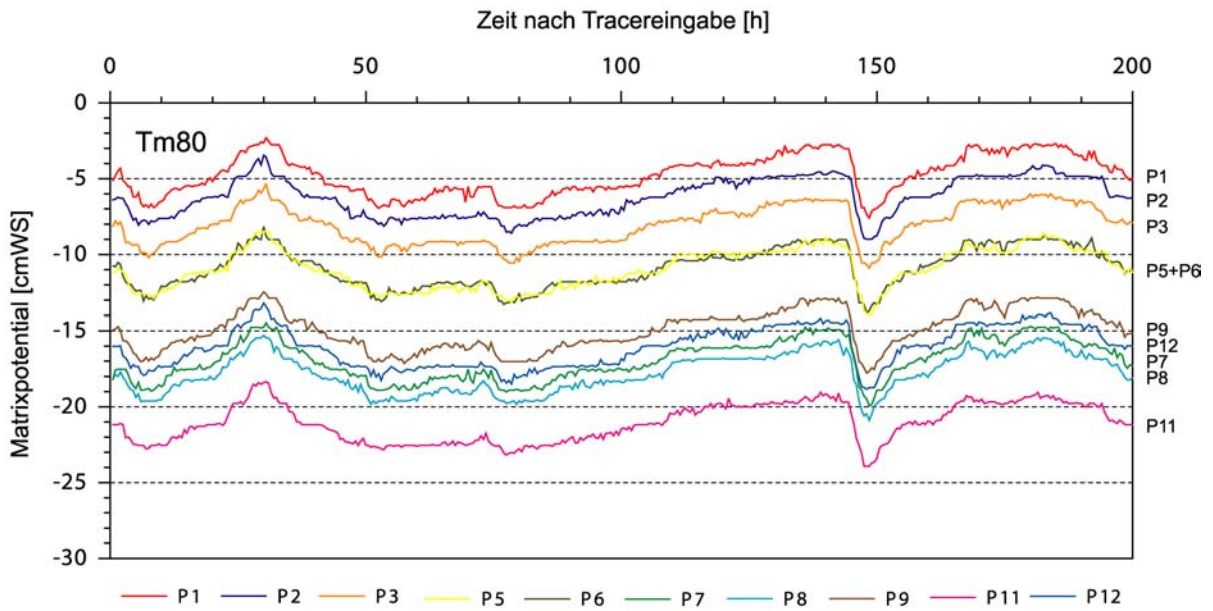


7.8.4 Tm80

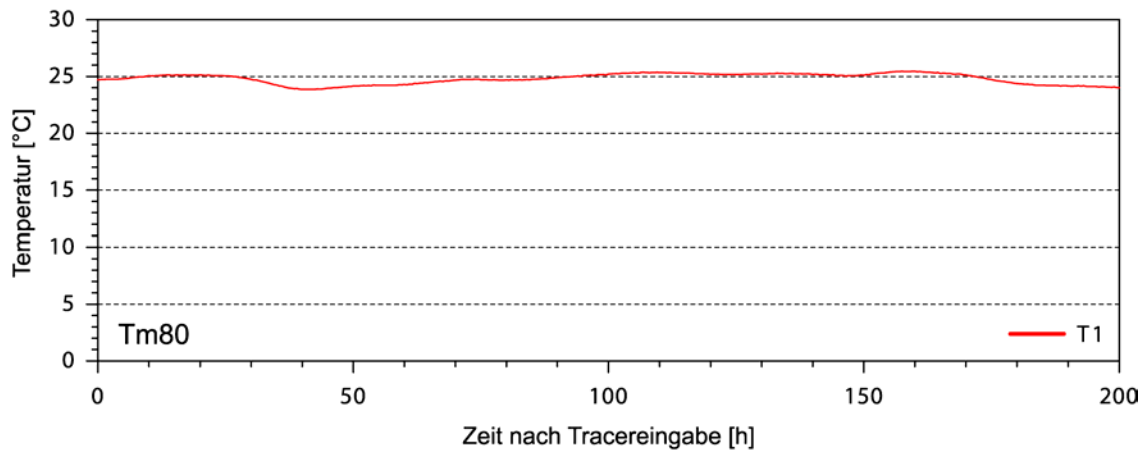
Abflussganglinien



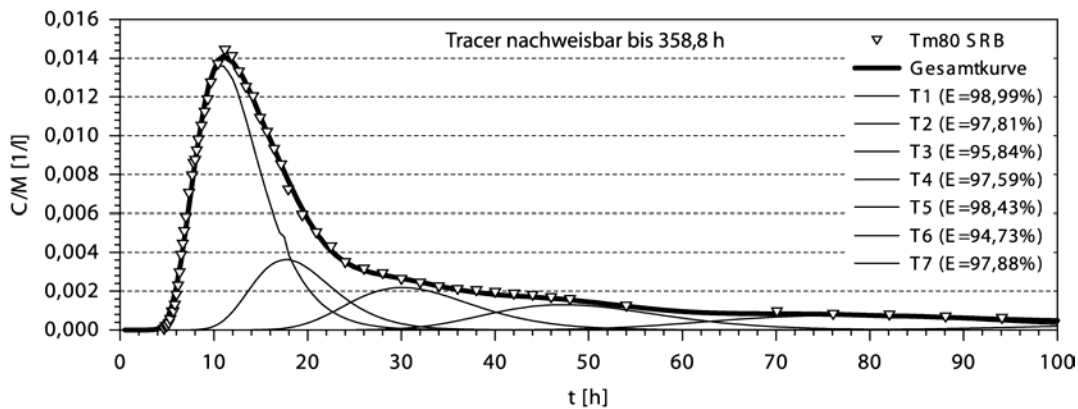
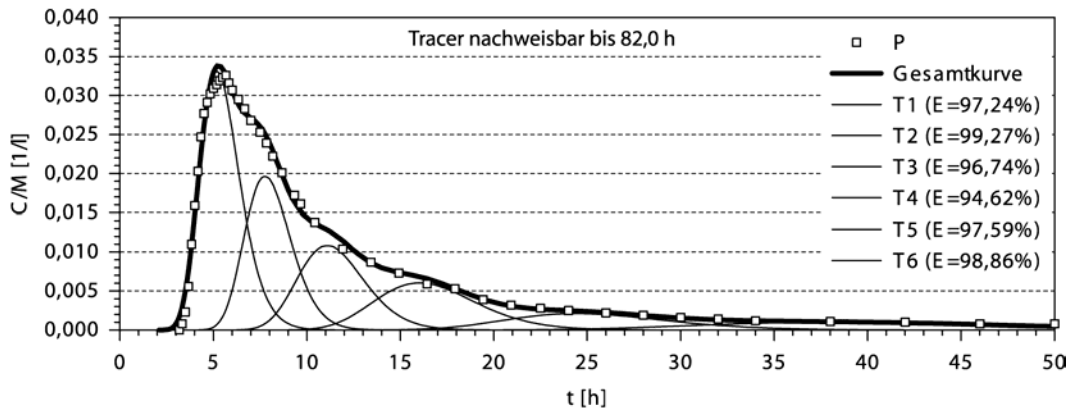
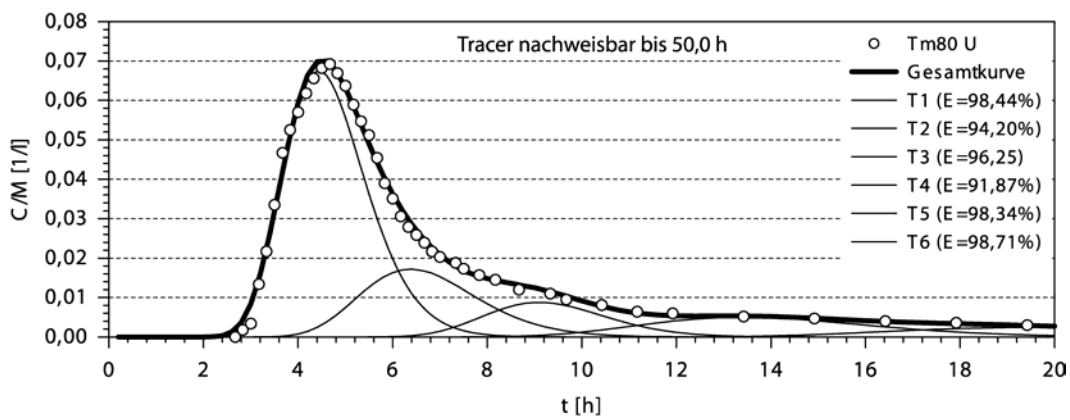
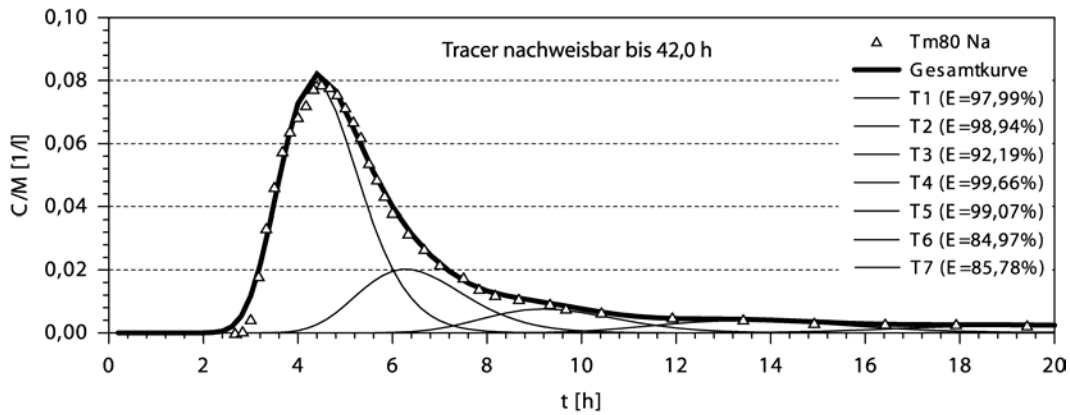
Matrixpotential



Temperatur

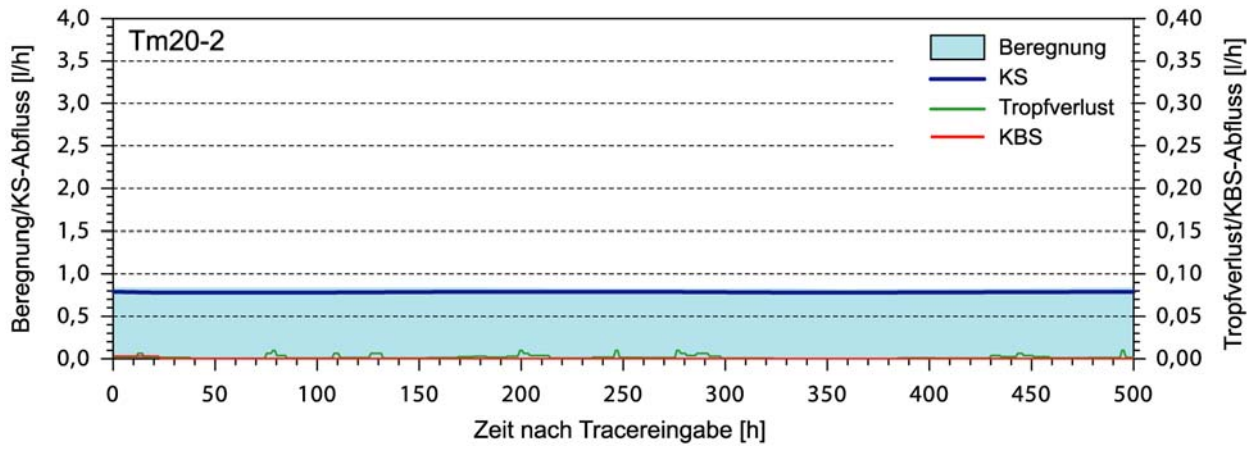


Tracerdurchgangskurven

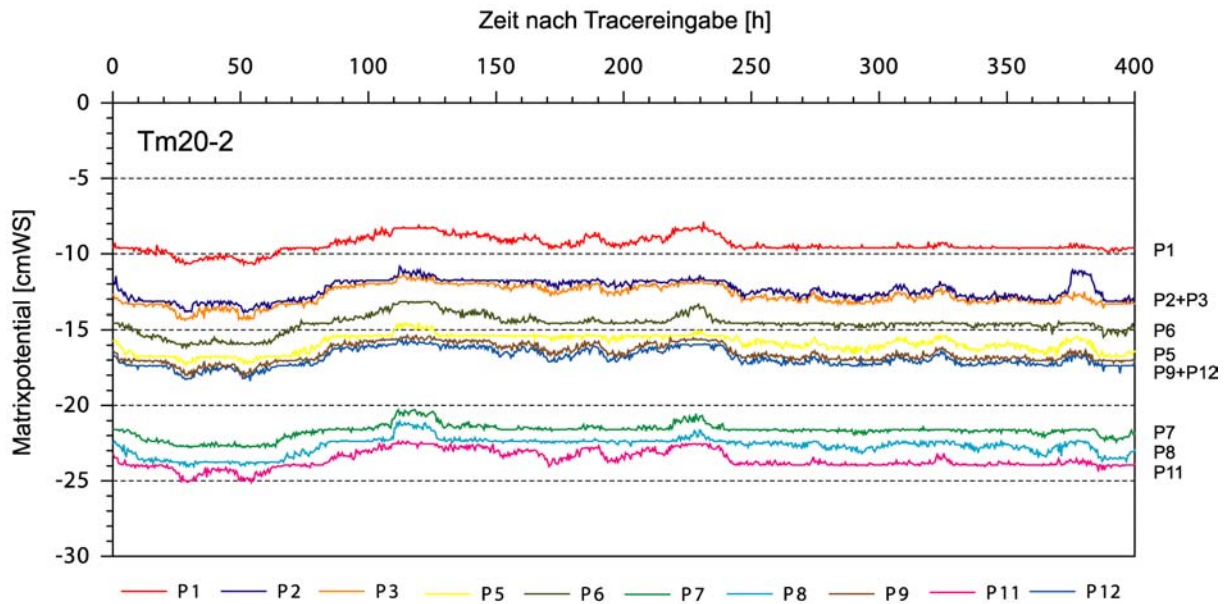


7.8.5 Tm20-2

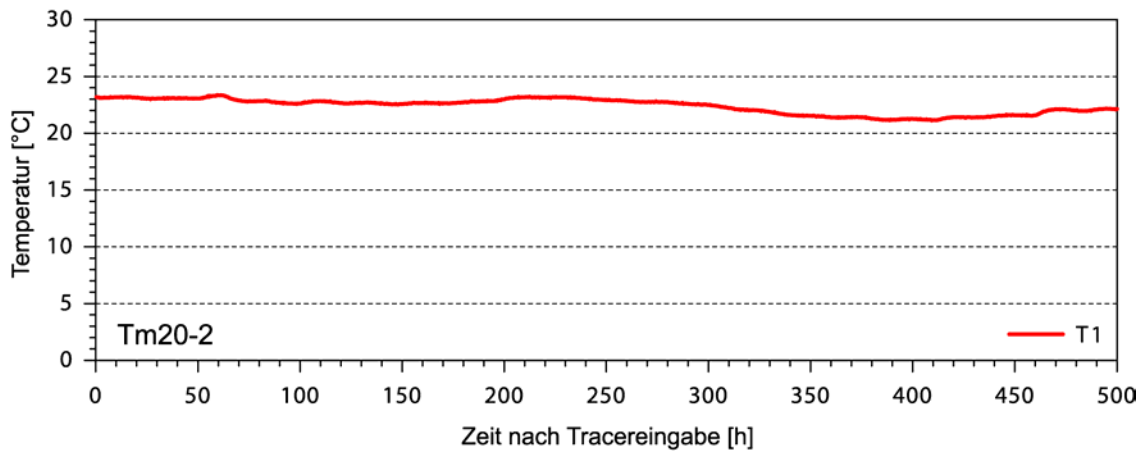
Abflussganglinien



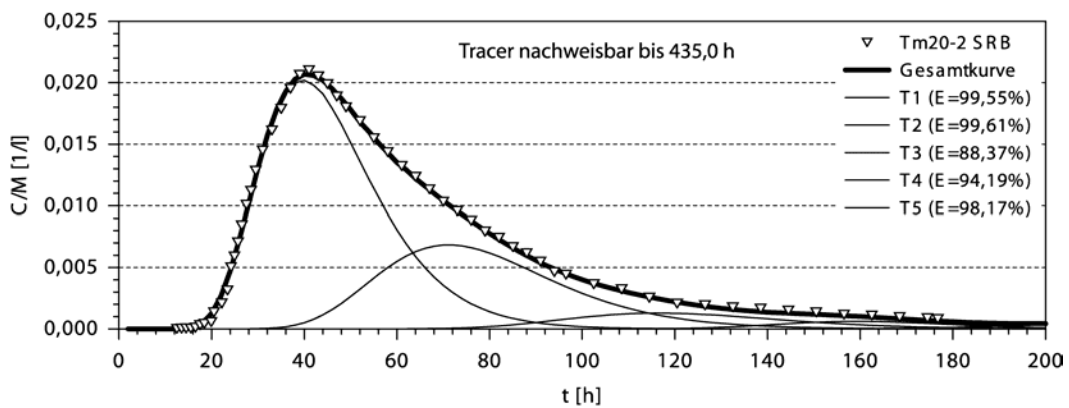
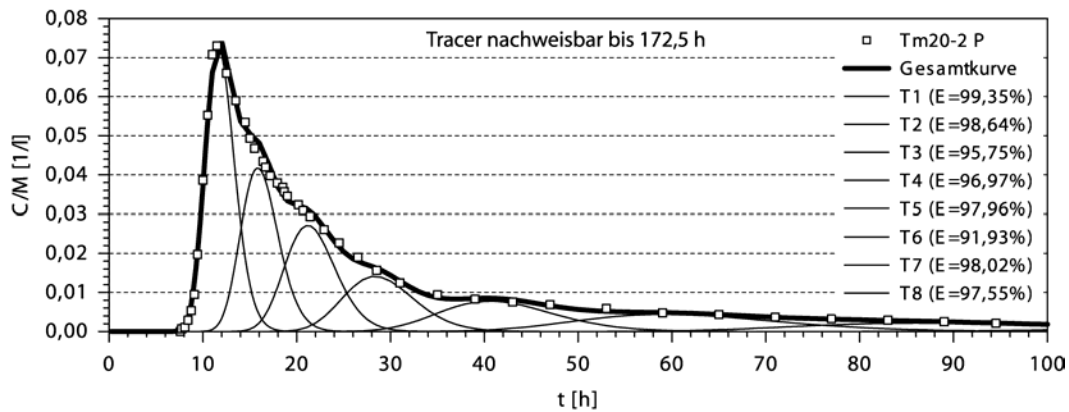
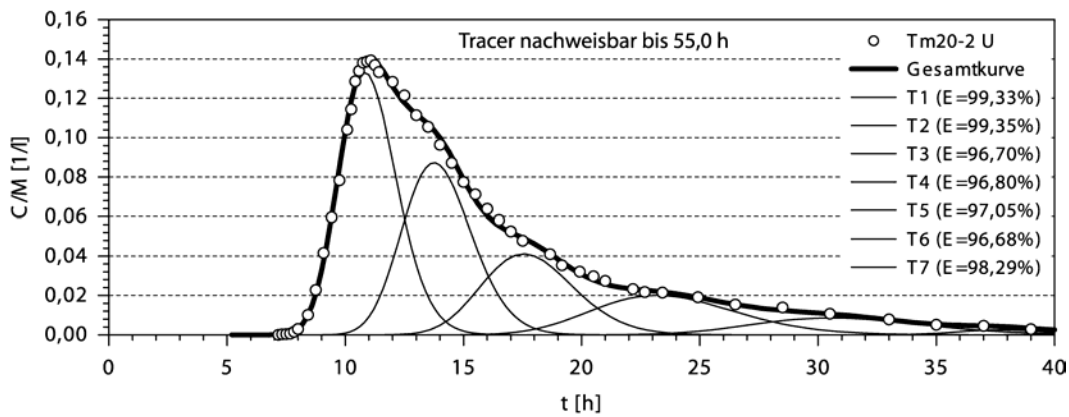
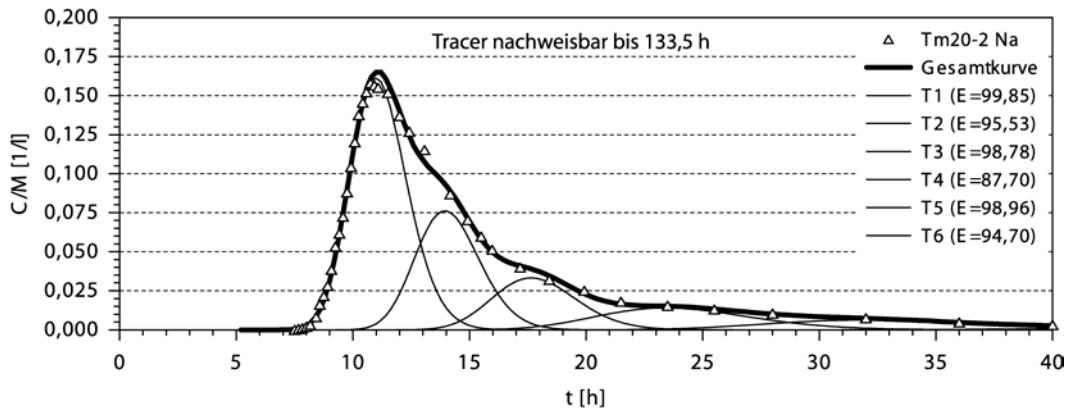
Matrixpotential



Temperatur

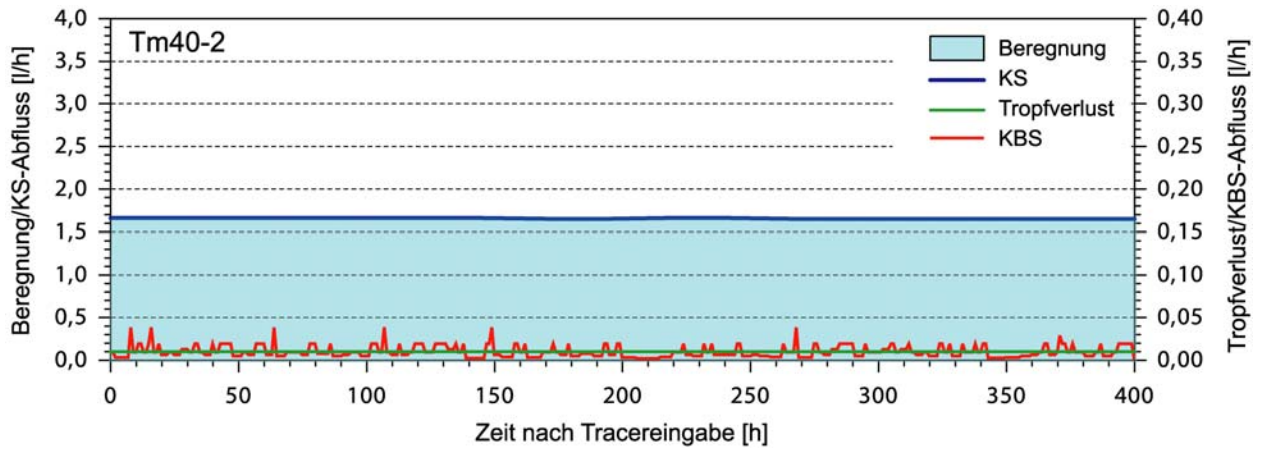


Tracerdurchgangskurven

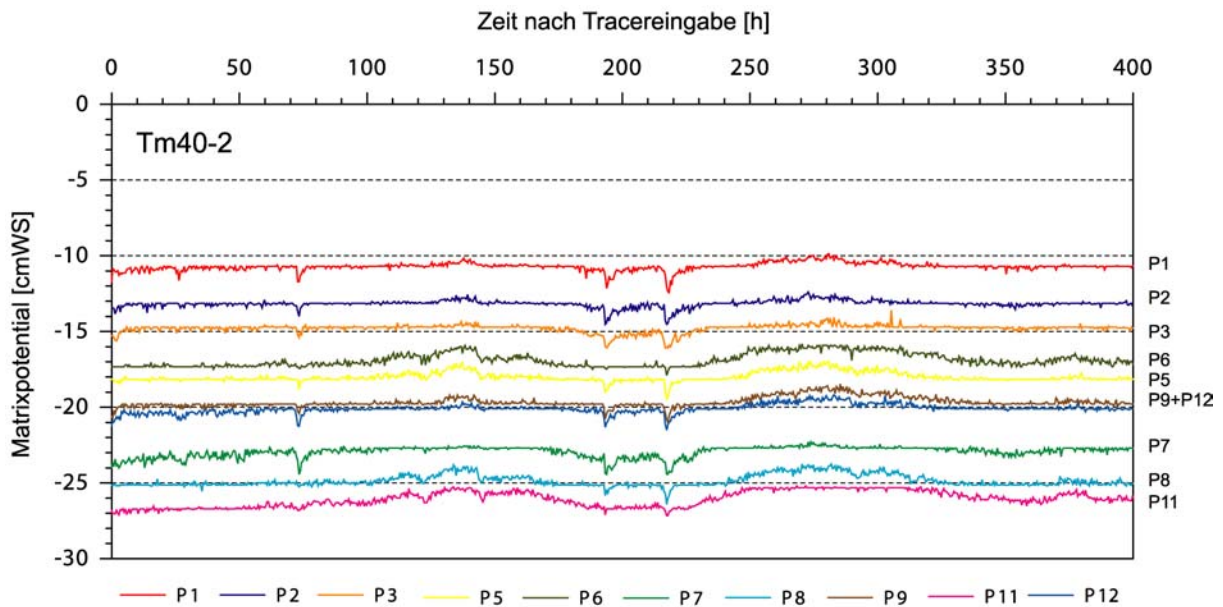


7.8.6 Tm40-2

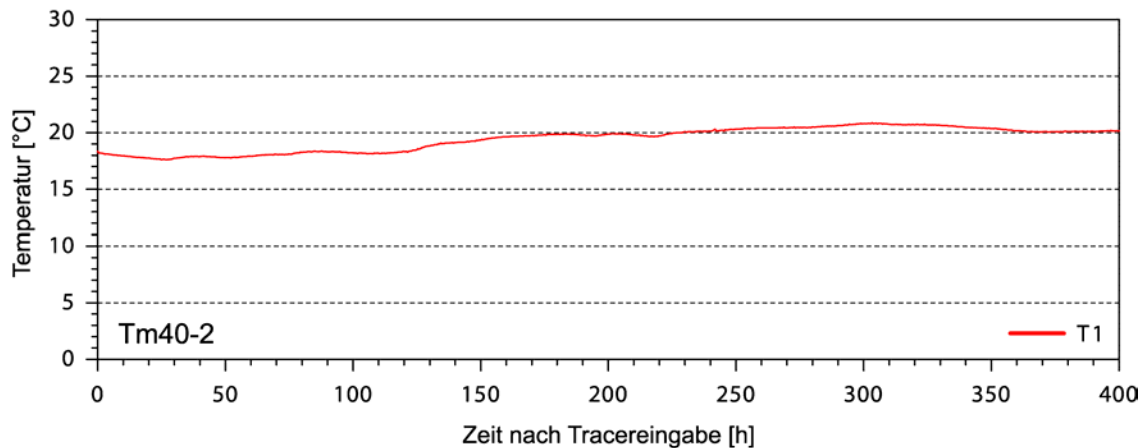
Abflussganglinien



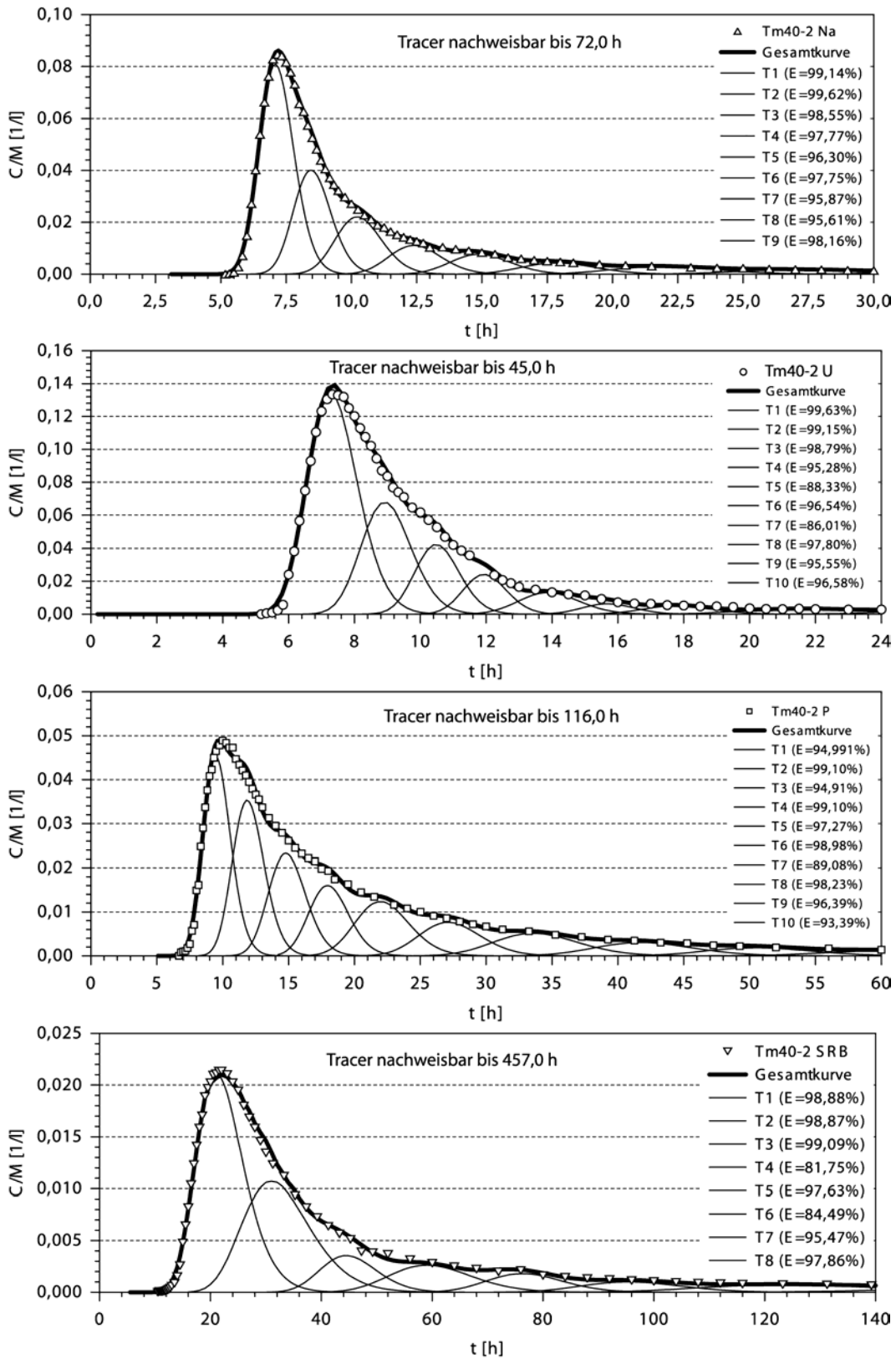
Matrixpotential



Temperatur

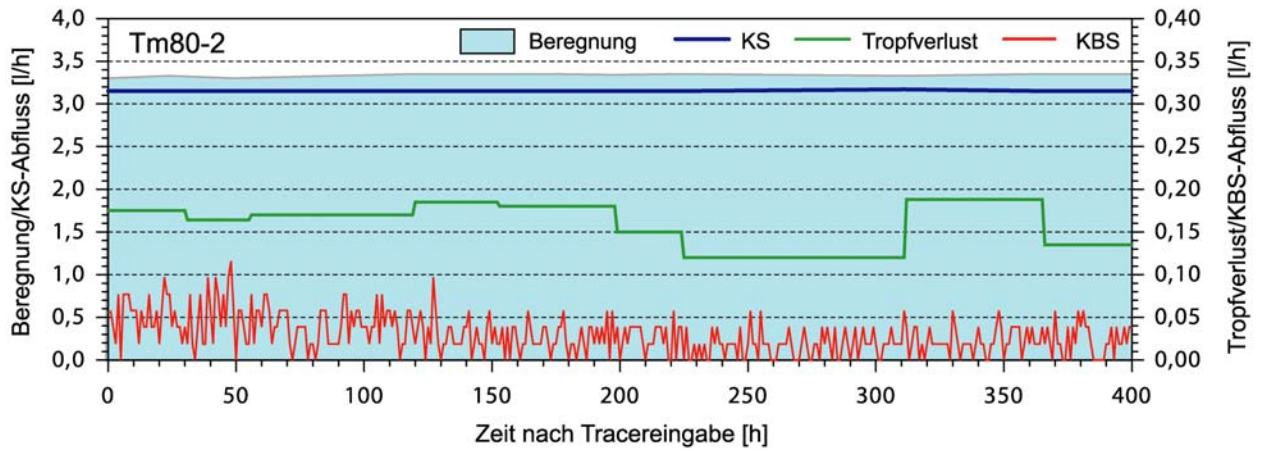


Tracerdurchgangskurven

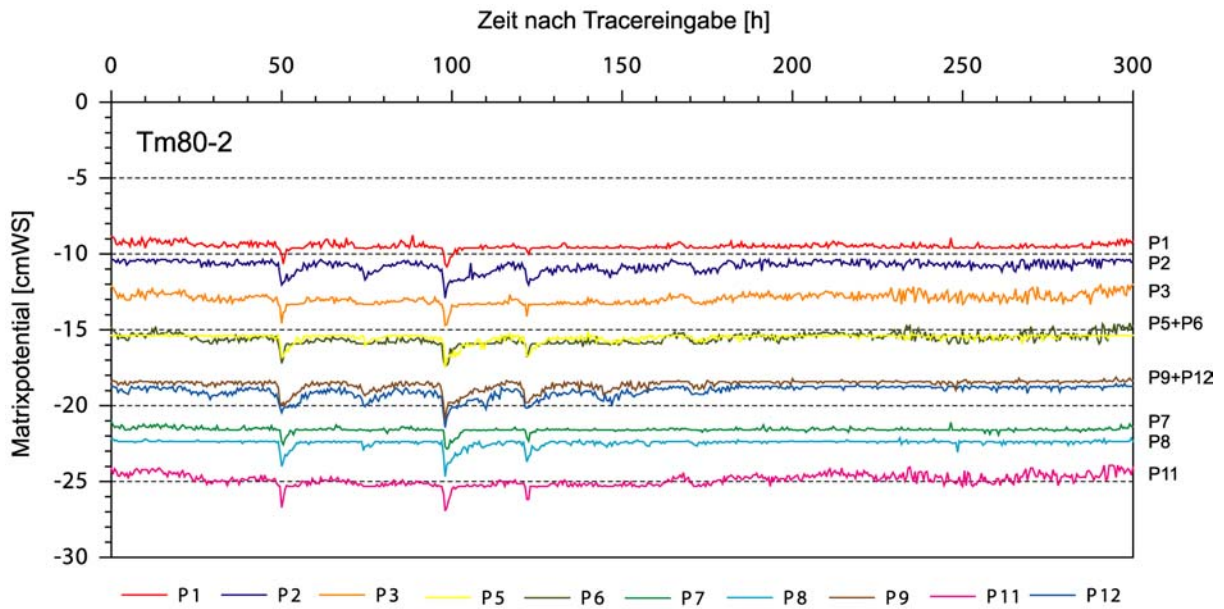


7.8.7 Tm80-2

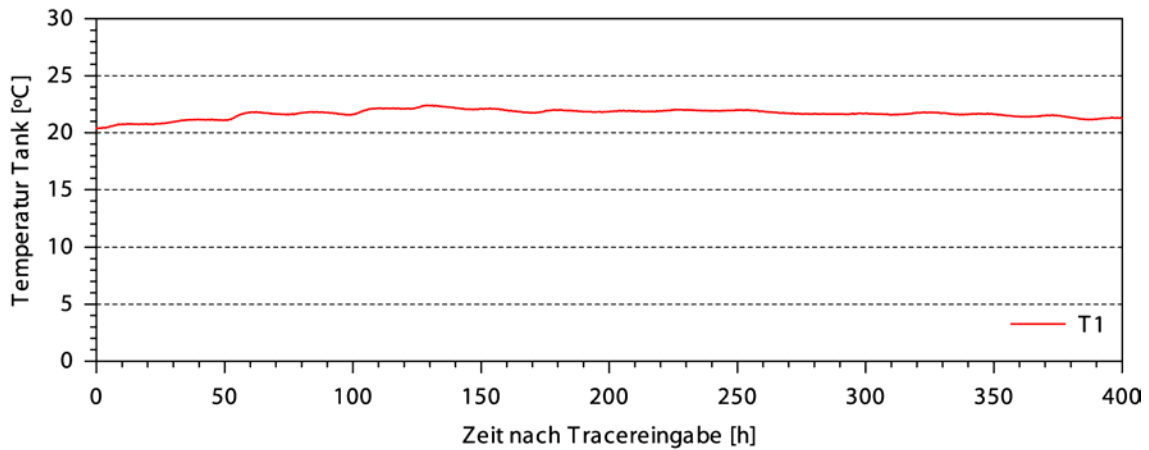
Abflussganglinien



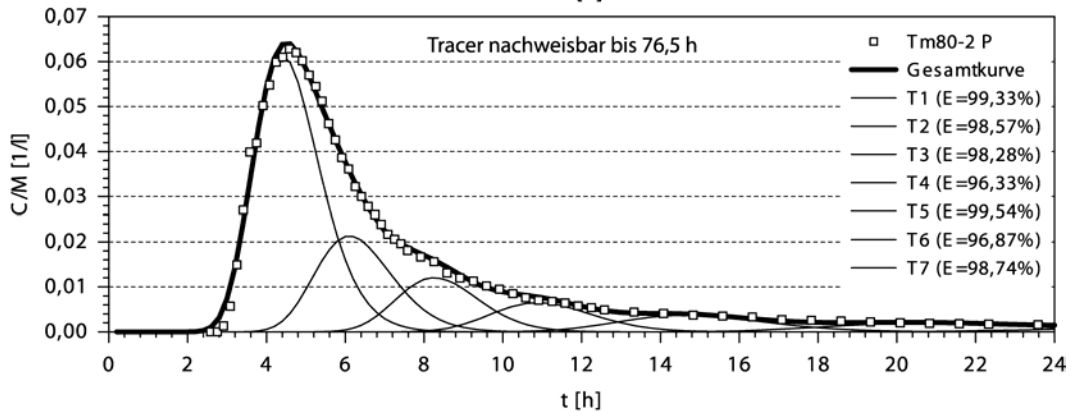
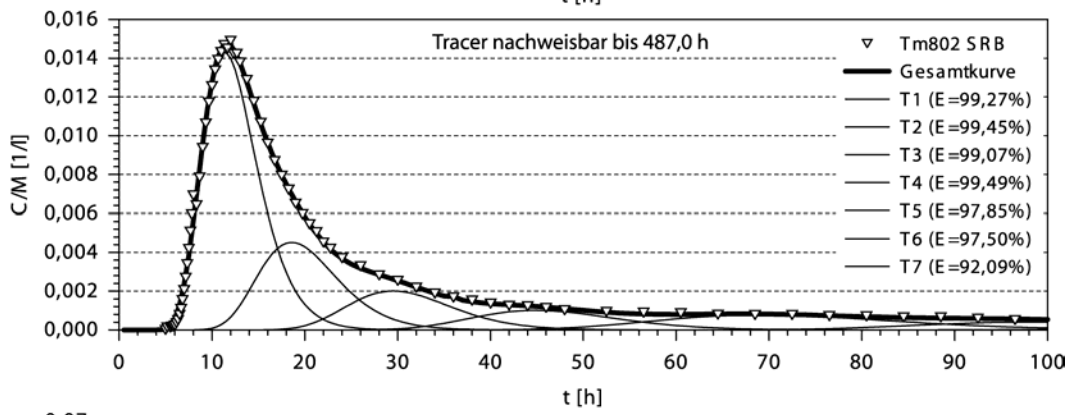
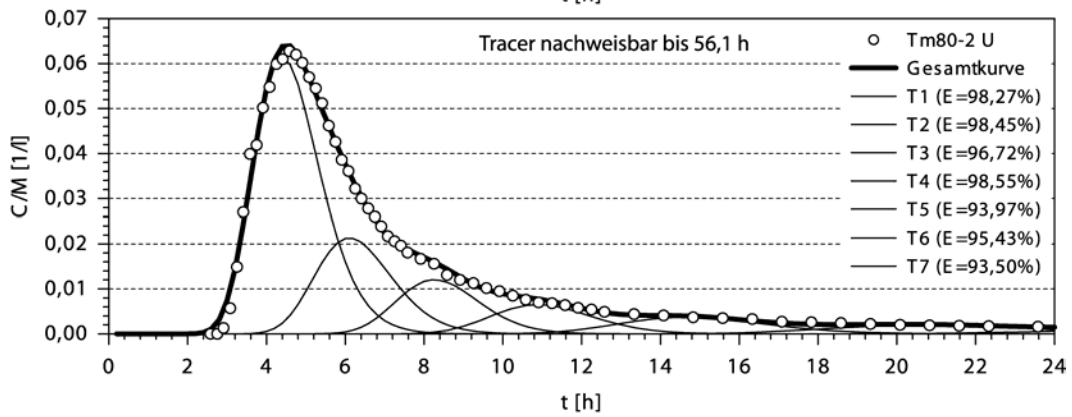
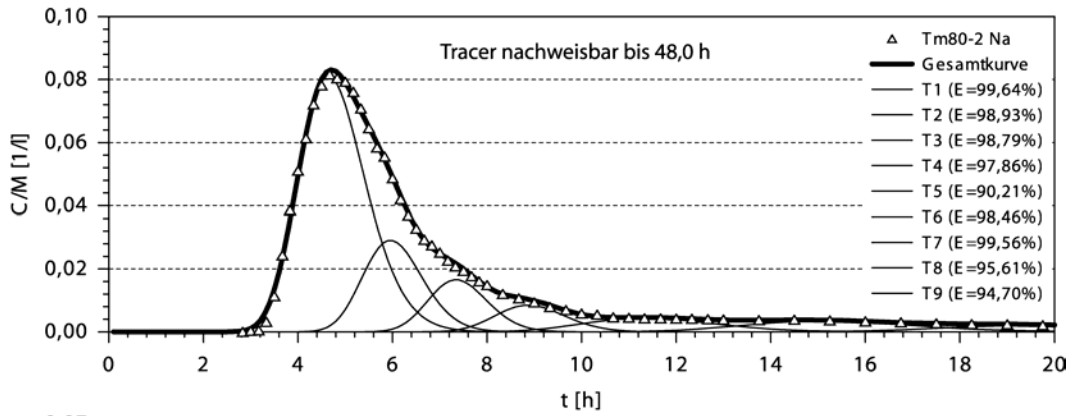
Matrixpotential



Temperatur



Tracerdurchgangskurven



Lebenslauf

Name Katrin Osterkamp
Geburtsname Balz
Geburtsdatum 06.01.1972
Geburtsort Böblingen
Familienstand verheiratet, 2 Kinder

1978 – 1982 Grundschule Calw-Stammheim
1982 – 1991 Hermann Hesse-Gymnasium Calw
Abschluss am 12.06.1991 mit der Allgemeinen Hochschulreife
1991 – 1997 Studium der Geologie/Paläontologie
an der Ludwig-Maximilians-Universität München
Abschluss am 01.12.1997 als Diplom-Geologin
04/1998 –09/2003 wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Arbeitsgruppe Hydro-
und Umweltgeologie von Prof. S. Wohnlich am Institut für
Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität München
Aufgabengebiete: Erstellung von Gutachten im Bereich Deponie-
technik; Bearbeitung und später auch Projektleitung des BMBF-
Projektes „FLUWU-FernLernUmgebungen Wasser und Umwelt“
03/2004 Geburt des ersten Kindes, seither Hausfrau und Mutter
01/2006 Geburt des zweiten Kindes