

**VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN VON KAPILLARSPERREN AUS
NATUR- UND RECYCLINGBAUSTOFFMATERIALIEN ALS BEITRAG ZUR
DEPONIEOBERFLÄCHENABDICHTUNG UND RESSOURCENSCHONUNG**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades „Dr. agr.“
Doktor der Agrarwissenschaften

am Fachbereich 09
„Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie und Umweltmanagement“

der
Justus-Liebig-Universität
Gießen

vorgelegt von

Birte Maren Pfeiffer
aus Fernwald

Gießen, im Januar 2006

Die vorliegende Veröffentlichung ist zugleich die vom Fachbereich 09 „Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie und Umweltmanagement“ der Justus-Liebig-Universität Gießen genehmigte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades „Dr. agr.“

Erster Gutachter:	Prof. Dr. Stefan Gäth
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr. Tamás Harrach
Vorsitzender der Prüfungskommission:	Prof. Dr. Dr. Annette Otte
Datum der Disputation:	17.02.2006

Erklärung

„Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe.

Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.“

Gießen, im Januar 2006

Es ist nicht genug zu wissen, man muss es auch anwenden;

Es ist nicht genug zu wollen, man muss es auch tun.

Johann Wolfgang von Goethe

Vorwort zum Dank

An dieser Stelle möchte ich den vielen Menschen Danken, die mich auf meinem Weg begleitet, stetig motiviert und die mir ihr Vertrauen geschenkt haben. Nur ihre menschliche Unterstützung und tatkräftige Hilfe ermöglichte es mir, diese Arbeit fertig zu stellen.

Mein herzlicher Dank gilt meinem „Doktorvater“ Herrn Prof. Dr. Stefan Gäth. Danken möchte ich ihm für die Überlassung des Themas, die vielfachen Anregungen, Diskussionen und die konstruktive Kritik. Er versteht es, in entscheidenden Situationen zu ermutigen und das Mögliche aufzuzeigen. Aber vor allem möchte ich ihm meine tiefe Dankbarkeit für sein Vertrauen, seine menschliche und freundschaftliche Unterstützung aussprechen.

Herrn Prof. Dr. Tamas Harrach danke ich herzlich für die Übernahme des zweiten Gutachtens und die wertvollen Erfahrungen in meiner Zeit als Mitarbeiterin an seinem Instiut.

Auch möchte ich Herrn Prof. Dr. Hans-Georg Frede danken, dessen immerwährendes Interesse und Fragen nach dem Stand der Arbeit mir in einigen entscheidenden Momenten viel Motivation gaben. Ruth Strittmatter und Gabi Weiß danke ich für ihre Organisation und den Überblick im Dschungel der Formalitäten.

Für die Finanzierung des Projekts und damit meines Promotionsvorhabens danke ich dem Landkreis Gießen. Herr Bruno Arnold, der das Projekt mit initiierte, verstarb leider viel zu früh und konnte sich nicht mehr von dem Erfolg des Systems, für das er sich so sehr eingesetzt hat, überzeugen.

Der Firma Karl Brück Hoch- und Tiefbau GmbH & Co. KG gilt mein Dank für die gute Kooperation.

Diese Arbeit konnte nur durch die aktive Unterstützung und gute Zusammenarbeit vieler Helfer entstehen. Zunächst möchte ich Vera Blencke, Jürgen Steffan, Thorsten Becker und Uwe Pleus für ihre engagierte Unterstützung, auch zu teilweise ungewöhnlichen Arbeitszeiten, danken. Ein großer Dank gilt auch den Zivildienstleistenden Sebastian Theuer, Martin Tuchscherer und Fabian Brugger, die trotz manchmal unangenehmer Tätigkeiten nie die Lust an der Arbeit verloren haben und immer eine große Hilfe waren.

Ein ganz besonderer Dank richtet sich an Herrn Wilfried Müller, Herrn Erich Stephan und Herrn Reinhold Müller, die mit ausgezeichneter Fachkenntnis die Kipprinne konstruierten, bauten als auch funktionstüchtig machten und dabei unermüdlich auf neue „Wünsche“ eingingen.

Für die umfangreiche Unterstützung bei der Aufbereitung und Analyse der zahlreichen Proben, für die tatkräftige Hilfe und entscheidenden Tipps möchte ich mich besonders bei Heike Weller, Janusz Czynski, Beate Lindenstruth, Nelly Weis und Anette Netsch bedanken. Renate Köhler möchte ich danken für ihre Hilfe bei grafischen Arbeiten.

Ich möchte ebenfalls allen meinen Kolleginnen und Kollegen für ihre moralische und tatkräftige Unterstützung und das gute Institutsklima, das sicherlich keine Selbstverständlichkeit ist, danken. In diesem Zusammenhang gilt mein besonderer Dank Dr. André Michels, der mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand. Ich freue mich sehr auf unsere weitere Zusammenarbeit.

Wolfgang Reiher, Magdalena Topf, Susanne Müller, Katrin Ziegenberg, Brigitta Szyska, Sebastian Krahe und PD Dr. Rolf Düring gilt mein Dank für anregende Diskussionen, den Schweiß bei diversen Rinnenbefüllungen und die vielen Ermutigungen.

Dr. Stefan Reichenberger und insbesondere Dr. Sander Huisman danke ich für ihre Hilfe im Umgang mit HYDRUS-2D. Ich danke Herrn Dr. Hollenhorst für seine Unterstützung in statistischen Fragen und bei der Modellentwicklung.

Mein großer Dank gilt meinem Freund Hans-Georg, der in der ganzen Phase meiner Arbeit unentwegtes Verständnis für mich hatte. Er gab mir immer wieder Energie und hielt mich auf dem Weg zum Ziel.

Meinen Eltern und meiner Familie möchte ich dafür danken, dass sie mich zum Studium führten und mir stets Rückhalt und Geborgenheit gaben.

Auch möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, deren moralische Unterstützung, Nähe und Verständnis für mich eine sehr große Bedeutung haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt Markus Ingelfinger, dem ich diese Arbeit widmen möchte. Unter dieser Arbeit sollte auch sein Name stehen. Er war es, der mich für dieses eigentlich gemeinsame Projekt begeistert hat. Leider musste Markus, ein intelligenter, fröhlicher und liebenswerter Mensch viel zu früh sterben.

In Gedenken an Markus

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Verzeichnis des Anhangs.....	IX
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	XI
Kurzfassung	XIV
Abstract	XV
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Möglichkeiten alternativer Deponieoberflächenabdichtungen unter Einsatz mineralischer Abfälle	4
2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	4
2.2 Einsatzpotenzial mineralischer Abfälle.....	13
3 Die Kapillarsperre – Stand der Forschung	19
3.1 Physikalische Grundlagen	19
3.1.1 Das Porensystem.....	19
3.1.2 Kapillarität	19
3.1.3 Potenzialkonzept.....	20
3.1.4 Wasserretentionsbeziehung.....	20
3.1.5 Wasserbewegung	22
3.1.6 Funktionsprinzip der Kapillarsperre.....	24
3.1.7 Laterale Dränkapazität als Kenngröße zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Kapillarsperren.....	28
3.2 Chemische Eignung des Einsatzes von Recyclingmaterialien in Kapillarsperren	30
3.2.1 Chemische Eigenschaften von Recycling-Baustoffen.....	30
3.2.2 Nachweis der Umweltverträglichkeit von Recyclingmaterialien.....	32
3.3 Praktische Erfahrungen mit Kapillarsperren.....	34
3.3.1 Probefelder und großflächige Umsetzung.....	34
3.3.2 Kipprinnenversuche	38
3.3.3 Modellierung von Kapillarsperren.....	39

4	Material und Methoden	43
4.1	Untersuchungsmaterialien	43
4.2	Untersuchungsmethoden.....	44
	4.2.1 <i>Materialcharakterisierung</i>	44
	4.2.1.1 <i>Physikalische Parameter</i>	45
	4.2.1.2 <i>Chemische Parameter</i>	52
4.3	Kipprinnenversuche	58
4.4	Bestimmung der lateralen Dränkapazität.....	64
4.5	Simulation	66
4.6	Datenverarbeitung und Statistik.....	68
5	Ergebnisse und Diskussion	69
5.1	Materialeigenschaften.....	69
	5.1.1 <i>Physikalische Eigenschaften</i>	70
	5.1.2 <i>Chemische Eigenschaften</i>	91
	5.1.3 <i>Fazit der Materialuntersuchungen</i>	99
5.2	Kipprinnenversuche	101
	5.2.1 <i>Naturmaterial-Kombination</i>	101
	5.2.2 <i>Recyclingmaterial-Kombination</i>	110
	5.2.3 <i>Natur-Recyclingmaterial-Kombination</i>	117
	5.2.4 <i>Fazit der Kipprinnenversuche</i>	126
6	Numerische Simulation	131
6.1	Simulation des Kipprinnenversuchs der Natur-Recyclingmaterial- kombination.....	131
6.2	Empfindlichkeitsstudien	136
	6.2.1 <i>Einfluss der gesättigten Leitfähigkeit</i>	136
	6.2.2 <i>Einfluss unterschiedlicher Zuflussratensteigerungen auf das Kapillarsperrensystem</i>	141
6.3	Fazit der numerischen Simulation.....	144
7	Schlussbetrachtung	145
7.1	Bestimmung der lateralen Dränkapazitäten aus Kipprinnenversuchen.....	145
7.2	Physikalische Materialeigenschaften	149
7.3	Umweltverträglichkeit.....	152

7.4 Fazit und Ausblick.....	158
8 Zusammenfassung	161
9 Summary	165
Literaturverzeichnis	169
Anhang A	183
Anhang B	194
Anhang C	195
Anhang D	196

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Aufkommen und Verwertung von industriellen Nebenprodukten (KRASS ET AL. 2004a+b, MERKEL 2004)	14
Tabelle 2.2: Aufkommen und Verwertung von Bauabfällen (KRASS ET AL. 2004, KWTB 2003)	16
Tabelle 3.1: Einteilung der Betone nach der Rohdichte (DIN 1045).....	30
Tabelle 4.1: Untersuchungsmaterialien.....	43
Tabelle 4.2: Untersuchungskatalog zur Eignungsfeststellung von Kapillarsperrenmaterialien (nach WOHNLICH & BAUER 1999, ergänzt)	44
Tabelle 4.3: Maschenweiten der Siebe zur Bestimmung der Korngrößenverteilung.....	46
Tabelle 4.4: Bestimmung von C (BEYER 1964)	50
Tabelle 4.5: Analyseverfahren zur Bestimmung der Anionen mit Bestimmungsgrenze unter Berücksichtigung des Aufschlussverfahrens	53
Tabelle 4.6: Analyseverfahren zur Bestimmung der Spurenelemente mit Bestimmungsgrenzen unter Berücksichtigung des Aufschlussverfahrens	53
Tabelle 4.7: Zuordnungskriterien der Eluate für Deponieersatzbaustoffe nach DEPVERWV (2005) und LAGA M20 - Zuordnungswerte für Eluate von Recyclingbaustoffen (1997).....	56
Tabelle 4.8: Zuordnungswerte der Feststoffgehalte nach DEPVERWV (2005) und LAGA M20 - Zuordnungswerte für Feststoffe von Recyclingbaustoffen (1997)	57
Tabelle 4.9: Grenzwerte von Carbonatgehalt, Glühverlust und TOC nach DEPVERWV (2005) und TASI (1993)	58
Tabelle 4.10: Neigungsmöglichkeiten der Kipprinne.....	59
Tabelle 5.1: Gütekriterien für Kapillarsperrenmaterialien.....	69
Tabelle 5.2: Korndichte der Kapillarschichtmaterialien	70
Tabelle 5.3: Korndichte der Kapillarschichtmaterialien	70
Tabelle 5.4: Ungleichförmigkeit der Kapillarschichtmaterialien.....	72
Tabelle 5.5: Ungleichförmigkeit der Kapillarschichtmaterialien	72
Tabelle 5.6: Quotienten der Filterregel nach TERZAGHI aus der Materialgegenüberstellung	73
Tabelle 5.7: Ergebnis der Feinkornabsiebung nach der Durchführung des Säulenversuches der Naturmaterialkombination N-KS-0/2 mit N-KB-2/5 zur Überprüfung der Filterstabilität	75
Tabelle 5.8: Ergebnis der Feinkornabsiebung nach der Durchführung des Säulenversuches der Natur-/Recyclingmaterialkombination N-KS-0/2 mit R-KB-Q-2/10 zur Überprüfung der Filterstabilität	75
Tabelle 5.9: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) der Kapillarschichtmaterialien (gemessen) und nach BEYER (1964) berechnet.....	82
Tabelle 5.10: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) der Kapillarschichtmaterialien nach BEYER 1964 berechnet	83
Tabelle 5.11: Wasseraufnahmefähigkeit der Kapillarschichtmaterialien	90
Tabelle 5.12: Wasseraufnahmefähigkeit der Kapillarschichtmaterialien	90
Tabelle 5.13: Gegenüberstellung der Eluatuntersuchung nach DEV S-4 der Kapillarschichtmaterialien mit den LAGA-Zuordnungswerten Z 1.1 und Z 1.2 für Recyclingbaustoffe (1997) sowie den Zuordnungskriterien für Eluate nach DEPVERWV (2005)	92
Tabelle 5.14: Gegenüberstellung der Eluatuntersuchung nach DEV S-4 der Kapillarschichtmaterialien mit den LAGA-Zuordnungswerten Z 1.1 und Z 1.2 für Recyclingbaustoffe (1997) sowie den Zuordnungskriterien für Eluate nach DEPVERWV (2005)	93

Tabelle 5.15: Gegenüberstellung der Eluatuntersuchung nach Langzeitelution (1 bis 7 Tage) von R-KS-Q-0/2 mit den LAGA-Zuordnungswerten für Recyclingbaustoffe (1997)	95
Tabelle 5.16: Gegenüberstellung der Feststoffuntersuchung von R-KS-Q-0/2 und R-KB-Q-2/10 mit den LAGA-Zuordnungswerten für Recyclingbaustoffe (1997) sowie den Zuordnungskriterien für Feststoffe nach DepVerwV (2005)	97
Tabelle 5.17: Gegenüberstellung der Carbonatgehalte und Glühverluste der Kapillarschichtmaterialien mit den Grenzwerten nach DEPVERWV (2005) und TASI (1993)	98
Tabelle 5.18: Gegenüberstellung der Carbonatgehalte und Glühverluste der Kapillarschichtmaterialien mit den Grenzwerten nach DEPVERWV (2005) und TASI (1993)	98
Tabelle 5.19: Bewertung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der untersuchten Kapillarschichtmaterialien	99
Tabelle 5.20: Bewertung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der untersuchten Kapillarschichtmaterialien	100
Tabelle 5.21: Materialkombinationen für Kipprinnenversuche	101
Tabelle 6.1: Van-Genuchten-Parameter und gesättigte Wasserleitfähigkeit von Kapillarschicht (N-KS-0/2(Ems)) und Kapillarschicht (R-KB-Q-2/10) der Natur-Recyclingmaterialkombination A: Parameter abgeleitet aus Labor-Stechzylindermessungen im Drucktopfverfahren B: Parameter abgeleitet aus Tensiometer- und FDR-Messungen während des Kipprinnenversuchs	131
Tabelle 6.2: In den Empfindlichkeitsstudien verwendete gemessene bzw. berechnete gesättigte Wasserleitfähigkeiten von Kapillarschicht- und -blockmaterial der Natur-Recyclingmaterialkombination	136

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Zeitliche Entwicklung des Abfallrechts auf den verschiedenen Rechtsebenen.....	4
Abbildung 2.2: Darstellung der Einbauklassen nach LAGA M20 (2003).....	11
Abbildung 2.3: Verwertung und Beseitigung von Bauschutt im Jahr 2000 (KWTB 2003)	17
Abbildung 3.1: Wasserretentionskurven verschiedener Bodenarten (nach STEINERT 1999).....	21
Abbildung 3.2: Schematische Wasserspannungs-Wassergehalts-Beziehung (oben) und Wasser- spannungs-Wasserleitfähigkeits-Beziehung (unten) von Kapillarschicht- und Kapillarblock materialien (nach STEINERT 1999, verändert)	25
Abbildung 4.1: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Filterstabilität	47
Abbildung 4.2: Fensterausschnitt der Versuchssäule zum Nachweis der Filterstabilität nach Ende einer fünfstündigen Durchströmung	48
Abbildung 4.3: Kipprinne (6 m lang).....	59
Abbildung 4.4: Beregnungssystem mit Düse, Magnetventil, Durchlaufmesser und Druckregler	60
Abbildung 4.5: Antrieb des Beregnungs-schlittens und Anordnung der Messgeräte	60
Abbildung 4.6: Stirnwandbewässerung.....	61
Abbildung 4.7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Kipprinne mit Positionierung der Messgeräte	62
Abbildung 4.8: Kapillarblock - inklusive Messgeräte-Einbau	63
Abbildung 4.9: Verdichtung des Kapillarblocks mit anschließender Begradigung.....	63
Abbildung 4.10: Kapillarschichteinbau; Verdichtung des Sandes und anschließendes Aufräuen der eingebauten Schicht	63
Abbildung 4.11: Schematische Darstellung der Zufluss-Abfluss-Beziehung aus Kipprinnen- versuchen zur Herleitung der lateralen Dränkapazität.....	65
Abbildung 4.12: Aufbau des Finite-Elementenetz der 6 m langen Kipprinne in 15° Neigung	68
Abbildung 5.1: Korngrößenverteilungen der untersuchten Bauschuttrecycling- und Naturmaterialien	71
Abbildung 5.2: Grenzfläche der Naturmaterialkombination nach 5-stündiger Durchströmung	74
Abbildung 5.3: Grenzfläche der Natur-Recyclingmaterialkombination nach 5-stündiger Durchströmung.....	74
Abbildung 5.4: Bandbreiten günstiger Kornverteilungskurven für Kapillarschicht (KS)- und Kapillarblock (KB)-Materialien nach WEIGEL (1993) - grau - und VON DER HUDE (1999) – schwarz - ...	76
Abbildung 5.5: Einordnung geeigneter Materialien – N-KS-0/2 (Rhein/Main), N-KS-0/2(Ems) und N-KB-2/5 in die Bandbreiten nach VON DER HUDE (1999)	77
Abbildung 5.6: Einordnung geeigneter Materialien – R-KS-Q-0/2, N-KS-0/2 (Rhein/Main), N-KS-0/2(Ems) und R-KB-2/11 - in die Bandbreiten nach WEIGEL (1993)	78
Abbildung 5.7: Gegenüberstellung der Wasserretentionsbeziehungen des Bauschuttrecycling- sands R-KS-Q-0/2 mit den Kapillarblockmaterialien R-KB-2/11, R-KB-Q-2/10 sowie N-KB-2/5.....	79
Abbildung 5.8: Gegenüberstellung der Wasserretentionsbeziehungen der Natursande N-KS-0/2(Rhein/Main) und N-KS-0/2(Ems) mit den Kapillarblockmaterialien R-KB-2/11, R-KB-Q-2/10 sowie N-KB-2/5	80
Abbildung 5.9: Porengrößenverteilungen der Kapillarschichtmaterialien R-KS-Q-0/2, N-KS-0/2(Rhein/Main) und N-KS-0/2(Ems)	81
Abbildung 5.10: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für verschiedene Kapillarschicht und -blockmaterialien.....	84

Abbildung 5.11: Abhängigkeit des Feinkornanteils < 0,125 mm der Materialien R-KS-0/3 ($\rho=2,55 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), R-KS-Q-0/3 ($\rho=2,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) und R-KS-Q-0/2 ($\rho=2,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) von der mechanischen Belastung im Kornzertrümmerungsversuch (Fehlerbalken stellen Standardabweichung dar).....	86
Abbildung 5.12: Korngrößenverteilungen von R-KB-2/11 vor und nach mechanischer Belastungen von 48 und 96 Schlägen	87
Abbildung 5.13: Korngrößenverteilungen von R-KB-5/22 vor und nach mechanischer Belastungen von 48 und 96 Schlägen	87
Abbildung 5.14: Korngrößenverteilungen von R-KB-Q-2/10 vor und nach mechanischer Belastungen von 48 und 96 Schlägen	88
Abbildung 5.15: Abhängigkeit des Feinkornanteils < 0,5 mm des Materials R-KB-Q-2/10 von der mechanischen Belastung des Kornzertrümmerungsversuchs (Mittelwert mit Standardabweichung) ..	89
Abbildung 5.16: Kupferkonzentrationen des Eluats in Abhängigkeit der Schüttelzeit	96
Abbildung 5.17: Abflussverhalten der Naturmaterialkombination N-KS-0/2(Ems) mit N-KB-2/5 bei 15° Neigung und steigender Zuflussrate.....	102
Abbildung 5.18: Zusammenhang zwischen Zuflussrate und Kapillarschichtabfluss (oben) und Kapillarblockabfluss (unten) für die Naturmaterialkombination (N-KS-0/2(Ems) mit N-KB-2/5) im Kipprinnenversuch bei 15° Neigung.....	103
Abbildung 5.19: Matrixpotenziale [hPa] in Abhängigkeit der Zuflussrate [$\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$] während des Kipprinnenversuchs der Naturmaterialkombination N-KS-0/2(Ems) mit N-KB-2/5; Segment 1 (Rinnenkopf) bis Segment 6 (Rinnenfuß) jeweils in den Höhen 52 cm, 35 cm, 25 cm in der Kapillarschicht und 11 cm im Kapillarblock (gemessen von Rinnenboden)	106
Abbildung 5.20: Wassergehalte [Vol.-%] in Abhängigkeit der Zuflussrate [$\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$] während des Kipprinnenversuchs der Naturmaterialkombination N-KS-0/2(Ems) mit N-KB-2/5; Segment 1 (Rinnenkopf) bis Segment 6 (Rinnenfuß) jeweils in den Höhen 52 cm, 35 cm, 25 cm in der Kapillarschicht und 11 cm im Kapillarblock (gemessen von Rinnenboden)	107
Abbildung 5.21: Vergleich der Retentionsbeziehungen für das Material der Kapillarschicht N-KS-0/2(Ems) (oben) und des Kapillarblocks N-KB-2/5 (unten) ermittelt aus Messwerten des Kipprinnenversuchs der Naturmaterialkombination bzw. mittels Drucktopf-Methode	108
Abbildung 5.22: Wasserleitfähigkeitsfunktionen von N-KS-0/2(Ems) und N-KB-2/5 basierend auf den Retentionsbeziehungen der Drucktopf-Methode im Vergleich zu der Wasserleitfähigkeitsfunktion von N-KS-0/2(Ems) ermittelt aus den während des Kipprinnenversuchs der Naturmaterialkombination herrschenden Matrixpotenzialen und Wassergehalten	110
Abbildung 5.23: Abflussverhalten der Recyclingmaterialkombination R-KS-Q-0/2 mit R-KB-Q-2/10 bei 15° Neigung und steigender Zuflussrate.....	111
Abbildung 5.24: Zusammenhang zwischen Zuflussrate und Kapillarschichtabfluss (oben) und Kapillarblockabfluss (unten) für die Recyclingmaterialkombination (R-KS-Q-0/2 mit R-KB-Q-2/10) im Kipprinnenversuch bei 15° Neigung.....	112
Abbildung 5.25: Matrixpotenziale [hPa] in Abhängigkeit der Zuflussrate [$\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$] während des Kipprinnenversuchs der Recyclingmaterialkombination R-KS-Q-0/2 mit R-KB-Q-2/10; Segment 1 (Rinnenkopf) bis Segment 6 (Rinnenfuß) jeweils in den Höhen 52 cm, 35 cm, 25 cm in der Kapillarschicht und 11 cm im Kapillarblock (gemessen von Rinnenboden)	113
Abbildung 5.26: Wassergehalte [Vol.-%] in Abhängigkeit der Zuflussrate [$\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$] während des Kipp-rinnenversuchs der Recyclingmaterialkombination R-KS-Q-0/2 mit R-KB-Q-2/10; Segment 1 (Rinnenkopf) bis Segment 6 (Rinnenfuß) jeweils in den Höhen 52 cm, 35 cm, 25 cm in der Kapillarschicht und 11 cm im Kapillarblock (gemessen von Rinnenboden)	114
Abbildung 5.27: Vergleich der Retentionsbeziehungen für das Material der Kapillarschicht R-KS-Q-0/2 (oben) und des Kapillarblocks R-KB-Q-2/10 (unten) ermittelt aus Messwerten des Kipprinnenversuchs der Recyclingmaterialkombination bzw. mittels Drucktopf-Methode	116
Abbildung 5.28: Abflussverhalten der Natur-/Recyclingmaterialkombination N-KS-0/2(Ems) mit R-KB-Q-2/10 bei 15° Neigung.....	117

Abbildung 5.29: Zusammenhang zwischen Zuflussrate und Kapillarschichtabfluss (oben) und Kapillarblockabfluss (unten) für die Natur-/Recyclingmaterialkombination (N-KS-0/2(Ems) mit R-KB-Q-2/10) im Kipprinnenversuch bei 15° Neigung.....	118
Abbildung 5.30: Matrixpotenziale [hPa] in Abhängigkeit der Zuflussrate [$L \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$] während des Kipprinnenversuchs der Natur-/Recyclingmaterialkombination N-KS-0/2(Ems) mit R-KB-Q-2/10; Segment 1 (Rinnenkopf) bis Segment 6 (Rinnenfuß) jeweils in den Höhen 52 cm, 35 cm, 25 cm in der Kapillarschicht und 11 cm im Kapillarblock (gemessen von Rinnenboden)	121
Abbildung 5.31: Wassergehalte [Vol.-%] in Abhängigkeit der Zuflussrate [$L \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$] während des Kipprinnenversuchs der Natur-/Recyclingmaterialkombination N-KS-0/2(Ems) mit R-KB-Q-2/10; Segment 1 (Rinnenkopf) bis Segment 6 (Rinnenfuß) jeweils in den Höhen 52 cm, 35 cm, 25 cm in der Kapillarschicht und 11 cm im Kapillarblock (gemessen von Rinnenboden)	122
Abbildung 5.32: Vergleich der Retentionsbeziehungen für das Material der Kapillarschicht N-KS-0/2(Ems) (oben) und des Kapillarblocks R-KB-Q-2/10 (unten) ermittelt aus Messwerten des Kipprinnenversuchs der Natur-/Recyclingmaterialkombination bzw. mittels Drucktopf-Methode	123
Abbildung 5.33: Wasserleitfähigkeitsfunktionen von N-KS-0/2(Ems) und R-KB-Q-2/10 basierend auf den Retentionsbeziehungen der Drucktopf-Methode im Vergleich zu der Wasserleitfähigkeitsfunktion von N-KS-0/2(Ems) ermittelt aus den, während des Kipprinnenversuchs der Natur-/Recyclingmaterialkombination herrschenden Wasserspannungen und Wassergehalten.....	125
Abbildung 6.1: Gegenüberstellung der im Kipprinnenversuch und in den Simulationen eingesetzten Zuflüsse (oben) sowie gemessenen und mittels Parameterkombination A (Drucktopfverfahren) und B (Tensiometer-/FDR-Sondenmessungen) berechneten Kapillarschicht- (Mitte) und Kapillarblockabflüsse (unten) des Kipprinnenversuchs der Natur-/Recyclingmaterialkombination bei 15° Neigung (vgl. Tab. 6.1)	132
Abbildung 6.2: Zufluss-Kapillarblockabflussbeziehung des mittels der Parameterkombination A (Labor-Drucktopfverfahren) simulierten Kipprinnenversuchs der Natur-Recyclingmaterialkombination bei 15° Neigung (vgl. Parameter in Tab. 6.1).....	134
Abbildung 6.3: Zufluss-Kapillarblockabflussbeziehung des mittels der Parameterkombination B (Tensiometer-/FDR-Sondenmessungen) simulierten Kipprinnenversuchs der Natur-Recyclingmaterialkombination bei 15° Neigung (vgl. Parameter in Tab. 6.1)	134
Abbildung 6.4: Gegenüberstellung von Zufluss, Kapillarschicht- und Kapillarblockabfluss der Parameterkombination A unter Verwendung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten nach Variante I (oben), Variante II (Mitte), und Variante III (unten) (vgl. Tab. 6.2)	138
Abbildung 6.5: Gegenüberstellung von Zufluss, Kapillarschicht- und Kapillarblockabfluss der Parameterkombination B unter Verwendung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten nach Variante I (oben), Variante II (Mitte), und Variante III (unten) (vgl. Tab. 6.2)	139
Abbildung 6.6: Gegenüberstellung von Zufluss, Kapillarschicht- und Kapillarblockabfluss der Simulationen anhand der Parameterkombination B (Tabelle 6.1) mit Zuflussratensteigerungen von $1 L \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$ (oben), 10 bis $50 L \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$ (Mitte) sowie 100 und $150 L \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$ (unten) bei 15° Neigung	143
Abbildung 7.1: Bestimmung der lateralen Dränkapazität aus dem Kipprinnenversuch der Naturmaterialkombination bei 15° Neigung nach STEINERT (1999) – oben - und mittels spezieller Regressionsanalyse – unten.....	147
Abbildung 7.2: Bestimmung der lateralen Dränkapazität aus dem Kipprinnenversuch der Natur-/Recyclingmaterialkombination bei 15° Neigung nach STEINERT (1999) – oben - und mittels spezieller Regressionsanalyse – unten	148

Verzeichnis des Anhangs

Tabellen

Tabelle A 1.1: Materialeigenschaften von R-KS-0/3.....	183
Tabelle A 1.2: van-Genuchten-Parameter von R-KS-0/3 (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 1.2).....	183
Tabelle A 2.1: Materialeigenschaften von R-KS-0,71/2.....	184
Tabelle A 2.2: van-Genuchten-Parameter von R-KS-0,71/2 (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 2.2).....	184
Tabelle A 3.1: Materialeigenschaften von R-KS-Q-0/3.....	185
Tabelle A 3.2: van-Genuchten-Parameter von R-KS-Q-0/3 (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 3.2).....	185
Tabelle A 4.1: Materialeigenschaften von R-KS-Q-0/2.....	186
Tabelle A 4.2: van-Genuchten-Parameter von R-KS-Q-0/2 (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 4.2).....	186
Tabelle A 5.1: Materialeigenschaften von N-KS-0/1(Rhein/Main).....	187
Tabelle A 5.2: van-Genuchten-Parameter von N-KS-0/1(Rhein/Main) (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 5.2).....	187
Tabelle A 6.1: Materialeigenschaften von N-KS-0/2(Rhein/Main).....	188
Tabelle A 6.2: van-Genuchten-Parameter von N-KS-0/2(Rhein/Main) (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 6.2).....	188
Tabelle A 7.1: Materialeigenschaften von N-KS-0/2(Ems).....	189
Tabelle A 7.2: van-Genuchten-Parameter von N-KS-0/2(Ems) (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 7.2).....	189
Tabelle A 8.1: Materialeigenschaften von R-KB-2/11.....	190
Tabelle A 8.2: van-Genuchten-Parameter von R-KB-2/11 (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 8.2).....	190
Tabelle A 9.1: Materialeigenschaften von R-KB-5/22.....	191
Tabelle A 9.2: van-Genuchten-Parameter von R-KB-5/22 (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 9.2).....	191
Tabelle A 10.1: Materialeigenschaften von R-KB-Q-2/10.....	192
Tabelle A 10.2: van-Genuchten-Parameter von R-KB-Q-2/10 (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 10.2).....	192
Tabelle A 11.1: Materialeigenschaften von N-KB-2/5.....	193
Tabelle A 11.2: van-Genuchten-Parameter von N-KB-2/5 (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 11.2).....	193
Tabelle B 1: Charakterisierung des Natur-Kapillarschichtmaterials N-KS-0/2(Ems) anhand stereomikroskopischer und polarisationsmikroskopischer Untersuchungen (aus STRÜBEL 2003).....	194
Tabelle B 2: Charakterisierung des Natur-Kapillarblockmaterials N-KB-2/5 anhand stereomikroskopischer und polarisationsmikroskopischer Untersuchungen (aus STRÜBEL 2003).....	194
Tabelle C 1: Gegenüberstellung der Feststoffuntersuchung der Kapillarschichtmaterialien mit den LAGA-Zuordnungswerten für Recyclingbaustoffe (1997).....	195
Tabelle C 2: Gegenüberstellung der Feststoffuntersuchung der Kapillarblockmaterialien mit den LAGA-Zuordnungswerten für Recyclingbaustoffe (1997).....	195

Abbildungen

Abbildung A 1.1: Korngrößenverteilung von R-KS-0/3	183
Abbildung A 1.2: Wasserretentionsbeziehung für R-KS-0/3.....	183
Abbildung A 1.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für R-KS-0/3 ...	183
Abbildung A 2.1: Korngrößenverteilung von R-KS-0,71/2	184
Abbildung A 2.2: Wasserretentionsbeziehung für R-KS-0,71/2	184
Abbildung A 2.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für R-KS-0,71/2	184
Abbildung A 3.1: Korngrößenverteilung von R-KS-Q-0/3	185
Abbildung A 3.2: Wasserretentionsbeziehung für R-KS-Q-0/3.....	185
Abbildung A 3.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für R-KS-Q-0/3	185
Abbildung A 4.1: Korngrößenverteilung von R-KS-Q-0/2	186
Abbildung A 4.2: Wasserretentionsbeziehung für R-KS-Q-0/2	186
Abbildung A 4.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für R-KS-Q-0/2.....	186
Abbildung A 5.1: Korngrößenverteilung von N-KS-0/1(Rhein/Main)	187
Abbildung A 5.2: Wasserretentionsbeziehung für N-KS-0/1(Rhein/Main)	187
Abbildung A 5.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für N-KS-0/1(Rhein/Main).....	187
Abbildung A 6.1: Korngrößenverteilung von N-KS-0/2(Rhein/Main)	188
Abbildung A 6.2: Wasserretentionsbeziehung für N-KS-0/2(Rhein/Main)	188
Abbildung A 6.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für N-KS-0/2(Rhein/Main).....	188
Abbildung A 7.1: Korngrößenverteilung von N-KS-0/2(Ems)	189
Abbildung A 7.2: Wasserretentionsbeziehung für N-KS-0/2(Ems)	189
Abbildung A 7.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für N-KS-0/2(Ems).....	189
Abbildung A 8.1: Korngrößenverteilung von R-KB-2/11	190
Abbildung A 8.2: Wasserretentions-beziehung für R-KB-2/11	190
Abbildung A 8.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für R-KB-2/11 ...	190
Abbildung A 9.1: Korngrößenverteilung von R-KB-5/22	191
Abbildung A 9.2: Wasserretentionsbeziehung für R-KB-5/22.....	191
Abbildung A 9.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für R-KB-5/22 ...	191
Abbildung A 10.1: Korngrößenverteilung von R-KB-Q-2/10	192
Abbildung A 10.2: Wasserretentionsbeziehung für R-KB-Q-2/10.....	192
Abbildung A 10.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für R-KB-Q-2/10	192
Abbildung A 11.1: Korngrößenverteilung von N-KB-2/5	193
Abbildung A 11.2: Wasserretentionsbeziehung für N-KB-2/5.....	193
Abbildung A 11.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für N-KB-2/5 ...	193

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AbfAbIV	Abfallablagerungsverordnung
AbfG	Abfallgesetz
DepRL	Europäische Deponierichtlinie
DepV	Deponieverordnung
DepVerwV	Deponieverwertungsverordnung
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
KBB	Kapillarblockbahnen
KB	Kapillarblock
KS	Kapillarschicht
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LAGA M20	Mitteilung 20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
N	Naturmaterial
Q	Qualitätsmaterial
R	Bauschutt-Recyclingmaterial
TA Abfall	Technische Anleitung Abfall
TASi	Technische Anleitung Siedlungabfall
TR Boden	Technischen Regeln für die Verwertung von Bodenmaterial
Tens 52 cm	Kapillarschicht-Tensiometer in 52 cm Höhe (von Rinnenboden gemessen)
Tens 35 cm	Kapillarschicht-Tensiometer in 35 cm Höhe (von Rinnenboden gemessen)
Tens 25 cm	Kapillarschicht-Tensiometer in 25 cm Höhe (von Rinnenboden gemessen)
Tens 11 cm	Kapillarblock-Tensiometer in 11 cm Höhe (von Rinnenboden gemessen)
FDR 52 cm	Kapillarschicht-FDR-Sonde in 52 cm Höhe (von Rinnenboden gemessen)
FDR 35 cm	Kapillarschicht-FDR-Sonde in 35 cm Höhe (von Rinnenboden gemessen)
FDR 25 cm	Kapillarschicht-FDR-Sonde in 25 cm Höhe (von Rinnenboden gemessen)
FDR 11 cm	Kapillarblock-FDR-Sonde in 11 cm Höhe (von Rinnenboden gemessen)
F	Filterstabilität
U	Ungleichförmigkeit

Abkürzung/ Symbol	Einheit	Bedeutung
A	cm ²	Fließquerschnitt
$1 \cdot \alpha^{-1}$	$1 \cdot \text{cm}^{-1}$	Luft Eintrittswert
β	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$	Neigungswinkel der Grenzfläche
b	$1 \cdot \text{m}^{-1}$	Exponentialkoeffizient der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit $k(\Psi) = k_s \cdot e^{(b \cdot \Psi_m)}$
d_{10}	mm	Korndurchmesser des Siebdurchgangs bei 10 Masse-%
d_{60}	mm	Korndurchmesser des Siebdurchgangs bei 60 Masse-%
d_{15}^{KB}	mm	Korndurchmesser des Siebdurchgangs KB-Material bei 15 Masse-%
d_{85}^{KS}	mm	Korndurchmesser des Siebdurchgangs KS-Material bei 85 Masse-%
h	cm	Druckhöhengradient
h_{KS}	cm WS	kapillare Steighöhen des Kapillarschicht
h_{KB}	cm WS	kapillare Steighöhen des Kapillarblockmaterials
h_{crit}	cm WS	kritisches Matrixpotenzial
K	°	Kalvin
k_f	$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	gesättigte Wasserleitfähigkeit
k_u	$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	ungesättigte Wasserleitfähigkeit
k_Ψ	$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Wasserleitfähigkeit
L	m, cm	Abschlagslänge des Hangs, Länge der Fließstrecke
n, m		van-Genuchten-Parameter
Ψ	hPa	Gesamtpotenzial
Ψ_a	m WS	Luft Eintrittswert der Kapillarschicht
Ψ_g	hPa	Gaspotenzial
Ψ_H	hPa	hydraulisches Potenzial
Ψ_m	hPa	Matrixpotenzial
Ψ_o	hPa	osmotisches Potenzial
Ψ_w	m WS	Wassereintrittswert des Kapillarblocks
Ψ_z	hPa	Gravitationspotenzial
Ψ_Ω	hPa	Auflast-Potenzial
q	$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	spezifische Durchflussrate
q_v	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	vertikale Infiltrationsrate
t	s	Zeit
θ	$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, Vol.-%	Wassergehalt

Abkürzung/ Symbol	Einheit	Bedeutung
θ_r	$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, Vol.-%	Residualwassergehalt
θ_s	$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, Vol.-%	Wassergehalt bei Sättigung
θ_ψ	$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, Vol.-%	Wassergehalt bei Wasserspannung ψ
V	cm^3	perkolierendes Wasservolumen
z	cm	Fließstrecke

Kurzfassung

Vergleichende Untersuchungen von Kapillarsperren aus Natur- und Recyclingbaustoffmaterialien als Beitrag zur Deponieoberflächenabdichtung und Ressourcenschonung

Die Kapillarsperre stellt ein alternatives Deponieoberflächenabdichtungssystem dar, das im Laufe des vorangegangenen Jahrzehnts große Anerkennung erlangt hat (BARTH 2003, JELINEK 1997, MELCHIOR 1993, STEINERT 1999, WOHLICH 1991 u. a.). Im Hinblick auf die drohende Knappheit an Primärbaustoffen und Ressourcenschonung im Zusammenhang der durchzuführenden Deponiestilllegungen war es das Ziel der vorliegenden Arbeit, die Eignung von Bauschutt-Recyclingmaterialien in Kapillarsperrensystemen zu untersuchen.

Zu diesem Zweck wurden 7 Recycling- sowie 4 Naturmaterialien verschiedener Qualitäten und Körnungen auf ihre Tauglichkeit für den Einsatz als Kapillarsperrenmaterialien analysiert. Zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit sind die Zuordnungskriterien der DEPVERWV (2005) heranzuziehen.

Basierend auf den umfangreichen laboranalytischen Voruntersuchungen anhand bereits etablierter Gütekriterien wurden drei Materialkombinationen ausgewählt, die in Kipprinnenversuchen weiterführend auf ihre laterale Dränkapazität getestet wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Referenz, eine reine Naturmaterialkombination, eine potenzielle laterale Dränkapazität von $273 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ besitzt. Bei der reinen Recyclingmaterialkombination kann lediglich eine potenzielle laterale Dränkapazität von $64 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ festgestellt werden. Die Natur-/Recyclingmaterialkombination, mit dem Natursand der ersten Kombination und dem Recyclingkies der zweiten Kombination, erlangte hingegen eine potenzielle laterale Dränkapazität von $306 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Für eine standardisierte Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Kapillarsperrensystemen wurde ein regressionsanalytischer Ansatz entwickelt. Die Vorteile des Regressionsmodells zu den bestehenden Berechnungsmethoden und Ableitungsempfehlungen werden exemplarisch dargestellt und diskutiert.

Der Kipprinnenversuch mit der Natur-Recyclingmaterialkombination wurde mittels des Modells HYDRUS-2D nachgebildet. Resultierend aus den Simulationsergebnissen können Großkipprinnenversuche derzeit nur begrenzt durch numerische Modellierungen ersetzt werden, um den versuchstechnischen Aufwand zu reduzieren.

Mit Hilfe der physikalischen, mechanischen und chemischen Untersuchungen sowie der Untersuchungen zur hydraulischen Leistungsfähigkeit im Kipprinnenversuch konnte die prinzipielle Eignung von Bauschutt-Recyclingmaterial für den Einsatz als Kapillarsperrenmaterial in einer Kapillarsperre als alternatives Deponieoberflächenabdichtungssystem nachgewiesen werden. Die Übertragung der Ergebnisse auf andere Bauschutt-Recyclingmaterialien setzt allerdings voraus, dass das Material zuvor qualifiziert untersucht wird.

Stichwörter: Kapillarsperre, laterale Dränkapazität, Deponieersatzbaustoff, Deponie, Oberflächenabdichtung, Stilllegung, Kipprinnenversuch

Abstract

Comparative study of capillary barriers composed of natural and waste recycling construction materials relating to surface sealing and natural resources protection

The capillary barrier is an alternative surface sealing system, which has obtained a high acceptance during the past decade (BARTH 2003, JELINEK 1997, MELCHIOR 1993, STEINERT 1999, WOHNLICH 1991 u. a.). With regard to the imminent scarcity of natural construction materials relating to the closure of landfills and environmental concerns, the main purpose of this research was to examine and verify the suitability of waste recycling construction materials for their use in capillary barrier systems.

Therefore, seven recycling and four natural materials of different qualities and particle-size distributions were analysed in terms of their suitability as fine layer and coarse layer, respectively. The criteria of the DEPVERWV (2005) for the classification of materials have to be consulted for the evaluation of the environmental compatibility.

Based on extensive preliminary laboratory examinations for established quality factors, three combinations of materials were chosen. These combinations were continuously tested in an experimental tank for testing capillary barriers with regards to their lateral diversion capacity. The test results in the experimental tank demonstrate that the combination of natural material, the reference, has a potential lateral diversion capacity of $273 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. The combination of recycling material merely demonstrates a potential lateral diversion capacity of $64 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. The combination of sand from the natural material combination and gravel from the recycling material combination achieved a potential lateral diversion capacity of $306 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

In order to deal with a standardised evaluation of the hydraulic capability of capillary barrier systems, an approach of regression analysis has been developed. The advantages of the regression model, in comparison to the existing calculation methods as well as recommendations of interpretation, are presented and discussed.

The test with the combination of natural-recycling material in the experimental tank was reproduced by using the model HYDRUS-2D. Nevertheless, it could be shown that the use of numerical models to reduce the effort of testing is limited.

The principle suitability of recycling materials used as a coarse layer in a capillary barrier as an alternative surface sealing system for landfills could be verified by the physical, mechanical and chemical analyses, as well as the analyses of the hydraulic performance in the experimental tank. A qualified preliminary examination of the material is inevitable for transferring these results to other recycling materials.

keywords: capillary barrier, lateral diversion capacity, alternative construction material, landfill, surface sealing, landfill closure, experimental tank

1 Einleitung und Zielsetzung

Oberflächenabdichtungen haben primär das Ziel, Wasserflüsse aus Niederschlag in den Deponiekörper zu unterbinden, um die Mobilisierung und Emission von Schadstoffen zu verhindern. Grundsätzlich bestehen diese Systeme aus mehreren Komponenten, von denen auch die Rekultivierungsschicht als ein Dichtungselement betrachtet werden sollte. Als weitere Komponente werden für die Regelabdichtung nach den Vorgaben geltender Verordnungen bzw. Verwaltungsvorschriften bindige Mineralstoffe mit geringer Durchlässigkeit eingesetzt, bei höheren Anforderungen unter zusätzlichem Einsatz einer Kunststoffdichtungsbahn (TASi 1993, DEPv 2002). Im Zusammenhang mit der seit 1993 geltenden Verwaltungsvorschrift TECHNISCHE ANLEITUNG SIEDLUNGSABFÄLLE (kurz TASi), die den Aufbau der Deponieoberflächenabdichtungssysteme regelt, hat sich eine anhaltende Diskussion über auftretende Probleme entwickelt. So konnte nachgewiesen werden, dass durch Rissbildungen aufgrund der Austrocknung der mineralischen Dichtung mit deutlichen Einschränkungen der Dichtwirkung zu rechnen ist (HORN 2004, MELCHIOR 1993). Daneben können mechanische Belastungen - wie z. B. partielle Setzungen des Deponiekörpers - Defekte in der bindigen mineralischen Barriere als auch in der Kunststoffdichtungsbahn bewirken, womit ein Eindringen von Sickerwässern in den Deponiekörper nicht mehr verhindert werden kann.

Mit der DEPONIEVERORDNUNG (DEPV 2002) wurde der Einsatz alternativer Oberflächenabdichtungssysteme anstelle der herkömmlichen Regelabdichtung auf Deponien vereinfacht, sofern das System oder die Systemkomponenten als gleichwertig eingestuft werden können. Eine Alternative stellt die Kapillarsperre dar, die schon im Laufe des vorangegangenen Jahrzehnts große Anerkennung erlangt hat (BARTH 2003, BAUER 2001, JELINEK 1997, KÄMPF 2000, MELCHIOR 1993, STEINERT 1999, VON DER HUDE 1999, WOHLICH 1991, ZISCHAK 1997). Als besondere Vorteile der Kapillarsperre gegenüber einer Regelabdichtung nach TASi oder DEPv werden vorrangig die Unempfindlichkeit gegen Austrocknung, die einfache Qualitätssicherung und die Standsicherheit an steilen Böschungen ($> 1:3$) hervorgehoben sowie der nahezu witterungsunabhängige Einbau (JELINEK 1997).

Kapillarsperren sind geschichtete Systeme aus nicht bindigen Böden und einer deutlichen Schichtgrenze. Eine sandige Kapillarschicht liegt über einem meist kiesigen Kapillarblock. Wasser, das in die Kapillarschicht infiltriert, wird in der Matrix kapillar gebunden und fließt oberhalb der Schichtgrenze im Porenraum der Kapillarschicht lateral ab - also dem Hang und nicht allein der Schwerkraft in den Kapillarblock folgend.

Die vertikale Versickerung wird zum einen verhindert durch die Grenzflächenspannung am Übergang der wassergefüllten Poren in der Kapillarschicht zu den luftgefüllten Poren des Kapillarblocks. Zum anderen ergeben sich aus den ungesättigten

Verhältnissen im Kapillarkblock nur sehr geringe Fließquerschnitte, da nur der Wasser gefüllte Anteil der Poren für die Wasserleitung zur Verfügung steht.

Die bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen zu Kapillarsperren befassten sich in Freilandversuchen mit der bautechnischen Realisierbarkeit und der Dichtwirkung des Systems unter natürlichen klimatischen Verhältnissen (BARTH 2003, JELINEK 1997, MELCHIOR 1993, ZISCHAK 1997). Grundlage für das Funktionsverständnis bzw. für die Dimensionierung von Kapillarsperren bildeten Versuche zur Identifikation idealer Materialeigenschaften (KÄMPF 2000, STEINERT 1999, VON DER HUDE 1999). In Kipprinnenversuchen wurden sowohl Grenzen des Systems, wie z. B. Einfluss von Hangneigung und Hanglänge (STEINERT 1999), untersucht als auch insbesondere die Fließprozesse in Kapillarsperren und ihre Leistungsfähigkeiten, die als laterale Dränkapazität angegeben wird (KÄMPF 2000, STEINERT 1999, VON DER HUDE 1999).

Neben der Entwicklung von alternativen Deponieoberflächenabdichtungen spielt vor dem Hintergrund, dass ab 2005 Deponien verstärkt still gelegt und renaturiert werden, die Verwendung von Deponieersatzbaustoffen eine immer größere Bedeutung. Denn es muss befürchtet werden, dass sich aufgrund des immens steigenden Bedarfs an Baustoffen eine Knappheit der Primärbaustoffe mit einer entsprechenden Preissteigerung entwickeln wird. Durch den Einsatz mineralischer Abfälle in Deponieoberflächenabdichtungen können sowohl natürliche Baustoffe eingespart und Ressourcen geschont, als auch finanzielle Vorteile erreicht werden.

Die in Deutschland bereits zahlreich als Deponieoberflächenabdichtung zum Einsatz gekommenen Kapillarsperren (MELCHIOR & STEINERT 2001) wurden ausschließlich mit Naturmaterialien hergestellt. Dies macht den Forschungsbedarf bezüglich der Eignung mineralischer Abfälle als Kapillarsperrenmaterial deutlich.

In Deutschland fallen jährlich etwa 300 Mio. Mg einsetzbarer sekundärer Rohstoffe an. Davon nimmt der Bereich Bauschuttabfälle, Straßenaufbruch und Bodenaushub den größten Anteil in Anspruch. Er entspricht mit ca. 250 Mio. Mg in etwa zwei Drittel des gesamten Siedlungsabfallaufkommens in der Bundesrepublik und stellt somit als Lieferant von Bauersatzstoffen für den Deponiebau ein großes Potenzial dar (KWTB 2003).

Der Einsatz mineralischer Abfälle entspricht dem Verwertungsgedanken des KrW-/ABFG (1996). Nach § 4 Abs. 3 Satz 1 wird die stoffliche Verwertung als „Substitution von Rohstoffen durch das Gewinnen von Stoffen aus Abfällen (sekundäre Rohstoffe) oder die Nutzung der stofflichen Eigenschaften der Abfälle [...]“ definiert. Zielsetzung ist es, Abfälle zur Schonung natürlicher Ressourcen nutzbar zu machen, die sich aufgrund ihrer bautechnischen und bauphysikalischen Beschaffenheit sehr gut für die Verwendung als Deponieersatzbaustoff eignen.

Allerdings werden an Deponieersatzbaustoffe besondere Anforderungen gestellt, um die Freisetzung umweltrelevanter Stoffe zu vermeiden. Seit September 2005 werden diese Anforderungen über die DEPONIEVERWERTUNGSVERORDNUNG (DEPVERWV 2005) geregelt. Für den Einsatz mineralischer Abfälle in Deponieoberflächenabdichtungen bedeutet dies Einschränkungen im Vergleich der zuvor angewandten Grenzwerte, die sich an den „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen“ der LAGA (1997) orientierten. Allerdings lässt die DEPVERWV Ausnahmen zu, sofern im Rahmen einer Risikobewertung der Nachweis erbracht wird, dass trotz Überschreitung einzelner Zuordnungswerte keine Umweltbeeinträchtigungen einhergehen. Unter diesen Umständen kann die zuständige Behörde den Einsatz entsprechender Deponieersatzbaustoffe im Einzelfall zulassen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Eignung von Bauschutt-Recyclingmaterialien in Kapillarsperrensystemen zu untersuchen.

Dazu sollen verschiedene Bauschutt- sowie Naturmaterialien auf Basis der sich im Laufe der Kapillarsperrenforschung entwickelten Gütekriterien in einem ersten Schritt bezüglich ihrer physikalischen, chemischen und mechanischen Materialeigenschaften überprüft werden.

Daran sollen sich Kipprinnenversuche unter Einsatz der vorab untersuchten Bauschutt- und Naturmaterialkombinationen mit dem Ziel anschließen, die hydraulische Leistungsfähigkeit der verschiedenen Kapillarsperrensysteme zu bewerten, die auch als so genannte laterale Dränkapazität bewertet wird.

Über numerische Simulationen sollen in einem dritten Schritt die Ergebnisse der Kipprinnenversuche modellhaft nachgebildet werden, um zu untersuchen, ob mit Hilfe des Modells HYDRUS-2D der versuchstechnische Aufwand für den Nachweis der Leistungsfähigkeit einer Kapillarsperrenkombination verringert werden kann. Des Weiteren sollen Empfindlichkeitsstudien mit dem validierten Simulationsmodell gerechnet werden, um Prozess- und Versuchsrelevante Randbedingungen und Materialkenngrößen zu identifizieren und zu bewerten.

Letztlich sollen die gewonnenen Ergebnisse dazu dienen, die bestehenden Empfehlungen und Anforderungen, die im Regelfall für natürliche Kapillarsperrenmaterialkomponenten entwickelt wurden, dahingehend zu prüfen, ob bisherige Richtwerte uneingeschränkt auf den Einsatz von Bauschutt-Recyclingmaterialien in einer Kapillarsperre übertragen werden können.

2 Möglichkeiten alternativer Deponieoberflächenabdichtungen unter Einsatz mineralischer Abfälle

2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Durch den Einsatz von mineralischen Abfällen in Deponieoberflächenabdichtungen bzw. im Bereich der Profilierung können sowohl natürliche Baustoffe eingespart und Ressourcen geschont, als auch eventuell finanzielle Vorteile erreicht werden (MELCHIOR 2005, WOHLNICH ET AL. 1996). Vor dem Hintergrund, dass ab 2005 verstärkt Deponien stillgelegt und renaturiert werden müssen, scheint die Verwendung von Deponieersatzbaustoffen eine immer größere Bedeutung zu spielen. Daraus resultiert die Befürchtung, dass sich aufgrund des immens steigenden Bedarfs an Baustoffen eine Knappheit der Primärbaustoffe mit einer entsprechenden Preissteigerung entwickeln wird (FREMGEN & MEINKEN 2004).

Die Notwendigkeit der Stilllegung vieler Deponien im Bundesgebiet ergibt sich aus den rechtlichen Rahmenbedingungen, die sich im Laufe der letzten 3 Jahrzehnte maßgeblich in Deutschland und Ende der 1990er auch auf europäischer Ebene entwickelt haben. Mit dieser Entwicklung ging ebenfalls ein Fortschritt des technischen Standards und damit der Anforderungen an die Abdichtungssysteme von Deponien einher (Abb. 2.1).

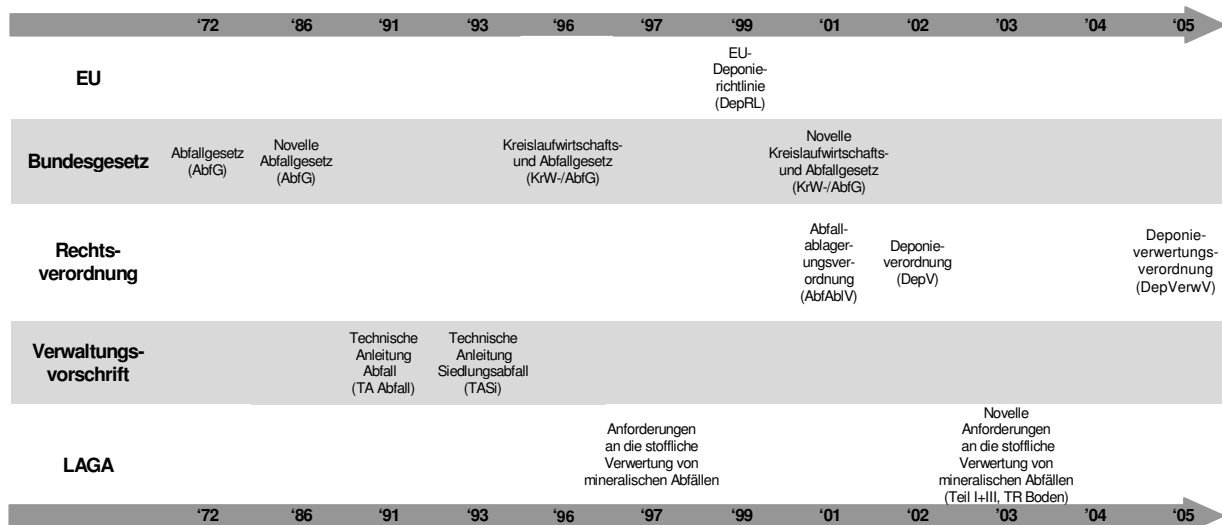


Abbildung 2.1: Zeitliche Entwicklung des Abfallrechts auf den verschiedenen Rechtsebenen

Das erste **ABFALLGESETZ** der BRD wurde 1972 erlassen, um eine geordnete und einheitliche Abfallbeseitigung zu erreichen. Mit der Novelle von 1986 wurde statt der reinen Beseitigung mehr Wert auf die Vermeidung und Entsorgung gelegt. Dieser Grundsatz wurde mit dem **KREISLAUFWIRTSCHAFTS- UND ABFALLGESETZ (KRW-/ABFG 1996)** weiterentwickelt. Höchste Priorität besaß weiterhin die Vermeidung von Abfällen, gefolgt vom Verwertungsgedanken. Die Möglichkeit der Beseitigung soll an letzter Stelle in Betracht gezogen werden (EGLOFFSTEIN & BURKHARDT 2004).

Mit der Entwicklung der Abfallgesetze galt für Deponien grundsätzlich das Vorsorgeprinzip, so dass stets nach dem Stand der Technik und immer zum Wohl der Allgemeinheit gehandelt werden muss. Dies hat für die Abfallentsorgungsanlagen bedeutende Folgen herbeigeführt.

Der § 36 KrW-/ABFG, der mit der Novellierung von 2001 maßgeblich erweitert wurde, umfasst zusammen mit § 36 c und 36 d die Rahmenbedingungen für die Stilllegung einer Deponie. Die beabsichtigte Stilllegung der Deponie muss der zuständigen Behörde unverzüglich angezeigt werden. Diese ordnet die erforderlichen Maßnahmen an und nimmt die Stilllegung nach entsprechender Durchführung der Maßnahmen formal ab (PALM ET AL. 2003, RADDE 2001).

Durch § 36 c entsteht die Ermächtigung zum Erlass einer Rechtsverordnung zur Konkretisierung der Anforderungen bezüglich Errichtung, Betrieb, Stilllegung und Nachsorge von Deponien zum Schutz des Wohls der Allgemeinheit. Diese Konkretisierung wurde 2001 mit der Abfallablagerungsverordnung und 2002 mit der Deponeiverordnung umgesetzt (PALM ET AL. 2003, RADDE 2001).

Mit § 36 d ist der Deponiebetreiber dazu verpflichtet, alle Bau-, Betriebs-, Stilllegungskosten sowie Kosten für eine mindestens 30 Jahre dauernde Nachsorge über die für die Abfallablagerung in Rechnung zu stellenden privatrechtlichen Entgelte zu decken (PALM ET AL. 2003, EGLOFFSTEIN & BURKHARDT 2004, RADDE 2001).

Da jedoch häufig bei schon bestehenden Deponien keine dem nötigen Umfang entsprechenden Rücklagen gebildet wurden, resultierte aus dem Mangel an finanziellen Mitteln auch schon vor der Novelle von 2001 die Diskussion um eventuell günstigere Alternativen zum Regeloberflächenabdichtungssystem. Die Regeloberflächenabdichtungssysteme wurden bereits Anfang der 1990er mit den Verwaltungsvorschriften TECHNISCHE ANLEITUNG ABFALL (1991) bzw. TECHNISCHE ANLEITUNG SIEDLUNGABFALL (1993) gefordert.

Die Verwendung von Sekundärrohstoffen, also die stoffliche Verwertung von Abfällen innerhalb einer Deponieoberflächenabdichtung kann eine Kostenreduzierung erzielen (MELCHIOR 2005, WOHNLICH ET AL. 1996). Der Einsatz mineralischer Abfälle entspricht dem Verwertungsgedanken des KrW-/ABFG (1996). Nach § 4 Abs. 3 Satz 1 wird die stoffliche Verwertung als „Substitution von Rohstoffen durch das Gewinnen von Stoffen aus Abfällen (sekundäre Rohstoffe) oder die Nutzung der stofflichen Eigenschaften der Abfälle [...]“ definiert. Es gilt, sich Abfälle nutzbar zu machen, die sich aufgrund ihrer bautechnischen und bauphysikalischen Beschaffenheit sehr gut für die Verwendung als Deponieersatzbaustoff entsprechend des jeweiligen Einsatzorts eignen.

Mit den Technischen Anleitungen **TA ABFALL (1991)** und **TA SIEDLUNGABFALL**

(1993), die Planung, Errichtung, Betrieb, Stilllegung und Nachsorge von Abfallentsorgungsanlagen ab deren Inkrafttreten regelten, begründete sich das „Multibarrierekonzept“ für Deponien. Dieses Konzept beruht auf mehreren voneinander unabhängigen, natürlichen, betrieblichen und technischen Sicherungssystemen, um Schadstoffemissionen zu vermeiden. Dabei handelt es sich zunächst um den Deponiestandort als geologische Barriere, um die Zuordnung ablagerungsfähiger Abfälle nach deren Beschaffenheit bzw. deren Schadstoffen in Deponieklassen. Zum Wohl der Allgemeinheit und der Sicherung der Qualität der Schutzgüter wird auf Basis des Vorsorgeprinzips der Stand der Technik in Form standardisierter Regelabdichtungen (Basis- und Oberflächenabdichtungssysteme) gefordert. Ziel war die Schaffung der nachsorgefreien Deponie (KINDSMÜLLER & DREXLER 2002). Um dies zu erreichen, darf in Ergänzung zu den technischen Vorgaben seit dem 01. Juni 2005 kein Hausmüll und hausmüllähnlicher Gewerbeabfall mehr unvorbehandelt abgelagert werden (TASi 1993).

Bei Altanlagen sind geologische Barrieren und Basisabdichtungen häufig nicht vorhanden. Altanlagen, die zum Zeitpunkt des Inkrafttretens der 2. und 3. Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz noch nicht stillgelegt waren, mussten entweder auf den Stand der TASi nachrüsten oder wurden spätestens zum 01.06.2005 stillgelegt. Auf diesen Standorten kommt einer nachhaltigen und leistungsfähigen Deponieoberflächenabdichtung eine besondere Bedeutung zu, da diese zumeist die einzig verbleibende Sicherungsmaßnahme darstellt.

Alternativen zum Regeloberflächenabdichtungssystem sind sowohl nach TA ABFALL als auch nach TASi zulässig, wenn die sogenannte Gleichwertigkeit des alternativen Systems nachgewiesen wurde.

Anders wird mit Altablagerungen umgegangen. Altablagerungen sind vor dem Inkrafttreten der TASi 1993 stillgelegt worden und unterliegen dem Altlasten- bzw. Bodenschutzrecht, welches das Prinzip der Gefahrenabwehr verfolgt. Das bedeutet im Vergleich zum Vorsorgeprinzip, dass das Schadpotenzial der Altablagerung standortspezifisch und einzelfallbezogen beurteilt und eine entsprechende Sicherung vorgenommen wird. Neben dem Nachweis für ihre Wirksamkeit werden keine weiteren Anforderungen bezüglich Aufbau und Qualität der Sicherungsmaßnahme gefordert (KINDSMÜLLER & DREXLER 2002, EGLOFFSTEIN & BURKHARDT 2004).

Neben den Anforderungen an die Entsorgung und Behandlung von Abfällen greifen TA ABFALL und TASi den Grundsatz der Verwertung auf. Die Abfallverwertung hat Vorrang vor der sonstigen Entsorgung, wenn sie technisch möglich ist, wenn dabei entstehende Mehrkosten im Vergleich zur Entsorgung zumutbar sind und wenn für die Stoffe ein Markt vorhanden ist oder geschaffen werden kann. Die Verwertung darf sich im Vergleich zu anderen Entsorgungswegen nicht nachteilig auf die Umwelt auswirken.

Die Abfälle können innerhalb des Betriebes des Abfallerzeugers, in Anlagen anderer Betreiber bzw. außerhalb von Anlagen, z. B. im Straßenbau, verwertet werden. Die Verwertung von Abfällen auf Deponien insbesondere innerhalb einer Deponieoberflächenabdichtung wird nicht erläutert und damit auch nicht ausgeschlossen.

Als ein weiterer Grundsatz gilt in der TA ABFALL das Vermischungsverbot. Abfälle dürfen grundsätzlich nicht vermischt werden, auch nicht wenn sie denselben Abfallschlüssel aufweisen. Durch eine entsprechende Behandlung können jedoch umweltgefährdende Stoffe metabolisiert oder immobilisiert werden, um diese Abfälle anschließend der Verwertung zuzuführen.

Im Juli 1999 trat die **EUROPÄISCHE DEPONIERICHTLINIE ÜBER ABFALLDEPONIE (DepRL)** in Kraft und musste innerhalb von 2 Jahren in nationales Recht der Mitgliedsstaaten umgesetzt werden. Ziel war es, mit rechtlichen Regelungen auf Gesetzes- oder mindestens Verordnungsebene zukünftig eine nachsorgefreie Deponie gewährleisten zu können.

Die Umsetzung der EU-Deponierichtlinie gelang in der BRD über mehrere Schritte:

1. über das Gesetz zur Umsetzung der UVP-Änderungsrichtlinie, der IVU-Richtlinie, Juli 2001,
2. über die ABFALLABLAGERUNGSVERORDNUNG (ABFABLV), März 2001,
3. über die Änderung des KREISLAUFWIRTSCHAFTS- UND ABFALLGESETZES (KRW-/ABFG), Oktober 2001,
4. über die DEPONIEVERORDNUNG (DEPV), August 2002 und
5. über die DEPONIEVERWERTUNGSVERORDNUNG (DEPVERWV), September 2005.

Mit der TA ABFALL und der TA SIEDLUNGSABFALL wies Deutschland bereits vor der europäischen Richtlinie einen hohen Standard auf. Sie waren für die Umsetzung alleinig jedoch nicht ausreichend. Ihre Rechtsverbindlichkeit erlangten sie über ihre Einbindung in die Rechtsverordnungen zur Übertragung der Richtlinie in nationales Recht (EGLOFFSTEIN & BURKHARDT 2004).

Die EU-DEPONIERICHTLINIE erfasst alle Abfallbeseitigungsanlagen zur Ablagerung von Abfällen oberhalb und unterhalb der Erdoberfläche sowie langfristige Zwischenlager. Artikel 13 DEPRL enthält Regelungen für Stilllegungs- und Nachsorgemaßnahmen und Artikel 14 Regelungen für vorhandene Deponien (Altanlagen) (PALM ET AL. 2003).

Im Anhang I der DEPRL werden die „Allgemeinen Anforderungen für alle Deponiekategorien“ formuliert, d. h. Standortvoraussetzungen, Ansprüche bezüglich des Abfallkörpers, der Emissionsminderung sowie der Abdichtungssysteme. Nummer 3.3 des Anhangs I gibt Empfehlungen für die Gestaltung der Oberflächenabdichtung. Die Formulierungen der DEPONIERICHTLINIE lassen auch weiterhin die Möglichkeiten

der Gleichwertigkeitsregelung nach TA ABFALL und TASI zu (FEHLAU & NIENHAUS 2001).

Im Rahmen der Umsetzung der Europäischen DEPONIERICHTLINIE wurde in einem ersten Schritt die **ABFALLABLAGERUNGSVERORDNUNG (ABFABLV 2001)** erlassen, um die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen zu regeln. Sie definiert sowohl Anforderungen an den Standort, Bau und Betrieb von Deponien als auch Anforderungen an die Qualität der abzulagernden Abfälle. Ziel der Abfallablagereungsverordnung ist die schrittweise Schließung von Deponien, welche die Anforderungen der ABFABLV und damit den Stand der Technik nicht erfüllen.

Mit § 3 Abs. 1 werden die Anforderungen der TASI für die Deponieklassen I und II unverändert übernommen. Die Verwaltungsvorschrift wird damit auf das Niveau einer Rechtsverordnung gehoben (PALM ET AL. 2003, EGLOFFSTEIN & BURKHARDT 2004, RADDE 2001, WAGNER 2002). Eine wesentliche Ergänzung zur TASI formuliert die ABFABLV mit der Zulassung und Definition spezieller Anforderungen an die Ablagerung von Abfällen aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung auf TASI-Deponien der Deponiekategorie II.

Die Ablagerung unbehandelter Abfälle, welche die Zuordnungskriterien der Deponiekategorie II nicht einhalten, durfte bis zum 31. Mai 2005 erfolgen, seitdem ist sie grundsätzlich verboten. Eine weitere Übergangsregelung gilt jedoch bis Juli 2009. Nach dieser Übergangsregelung dürfen Inertabfälle auf nicht Basis gedichteten Deponien bzw. mechanisch-biologisch aufbereitete Abfälle nur noch auf Basis gedichteten Deponien abgelagert werden. Deponien mit hohem technischen Standard, die aber die Anforderungen bezüglich Standort bzw. geologischer Barriere nicht voll erfüllen, haben dennoch die Möglichkeit, durch geeignete technische Maßnahmen die natürlichen Standortnachteile zu kompensieren, so dass die Anlagen auch über den 15. Juli 2009 hinaus weiter betrieben werden können (PALM ET AL. 2003).

Mit dem Bezug von § 3 Abs. 1 ABFABLV auf die TASI und die in Nummer 10 beschriebenen Anforderungen ist neben der Errichtung, den Abfallzuordnungskriterien und dem Betrieb zwar auch die Stilllegung und die Nachsorge mit angesprochen und mit der ABFABLV übernommen worden, allerdings ohne nähere Regelungen für Altdeponien. Für die Abdichtungssysteme gilt im Zusammenhang der Diskussion über Alternativen somit weiterhin, dass gleichwertige Systeme durch die zuständige Behörde genehmigt werden können (RADDE 2001). Hinsichtlich der Oberflächenabdichtung von Altdeponien bzw. den Anforderungen für Deponien, die nicht den Klassen I oder II angehören, muss darauf hingewiesen werden, dass die EU-DEPONIERICHTLINIE nicht alleinig durch die ABFALLABLAGERUNGSVERORDNUNG die vollständige Umsetzung erlangte.

Erst mit der Verabschiedung und dem Inkrafttreten der **DEPONIEVERORDNUNG** im Au-

gust 2002 wurde die vollständige Umsetzung der DEPONIERICHTLINIE erreicht (PALM ET AL. 2003, RADDE 2001). Die DEPONIEVERORDNUNG ergänzt die ABFALL-ABLAGERUNGSVERORDNUNG mit Regelungen über die Errichtung und den Betrieb von Deponien sowie über die umweltverträgliche Behandlung und Ablagerung von Abfällen auf Deponien. Sie regelt somit die verbleibenden Anforderungen für die Deponien für besonders überwachungsbedürftige Abfälle, für Monodeponien und Untertagedeponien sowie Langzeitlager, indem wiederum die Anforderungen der TASI und auch der TA ABFALL herangezogen und als Standards festgelegt werden.

Über die TA ABFALL und die TA SIEDLUNGSABFALL werden in der DEPONIEVERORDNUNG ebenfalls die verfahrensrechtlichen und materiellen Vorgaben für die Stilllegung und Nachsorge einer Deponie festgelegt. Dies betrifft insbesondere neue Deponien, die nicht den Deponieklassen I und II angehören, da diese unter die Regelungen der ABFALLABLAGERUNGSVERORDNUNG fallen. Mit dem § 12, der sich mit der Stilllegung befasst, werden jedoch durch den Abs. 3 Satz 3 die Anforderungen für die Errichtung eines Oberflächenabdichtungssystems des Anhangs 1 Nr. 2 auf Deponien der Klassen I und II erweitert. Die Vorgaben für die Ausführung der Rekultivierungsschicht nach Anhang 5 der DEPv werden über § 12 Abs. 3 Satz 4 für alle Deponien der Klassen 0, I, II und III gültig.

Auch Vorgaben für einen Weiterbetrieb sowie die Stilllegung und Nachsorge von Altdeponien werden mit der DEPONIEVERORDNUNG geregelt. Für einen möglichen Weiterbetrieb einer Altdeponie ist nachzuweisen, dass die Anforderungen der DEPv bzw. der ABFABLV erfüllt sind oder dass entsprechende Maßnahmen für die Anpassung an den Stand der Technik eingeleitet sind. Andernfalls ist die Deponie spätestens bis zum 15. Juli 2009 stillzulegen.

Für das Oberflächenabdichtungssystem von Altdeponien gelten zunächst grundsätzlich die gleichen Anforderungen wie bei neuen Deponien. Bei Deponien, die sich zum Zeitpunkt des Inkrafttretens der DEPv bereits in der Stilllegungsphase befanden oder bis zum 15. Juli 2005 vorzeitig stillgelegt wurden, konnte eine Ausnahmeregelung gemäß § 14 Abs. 6 von den Behörden zugelassen werden. Bei der Anwendung dieser Ausnahmeregelung muss nachgewiesen werden, dass mit dem Einsatz einer alternativen Deponieoberflächenabdichtung das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird und der Schutz der Umwelt, insbesondere des Grundwassers, nachhaltig gewährleistet ist (LAGA 2001).

Unabhängig vom § 14 Abs. 6, der lediglich bei Alt- oder vorzeitig stillgelegten Deponien Anwendung findet, können nach Anhang 1 der DEPONIEVERORDNUNG auch auf anderen Deponien Alternativen zur Regelabdichtung aus gleichwertigen Systemkomponenten oder aus einer gleichwertigen Kombination von Systemkomponenten genehmigt werden.

Grundsätzlich gilt, dass von der Deponie keine Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit oder eine Beeinträchtigung der Schutzgüter nach dem KrW-/ABFG ausgehen darf (DEPV 2002). Aber weder die DEPONIEVERORDNUNG noch die ABFALLABLAGERUNGSVERORDNUNG treffen Aussagen bzw. Regelungen bezüglich der Verwertung von Abfällen in Deponieoberflächenabdichtungen oder bezüglich genauer Anforderungen für die chemische Beschaffenheit möglicher Abdichtungsmaterialien. Die ABFABLV nimmt im § 1 Abs. 4 jedoch direkten Bezug auf die Grundsätze und Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft nach den §§ 4 und 5 KrW-/AbfG, womit die Verwertung von Abfällen weiterhin einen höheren Stellenwert besitzt als die Beseitigung.

Obwohl 1996 nach dem KREISLAUFWIRTSCHAFTS- UND ABFALLGESETZ der Vorrang der Verwertung gegenüber der Entsorgung eindeutig dargelegt wurde, besteht aufgrund der unbestimmten Rechtsbegriffe ein Konkretisierungsbedarf der Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen. Dabei steht dem Interesse, möglichst viele Abfälle der Verwertung zuzuführen, die Wahrung des Wohls der Allgemeinheit bzw. der Schutz vor Beeinträchtigungen der Schutzgüter, wie sie im § 10 Abs. 4 dargelegt sind, gegenüber. Mit der Frage, wann von einer schadlosen Verwertung ausgegangen werden kann, entwickelte sich der Bedarf an einer einheitlichen, abfallspezifischen und auch Rechtsbereiche übergreifenden Regelung.

Schon 1991 beauftragte die Umweltministerkonferenz die LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA) umweltgerechte Anforderungen für die Verwertung von mineralischen Abfällen auszuarbeiten. Die erstellten Verwertungsanforderungen basieren sowohl auf der jeweiligen Nachfolgenutzung bzw. auf den unterschiedlichen Einbaubedingungen als auch auf den verschiedenen Abfallspezifika. Die LAGA entwickelte bis 1994 abfallspezifische Zuordnungswerte, die mit der Novelle der Mitteilung 20 (LAGA M 20) 1997 erweitert wurden. Damit regelt die **LAGA M20** die Verwertung von Bodenmaterial, Bauschutt, Straßenaufbruch, Schlacken und Aschen aus Müllverbrennungsanlagen bzw. Steinkohlekraftwerken sowie Gießereiabfällen. Darauf folgend wurden weitere Veränderungen angestrengt, da eine Anpassung an das Bodenschutzrecht, an die Novellierung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes und an den Grundwasserschutz notwendig wurde (BERTRAM 2003, LAGA 2001).

Das Regelwerk ist aus drei Teilen aufgebaut. Der erste und allgemeine Teil beschreibt den Geltungsbereich der Regelungen bzw. die allgemeinen und abfallunspezifischen Anforderungen an die Verwertung, die Untersuchung und die Bewertung der mineralischen Abfälle.

In Abhängigkeit von den festgestellten Schadstoffgehalten sowohl im Feststoff als auch im Eluat der unterschiedlichen Materialien werden die Abfälle in Form von Zuordnungswerten in Einbauklassen eingeordnet (Abb. 2.2). Die zulässigen Eluatkonzentrationen und Feststoffgehalte der jeweiligen Zuordnungswerte in Abhängigkeit

der Einbaubedingungen bzw. des Einbauortes beziehen sich auf Vorsorgeanforderungen des Grundwasserschutzes, des Bodenschutzes und der Abfallwirtschaft.

Für Deponien heißt dies im Speziellen, dass oberhalb einer definierten technischen Sicherungsmaßnahme in Bereichen, die noch von Wasser durchsickert werden, Materialien bis Zuordnungswert Z1 eingebaut werden können. Dies entspricht der Einbauklasse 1 als eingeschränkt offener Einbau und betrifft z. B. Entwässerungsschichten oder auch Kapillarsperren. Unterhalb von wasserundurchlässigen bzw. nur geringfügig durchlässigen Schichten, wie etwa Kunststoffdichtungsbahnen oder mineralischen Dichtungen, dürfen Abfälle bis Zuordnungswert Z2 eingesetzt werden (Einbauklasse 2). Stärker belastete Abfälle müssen gemäß der ABFABLV und der DEPv in Deponien ihrer Zuordnungswerte entsprechenden Klassen abgelagert werden.

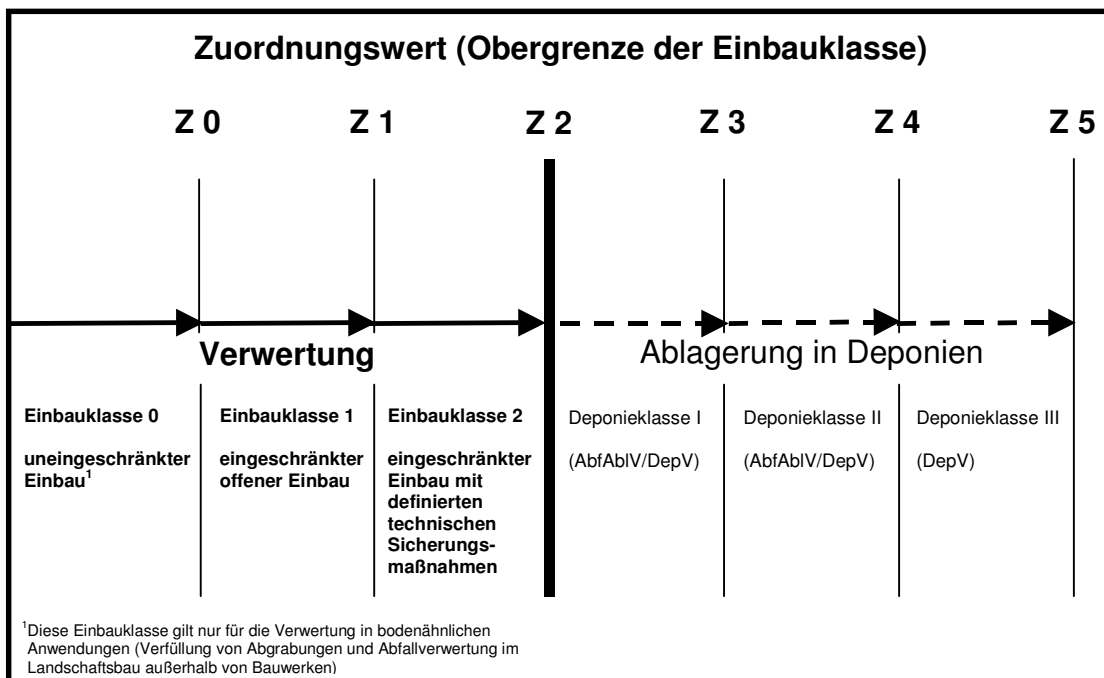


Abbildung 2.2: Darstellung der Einbauklassen nach LAGA M20 (2003)

In Teil II werden die abfallspezifischen Anforderungen erläutert. Diese Technischen Regeln legen einheitliche Untersuchungsmethoden und Bewertungen der zu untersuchenden Parameter für die Güteanforderungen der einzelnen Materialien fest. In diesem Zusammenhang werden Verwendungsmöglichkeiten und Einbaubedingungen mit berücksichtigt.

Im Gegensatz zu den Technischen Regeln für die Verwertung von Bodenmaterial (TR Boden), die aufgrund der Angleichung bezüglich des Bodenrechts im November 2004 in einer überarbeiteten Form veröffentlicht wurden, gelten für den Einbau der mineralischen Abfälle, wie z. B. Recyclingbaustoffe, weiterhin die Anforderungen

von 1997. Die Technischen Regeln für Recyclingbaustoffe definieren u. a. explizit Anforderungen für Kapillarsperrenmaterialien. Somit darf nach der LAGA M20 Kapillarsperrenmaterial bis Z1.2 und Kapillarschichtmaterial bis Z1.1 verwendet werden (BERTRAM 2003, MATTHES 2005).

Im Teil III der LAGA M20 werden Probenahme, Probenaufbereitung und Analytik für die jeweiligen Abfälle konkretisiert.

Für den Einsatz von Abfällen auf Deponien als sekundärer Baustoff müssen die Materialien gleichermaßen die bauphysikalischen Anforderungen erfüllen wie die Primärbaustoffe (LAGA 2002). Mit der LAGA Mitteilung 20 wurden genaue Anforderungen an die Abfälle gestellt und ergänzend wurde 2001 ein Papier zum „Einsatz von Abfällen als Deponiebaustoffe“ erarbeitet, das durch Erlass in 7 Bundesländern Verbindlichkeit erlangte (<http://www.deponie-stief.de>). Diese verhaltene Zustimmung der Bundesländer macht den Interessenkonflikt deutlich, der sich aus den Bestrebungen der Festlegung von Zuordnungswerten und Einbauklassen bzw. der Bewertung der Schadlosigkeit der Abfallverwertung von mineralischen Abfällen und der Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf entwickelt hat.

Rechtsklarheit, in welchem Ausmaß und unter welchen Voraussetzungen bzw. Anforderungen Abfälle zur Verwertung bei der Deponiestilllegung eingesetzt werden dürfen, gibt die **DEPONIEVERWERTUNGSVERORDNUNG** (DEPVERWV 2005).

Obwohl Deponien Anlagen zur Beseitigung von Abfällen darstellen, ist eine Verwertung von Abfällen auf Deponien grundsätzlich möglich. Dies begründet sich durch das KREISLAUFWIRTSCHAFTS- UND ABFALLGESETZ und wurde auch durch ein Rechtsurteil des Europäischen Gerichtshofes bestätigt (in SIEDERER ET AL. 2003). Bei notwendigen Baumaßnahmen auf Deponien können demnach Abfälle zur Verwertung Primärbaustoffe ersetzen, so lange es im deponiebauüblichen Umfang geschieht und das Wohl der Allgemeinheit gewahrt bleibt (WAGNER 2004).

Mit dem Arbeitspapier der LAGA zum „Einsatz von Abfällen im Deponiebau“ (LAGA 2002) war zwar eine Vollzugshilfe geschaffen worden, aus der fehlenden Rechtsverbindlichkeit ergaben sich jedoch einige Kritikpunkte. So hat die DEPONIEVERWERTUNGSVERORDNUNG das Ziel, als rechtsverbindliche einheitliche Regelung zu verhindern, dass sich aus den unterschiedlich restriktiven Anwendungen des Verwertungsgrundsatzes der sogenannte „Mülltourismus“ weiterentwickelt (BMU 2004).

Vorrangig soll ferner mit der DEPVERWV die Scheinverwertung, z. B. bei Profilierungsmaßnahmen im Rahmen der Deponiestilllegung, unterbunden werden. Es dürfen nur solche Mengen an Abfällen zur Verwertung eingesetzt werden, die auch beim Einsatz von Primärbaustoffen notwendig wären (BMU 2004).

Aus den Einsatzbereichen resultieren die physikalischen und bodenmechanischen Eigenschaften der Deponiebaustoffe. Für die konkreten bautechnischen Anforderungen nach dem Stand der Technik sind die zuständigen Rechtsverordnungen bzw. ist die TASI (1993) heranzuziehen.

Die chemischen Zuordnungswerte richten sich ebenfalls nach den unterschiedlichen Verwertungsbereichen (DEPVERWV 2005). Somit wehrt die DEPONIEVERWERTUNGSVERORDNUNG durch die im Anhang aufgeführten Zuordnungskriterien ein Unterlaufen der Behandlungsvorgaben der ABFABLV ab und garantiert die Schadlosigkeit der Verwertung (BMU 2004).

Für den Einsatz mineralischer Abfälle in Deponieoberflächenabdichtungen bedeutet der Beschluss der DEPVERWV starke Einschränkungen. Bei Baumaßnahmen in diesem Bereich, in dem bisher Verwertungen von Abfällen bis Z 2 nach LAGA zugelassen waren, sind nun die Zuordnungswerte Z 0 und Z1.1 maßgeblich. Damit fallen grundsätzlich große Mengen an bautechnisch geeigneten Sekundärrohstoffen für die Verwertung auf Deponien weg. Dies betrifft gleichermaßen den Einsatz von Bauschuttrecyclingmaterialien in Kapillarsperren als alternative Deponieoberflächenabdichtung. Wird jedoch mit einer Risikobewertung der Nachweis erbracht, dass trotz Überschreitung einzelner Zuordnungswerte keine Umweltbeeinträchtigungen einhergehen, kann die zuständige Behörde nach der DEPVERWV (Fußnote 2 in Anhang 1, Tabelle 1) im Einzelfall den Einsatz auch dieser Deponieersatzbaustoffe zulassen. Mit der Fußnote 2 der Tabelle 1 der DEPVERWV sollen Randbedingungen bestimmter Einzelfälle berücksichtigt werden, die sich bei dem Einsatz alternativer und gleichwertiger Abdichtungskomponenten nach §14 Abs. 6 der DEP (2002) ergeben. Diesbezüglich wird in der Begründung zur DEPVERWV des Deutschen Bundestages insbesondere die Kapillarsperre unter Verwendung von gebrochenem Beton als ein solcher Einzelfall hervorgehoben (Deutscher Bundestag 2005).

2.2 Einsatzpotenzial mineralischer Abfälle

Vor dem Hintergrund, dass die DEPONIEVERORDNUNG (2002) die Schließung bzw. Stilllegung vieler Deponien 2005 und 2009 bewirkt, droht eine Materialknappheit der natürlichen Baustoffe (FREMGEN & MEINKEN 2004). Der Einsatz mineralischer Abfälle in diesem Zusammenhang entspricht nicht nur dem Verwertungsgedanken der Kreislaufwirtschaft, sondern trägt ebenfalls zur Ressourcenschonung bei.

Für die Rekultivierung von Deponien können industrielle Reststoffe und auch Abfälle aus der Baubranche in Betracht kommen (MELCHIOR 2001). In Tabelle 2.1 sind die Aufkommen und die Verwertungsquoten der einsetzbaren industriellen Nebenprodukte dargestellt.

Tabelle 2.1: Aufkommen und Verwertung von industriellen Nebenprodukten (KRASS ET AL. 2004a+b¹, MERKEL 2004²)

Industrielle Reststoffe	Anfall in Mio. Mg*a ⁻¹	Verwertung	
		in Mio. Mg*a ⁻¹	in %
Gießereireststoffe: Altsande und Kupol- /Elektroofenschlacke¹	0,12	0,1	83,1
Eisenhüttenschlacken: Hochofenschlacke² Stahlwerksschlacke²	7,3 5,95	6,95 5,52	95,2 92,8
Nebengestein der Steinkohle (Berge/Waschberge)¹	28,5	7,2	25
Kraftwerksrückstände: Schmelzkammergranulat¹ Flugaschen¹ Grobaschen¹ Wirbelschichtaschen¹ Gips + SAV-Produkte¹	2,2 11,6 2,4 0,6 7,2	2,6 11,5 2,4 0,6 7,2	100 99 99 100 100
Hausmüll- Verbrennungsgasche¹	2,2	1,9	84

Bei den in Gießereien anfallenden Reststoffen handelt es sich um Altsande und Schlacken. 2001 fielen 94.312 Mg **Gießereirestsand** und 7.380 Mg **Kupolofenstückschlacke** an. Bei den Sanden lag die Verwertungsquote bei 86 %, dabei ist zu beachten, dass bei der Formherstellung häufig Bindemittel zugesetzt werden, die Phenole und PAKs enthalten und dies zu einer negativen Umweltverträglichkeit führen kann (HIERSCHE & WÖRNER 1990). Der Hauptverwertungsweg lag im Unterbau und beim Bau von Lärmschutzwällen. Der Anteil der Verwendung auf Deponien betrug 2001 etwa bei 10 %. Die Schlacke wird zu 100 % verwertet, dabei nimmt der Einsatz in Tragschichten ohne Bindemittel 1/3 des Aufkommens ein (FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN 1990, KÄMPF ET AL. 1999, KRASS ET AL. 2004b.).

Eisenhüttenschlacken fallen als **Hochofenschlacken** und als **Stahlwerksschlacken** an. Sie weisen unterschiedliche Eigenschaften auf, woraus verschiedene Verwertungswege resultieren. Von den 7,3 Mg Hochofenschlacken nahm der Hütten sand ca. 70 % ein. Dieser glasige, schnell abgekühlte Hütten sand wird hauptsächlich (2003: 4,76 Mg) in der Zementindustrie als Zuschlagsstoff eingesetzt (HIERSCHE & WÖRNER 1990, MERKEL 2004). Die kristallin erstarrte Hochofenstückschlacke wird vornehmlich als Mineralgemisch im Straßenbau eingesetzt.

Der Straßen-, Erd- und Wasserbau ist das größte Einsatzgebiet für die Stahlwerksschlacke (2003: 3,36 Mg). Über 6 % der entstandenen Stahlwerksschlacke werden

in der Landwirtschaft als Dünger verwertet (MERKEL 2004). Durch konsequente Qualitätssicherungsmaßnahmen entwickelte sich die Stahlwerksschlacke in den letzten Jahrzehnten zu einem anerkannten Baustoff. Insbesondere die LD-Schlacke (Linz-Donawitz-Verfahren) zeichnet sich durch ihre Festigkeit und Gleichwertigkeit im Vergleich mit Naturstein aus (HIERSCHE & WÖRNER 1990, SCHOLZ UND HIESE 2003).

Die Verwertungsquote der Eisenhüttenschlacken ist maßgeblich durch die Baukonjunktur beeinflusst (MERKEL 2004). Durch den Einsatz von Schlacken bei der Rekultivierung von Deponien kann ein weiterer Verwertungsweg zu einem noch besseren Verwertungsniveau führen.

Beim Abbau der Steinkohle fallen große Mengen an **Nebengestein** an, die sogenannten **Berge oder Waschberge**. Die jährlichen Mengen werden mit etwa 50 Mio. Mg angegeben (KRASS ET AL. 2004b). Sie nehmen somit einen der größten Anteile der Reststofffraktionen ein. Die Verwertungsquote liegt jedoch lediglich bei 20 % (KRASS ET AL. 2004b). Das Nebengestein wird in einer Brecheranlage zu bestimmten Körnungen aufbereitet, um es anschließend als Zuschlag für Beton, Betonerzeugnisse oder als Straßenbaustoff zu verwenden (HIERSCHE & WÖRNER 1990).

Bei der Verbrennung von Steinkohle fallen des Weiteren **Schmelzkammergranulate** und **Kesselaschen bzw. -sande** an. Durch die Abkühlung der schmelzflüssigen Verbrennungsrückstände im Wasserbad entsteht das glasige und amorphe Granulat, das zu nahezu 100 % der Verwertung im Straßenbau, z. B. als Frostschuttschicht oder in Verbindung mit Bitumen, zugeführt wird. Durch die Verglasung und die amorphen Eigenschaften wird eine gute Umweltverträglichkeit nachgewiesen. Die Kesselsande müssen überwiegend deponiert werden (HIERSCHE & WÖRNER 1990).

Auch die **Flugaschen**, die als staubförmige Feststoffe beim Verstromungsprozess der Braun- und Steinkohle entstehen und von den Verbrennungsabgasen abgetrennt werden, finden im Straßenbau Verwendung (FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRABEN- UND VERKEHRSWESSEN 1986). Einer der wichtigsten Verwertungswege der Rückstände aus der Braunkohlefeuerung ist die Verwendung im Tagebau (KRASS ET AL. 2004b).

Im Zuge der TASI (1993) und der Vorgabe, ab dem Jahr 2005 keine Abfälle mehr mit einem Glühverlust > 5 % deponieren zu dürfen, nimmt die Vorbehandlung und damit die Verbrennung von Abfällen eine große Bedeutung ein. Mit der thermischen Verwertung stiegen gleichermaßen die Bemühungen der möglichen Verwertung der Reststoffe aus der Müllverbrennung. Je nach Zusammensetzung des Siedlungsabfallaufkommens und der Technik der MVA bestehen große Qualitätsschwankungen bei der Schlacke (BAUER 2001, KÄMPF ET AL. 1999). Die **Schlacke aus Müllverbrennungsanlagen** wird als Schüttmaterial für Dämme und Lärmschutzwälle, als Trag-

schichten für Straßen und als Befestigung ländlicher Wege sowie Parkflächen genutzt. Das wichtigste Verwertungsgebiet mit einem Einsatz von knapp 30 % der bei der Müllverbrennung entstehenden Reststoffe nimmt die Verfüllung im Hochbau ein. 2001 lag die Verwertungsquote der Müllverbrennungaschen in Deutschland bei 84 % (KRASS ET AL. 2004b, MESTERS 2004).

Den größten Anteil an den jährlich anfallenden mineralischen Abfällen nimmt die **Baubranche** ein. Für das Jahr 2000 wurden vom KREISLAUFWIRTSCHAFTSTRÄGER BAU (KWTB) insgesamt 252,2 Mio Mg Bau- und Abbruchabfälle erfasst (Tab. 2.2). Mit **Bauschutt** (54,5 Mio. Mg), **Straßenaufbruch** (22,3 Mio. Mg), **Baustellenabfällen** (11,8 Mio. Mg) und **Bodenaushub** (163,6 Mio. Mg) stellt sie somit auch das größte Potenzial für eine mögliche Verwertung im Deponiebau, obgleich bereits hohe Verwertungsquoten für diese Fraktionen erzielt werden (KWTB 2003).

Die Einsatzmöglichkeiten sind im wesentlichen von der stofflichen Zusammensetzung der Bauabfälle abhängig, die im besonderen von der Verfahrensweise des Abbruchs, der Getrennthaltung beim Rückbau bzw. von der Aufbereitungstechnologie beeinflusst wird (Müller 2004). Schon beim Einsatz von Primärbaustoffen sollten diese Materialien Anforderungen erfüllen, die eine Wiederverwertung möglich machen (MÜLLER 2004, HIRSCH & WÖRNER 1990).

Tabelle 2.2: Aufkommen und Verwertung von Bauabfällen (KRASS ET AL. 2004¹, KWTB 2003²)

Bauabfälle	Anfall in Mio. Mg 2001	Recycling		Verwertung		Deponierung	
		in Mio. Mg*a ⁻¹	in %	in Mio. Mg*a ⁻¹	in %	in Mio. Mg*a ⁻¹	in %
Ausbauasphalt ¹	15	15	100				
Straßenaufbruch ²	22,3	19,1	85,7	2,7	12,1	0,5	2,2
Bauschutt ²	54,5	40,6	74,5	9,7	17,8	4,2	7,7
Baustellenabfälle ²	11,8	1,7	14,4	4,9	41,5	5,2	44,1
Bodenaushub ²	163,6	11,2	6,9	129,8	79,3	22,6	13,8

Grundsätzlich ist zwischen Recycling, also der Nutzung der rezyklierten bzw. aufbereiteten Materialien als Baustoffe und anderweitiger Verwertungswege zu unterscheiden. Nach den statistischen Erhebungen des KWTBS wurden 2000 nur 6,9 % des angefallenen **Bodenaushubs** recycelt aber 79,3 % z. B. im Bergbau (50,7 %), durch die öffentliche Hand (26,6 %) und auch im Deponiebau (2 %) verwertet. 22,6 Mio. Mg wurden deponiert.

Die **Baumischabfälle**, die bei Neubau-, Umbau- und Sanierungsmaßnahmen sowie Rückbaumaßnahmen entstehen, umfassen mineralische und nichtmineralische Anteile. Die mineralischen Anteile, die nach KRASS ET AL. (2004a) etwa 43 % der im Jahr 2001 angefallenen Baustellenabfälle eingenommen haben, wurden vorrangig

im Dammbau als Verfüllmaterial und im Deponiebau verwertet. Die nichtmineralischen Anteile (57 %) wurden zu einem geringen Prozentsatz recycelt bzw. thermisch verwertet. Der größte Teil wird deponiert. Der KWTB gibt für das Jahr 2000 eine Deponierung der gesamten Baustellenabfälle von 44,1 % an.

Die 15 Mio. Mg **Ausbauasphalt** wurden nach Angaben des Deutschen Asphaltverbandes zu 100 % recycelt (KRASS ET AL. 2004). Der wichtigste Verwertungsbereich ist der Straßenbau, in dem das Material entweder ungebunden eingesetzt wurde, der größte Anteil aber heißgemischt in neuen Asphaltschichten Verwendung gefunden hat.

Von den im Jahr 2000 angefallenen 22,3 Mio. Mg **Straßenaufbruch** konnten 85,7 % recycelt werden. Das Haupteinsatzgebiet des aufbereiteten Straßenaufbruchs liegt im Bereich von Frostschutzschichten und Schottertragschichten (KRASS ET AL. 2004a, HIERSCHKE & WÖRNER 1990). Die reine Verwertung des Materials von 2,7 Mio. Mg teilt sich mit 1,9 Mio. Mg auf die öffentliche Hand und mit jeweils 0,4 Mio. Mg auf die Verwertung im Bergbau bzw. im Deponiebau auf (KWTB 2003).

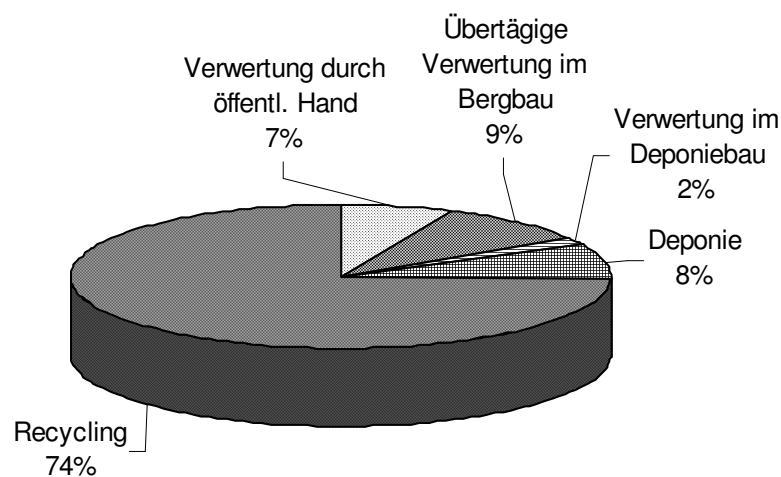


Abbildung 2.3: Verwertung und Beseitigung von Bauschutt im Jahr 2000 (KWTB 2003)

Die Abbildung 2.3 zeigt, dass auch die Recyclingrate des anfallenden **Bauschutts** von 54,5 Mio. Mg im Jahr 2000 mit 74 % bereits als hoch bezeichnet werden kann. Weitere Verwertungswege sind, wie auch schon bei der Fraktion des Straßenaufbruchs beschrieben, die öffentliche Hand, der Bergbau und die Verwendung im Deponiebau. Die recycelten Bauschuttmaterialien werden gleichermaßen wie der Straßenaufbruch zum größten Teil im Straßenbau eingesetzt. Sie finden jedoch in zunehmendem Maß Verwendung als Zuschlagsstoff für Beton (KWTB 2003).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Jahr 2000 von den angefallenen 267,2 Mio. Mg Baureststoffen 87,8 % recycelt und verwertet wurden. Die Haupteinsatzgebiete sind der Erdbau, der die geringsten technischen Anforderungen an

das Material stellt, und der Straßenbau. Weitere Einsatzgebiete sind die Nutzung der Gesteinskörnungen als Zuschlag für Beton und Mörtel, die Verwendung im Garten- und Landschaftsbau als auch im Deponiebau. Bei dem Gebrauch der Recycling-Baustoffe in den letztgenannten Bereichen müssen wie im Straßenbau hohe technische Materialanforderungen erfüllt werden (KWTB 2003, KRASS ET AL. 2004a).

Die Verwertung und der Einsatz von Recycling-Baustoffen zielt sehr stark auf die Verwendung im Straßenbau bzw. im Bereich des Hoch- und Tiefbaus ab. Der Deponiebau stellt derzeit einen solchen Nischenmarkt dar, der jedoch aufgrund der zahlreich anstehenden Stilllegungen von Deponien in den kommenden Jahren ein großes Potenzial für den Einsatz von mineralischen Abfällen birgt.

3 Die Kapillarsperre – Stand der Forschung

Die Kapillarsperre ist ein physikalisches Phänomen, das auf dem Zusammenspiel von kapillarpotenzialabhängigem Wassergehalt und kapillarpotenzialabhängiger hydraulischer Leitfähigkeit beruht. Schon in den 1930er Jahren konnte in der Landeskultur im Rahmen von Bewässerungsmaßnahmen beobachtet werden, dass sich im feinkörnigen Boden Wasser oberhalb einer Kieslinse aufstaut (SCHOFIELD 1935 in VON DER HUDE 1999). Die Kapillarsperre hat sich im letzten Jahrzehnt zu einer anerkannten alternativen Deponieoberflächenabdichtung entwickelt (PALM ET AL. 2003, LAGA 2000).

3.1 Physikalische Grundlagen

3.1.1 Das Porensystem

Das Porensystem eines Materials, das auch für die Kapillarsperre in einer Deponieoberflächenabdichtung die Grundlage darstellt, wird durch die Körnung, die Kornform und die Lagerungsdichte bestimmt (HARTGE 1998). Das Porensystem ist aufgrund der unregelmäßigen Gestalt der Körner bzw. deren räumlicher Anordnung äußerst vielfältig in Größe, Form und Kontinuität, was entscheidend für die Funktion der Poren im Wasser- und Lufthaushalt ist. Das Porenvolumen steht in direktem Zusammenhang mit der Lagerungsdichte (BLUME 1992, MÜCKENHAUSEN 1982, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992).

3.1.2 Kapillarität

Der Boden – oder allgemein ein poröser Körper - ist ein Drei-Phasen-System, bestehend aus der Matrix als fester Phase, der flüssigen Phase Wasser und der Gasphase Luft. Dies entspricht den ungesättigten Verhältnissen in einer Kapillarsperre. Die Bindung des Wassers in Poren erfolgt nach den Gesetzmäßigkeiten der Adsorption und der Kapillarität. Die Wasserbindungsintensität ist primär eine Funktion der Porengröße (BLUME 1992, HARTGE & HORN 1999, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992).

Das Wasser steigt in der Kapillare soweit auf, bis die Kapillarspannung mit dem atmosphärischen Druck im Gleichgewicht steht (KUNTZE ET AL. 1994). Aus diesem Gleichgewicht wird das Kapillaritätsgesetz abgeleitet, mit welchem die Höhe des kapillaren Aufstiegs in einer Pore definierten Durchmessers abgeschätzt werden kann. Dadurch, dass die kleineren Poren gegenüber ihrem Volumen eine relativ große Oberfläche besitzen, entwickeln sie die höheren Unterdrücke oder Kapillarspannungen, während größere Poren frühzeitiger wieder entwässern. In Kapillarsperren wird sich diese Eigenschaft zu nutze gemacht (HARTGE 1998).

3.1.3 Potenzialkonzept

Das **Gesamtpotenzial (Ψ)** wird aus der Summe von Teilpotenzialen gebildet. Mit dem Gesamtpotenzial werden alle Kräfte erfasst, die auf die Wassermoleküle im Boden einwirken und somit entscheidend für das Verhalten des Wassers im Boden sind. Nach den Gesetzen der Thermodynamik wird stets auf ein Gleichgewichtszustand möglichst geringen energetischen Niveaus zugesteuert, so dass eine Bewegung immer vom höheren zum niedrigeren Potenzial erfolgt (HARTGE & HORN 1999, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992).

Das Gesamtpotenzial Ψ setzt sich zusammen aus:

Gesamtpotenzial:
$$\Psi = \Psi_z + \Psi_m + \Psi_o + \Psi_\Omega + \Psi_g \quad (\text{Formel 3.1})$$

Ψ_z = Gravitationspotenzial	[hPa]	Ψ_Ω = Auflast-Potenzial	[hPa]
Ψ_m = Matrixpotenzial	[hPa]	Ψ_g = Gaspotenzial	[hPa]
Ψ_o = osmotisches Potenzial	[hPa]		

Osmotisches Potenzial (Ψ_o), Auflastpotenzial (Ψ_Ω) und Gaspotenzial (Ψ_g) haben im Zusammenhang hydraulischer Betrachtungen nur eine untergeordnete Bedeutung (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992, STEINERT 1999). Bei der Untersuchung von Wasserbewegungen kommt vorrangig die Addition von **Gravitationspotenzial (Ψ_z)** und **Matrixpotenzial (Ψ_m)** zum **hydraulischen Potenzial (Ψ_H)** zum Einsatz (HARTGE & HORN 1999).

Hydraulisches Potenzial:
$$\Psi_H = \Psi_z + \Psi_m \quad (\text{Formel 3.2})$$

Ψ_H = hydraulisches Potenzial	[hPa]	Ψ_m = Matrixpotenzial	[hPa]
Ψ_z = Gravitationspotenzial	[hPa]		

Diese Teilpotenziale gelten durch Höhen- und Tensiometermessung als einfach zu bestimmen und ergeben eine Annäherung an das hydraulische Potenzial. Nach KUTILEK & NIELSEN (1994) umfasst die Messgröße des Matrixpotenzials auch Anteile von den Teilpotenzialen Ψ_o , Ψ_Ω und Ψ_g .

3.1.4 Wasserretentionsbeziehung

Zwischen dem von den Porengrößen abhängigen Matrixpotenzial und der im Boden enthaltenen Wassermenge besteht ein enger Zusammenhang. Die grafische Darstellung dieses Zusammenhangs wird Bodenwassercharakteristik, Wasserspannungs-Wassergehaltskurve, Wasserspannungskurve, Wasserretentionskurve oder pF-Kurve genannt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992).

Die Beziehung zwischen Matrixpotenzial bzw. Wasserspannung und Wassergehalt ist abhängig von der Porengrößenverteilung und der Lagerungsdichte. Durch die Zuordnung bestimmter Tensionen zu den entsprechenden Äquivalentporendurchmessern kann von der Wasserspannungskurve auf die Porengrößenverteilung geschlossen werden (HARTGE & HORN 1999).

Bei der Betrachtung einer Wasserretentionskurve kann der Wasserhaushalt eines Bodens bezüglich seiner Speichereigenschaften und der Entwässerungsgeschwindigkeit näher charakterisiert werden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992, KUTILEK & NIELSEN 1994). In Abb. 3.1 sind Wasserspannungskurven von vier unterschiedlichen Bodenarten schematisch dargestellt¹.

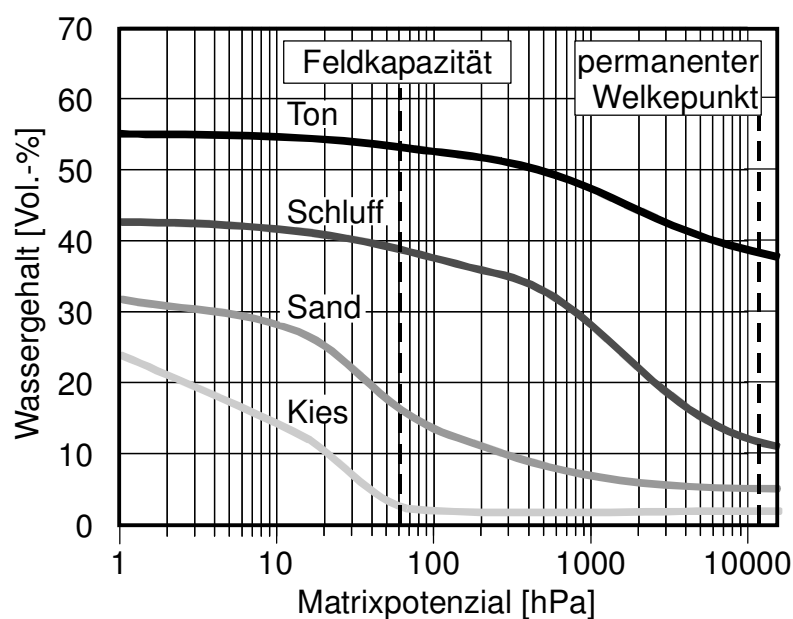


Abbildung 3.1: Wasserretentionskurven verschiedener Bodenarten (nach STEINERT 1999)

Den Verläufen der Kurven ist zu entnehmen, dass bei geringen Matrixpotenzialen der Wassergehalt (θ_s) erst dann abnimmt, wenn ein bestimmtes Matrixpotenzial überschritten ist. Dies ist der Luftporeneintrittswert, bei dem die ersten und größten Poren entwässern (HILLEL 2004). In grobkörnigen Böden bzw. in Böden mit großen Poren ist der Luftporeneintrittswert klein und nimmt mit zunehmendem Feinkornanteil bzw. steigendem Anteil an feinen Poren zu. Mit kontinuierlich zunehmendem Matrixpotenzial entwässern immer kleinere Poren. Nur der Feinporenanteil bleibt mit Wasser gefüllt, woraus sich der materialspezifische Residualwassergehalt (θ_r) ergibt (HILLEL 2004).

VAN GENUCHTEN (1980) hat eine in der Modellierung häufig angewandte mathemati-

¹ Nach der Formel 3.2 hat zwar das Matrixpotenzial ein negatives Vorzeichen, dennoch fließt für alle weiteren Darstellungen der Betrag des Matrixpotenzials in die Betrachtungen ein, somit wird das negative Vorzeichen nicht berücksichtigt.

sche Beschreibung der Wasserspannungskurve entwickelt:

Wasserretentionsbeziehung nach VAN GENUCHTEN (1980): $\theta_\psi = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n]^m}$ mit $m = 1 - 1/n$ (Formel 3.3)

θ_ψ = Wassergehalt bei Wasserspannung ψ [cm ³ *cm ⁻³]	Ψ_m = Matrixpotenzial [hPa]
θ_s = Wassergehalt bei Sättigung [cm ³ *cm ⁻³]	α, n = van Genuchten-Parameter [1*cm ⁻¹ , -]
θ_r = Residualwassergehalt [cm ³ *cm ⁻³]	

Weitere Formeln, welche die Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt beschreiben, wurden von BROOKS & COREY (1966), MUALEM (1984), VISSER (1966) u. a. aufgestellt.

Der Verlauf der Wasserspannungskurve ist davon abhängig, ob sie während der Ent- oder Bewässerung eines Bodens ermittelt wurde. Bei der ersten vollständigen Be- bzw. Entwässerung entstehen die sogenannten Randkurven, auch als primäre Desorptions- oder Adsorptionskurve bezeichnet (KUTILEK & NIELSEN 1994). Aufgrund unvollständiger Be- oder Entwässerungsvorgänge bilden sich Hystereseschleifen oder sekundäre Retentionskurven, die zwischen den Randkurven liegen. Der Wassergehalt während der Desorption ist dabei größer als im Verlauf der Adsorption (HILLEL 2004, KUTILEK & NIELSEN 1994, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992).

Die Hysterese kann am häufigsten in grobkörnigen Böden im Bereich geringer Matrixpotenziale beobachtet werden. Dies ist ein Bereich, in dem sich die leerenden Poren in einem höheren Spannungsbereich befinden als bei ihrer Füllung (HILLEL 2004).

3.1.5 Wasserbewegung

Die spezifische Durchflussrate q ist abhängig von dem im System herrschenden Potenzialgefälle, das sich aus der Veränderung des hydraulischen Potenzials ψ_H über die Fließstrecke z ergibt und der Wasserleitfähigkeit (k_ψ) (DARCY 1856 in HILLEL 2004):

Gesetz von DARCY: $q = -k_\psi \frac{\partial \psi_H}{\partial z}$ (Formel 3.4)

q = spezifische Durchflussrate [cm ³ *cm ⁻² *s ⁻¹]	Ψ_H = hydraulisches Potenzial [hPa]
k_ψ = Wasserleitfähigkeit [cm ³ *cm ⁻² *s ⁻¹]	z = Fließstrecke [cm]

Die Darcy-Gleichung ist anzuwenden unter quasi stationären Verhältnissen und gilt nur im Bereich der laminaren Strömungen. Unter gesättigten Verhältnissen entwickelt sich das antreibende Potenzial aus den Differenzen der Wasserstandshöhen

(KUTILEK & NIELSEN 1994). Die Verhältnisse an der Grenzschicht in Kapillarsperren bewegen sich im nahezu gesättigten Bereich (GRÄSLE & HORN 1998, KÄMPF 2000).

Die unter natürlichen Verhältnissen vorliegenden instationären Bedingungen werden beschrieben, indem die Kontinuitätsgleichung (Formel 3.5) mit der DARCY-Gleichung (Formel 3.4) zur RICHARDS-Gleichung (Formel 3.6) kombiniert wird (HILLEL 2004).

$$\text{Kontinuitätsgleichung:} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad (\text{Formel 3.5})$$

$$\text{Richards-Gleichung:} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left(k_{\psi} \frac{\partial \psi_H}{\partial z} \right)}{\partial z} \quad (\text{Formel 3.6})$$

θ = Wassergehalt	$[\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}]$	t = Zeit	[s]
q = spezifische Durchflussrate	$[\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$	Ψ_H = hydraulisches Potenzial	[hPa]
k_{ψ} = Wasserleitfähigkeit	$[\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$	z = Fließstrecke	[cm]

Die **Wasserleitfähigkeit k** ist eine Materialkenngröße und ist abhängig vom Porensystem und dem wassergefüllten Volumenanteil.

Zu Beginn einer Entwässerung leeren sich zunächst die groben Poren, die den größten Anteil an der Wasserbewegung einnehmen. Dies bedingt, dass bei einem hohen Anteil an Grobporen die Wasserleitfähigkeit anfangs besonders stark abnimmt, bei einem hohen Anteil an feineren Poren weniger. Die Wasserleitfähigkeit ist entsprechend von den Porengrößenverteilungen der verschiedenen Materialien abhängig und wird durch den Verlauf der Wasserspannungs-Wasserleitfähigkeitsfunktion gekennzeichnet (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992, KUNTZE ET AL. 1994, HARTGE & HORN 1999).

Für die Vorhersage der ungesättigten hydraulischen Wasserleitfähigkeit wurden verschiedene Modelle entwickelt, die sich dem Wert der leicht zu bestimmenden gesättigten Leitfähigkeit und der Wasserretentionskurve bedienen (BROOKS & COREY 1963; VERECKEN 1992, VAN GENUCHTEN 1980). Ein besonders weit verbreiteter Ansatz ist der von VAN GENUCHTEN (1980). Er gilt von der Sättigung bis zu einem hohen Grad der Entwässerung (BOHNE 1998).

Wasserleitfähigkeit
nach VAN GENUCHTEN
(1980):

$$k(\psi_m) = k_f \frac{\{1 - (\alpha \cdot \psi_m)^{n-1} [1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n]^{m/2}} \quad (\text{Formel 3.7})$$

mit $m = 1 - 1/n$

k_ψ = Wasserleitfähigkeit	[cm ³ *cm ⁻² *s ⁻¹]	Ψ_m = Matrixpotenzial	[hPa]
k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit	[cm ³ *cm ⁻² *s ⁻¹]	α, n = van Genuchten-Parameter	[1*cm ⁻¹ , -]

Die Leitfähigkeitsfunktion beruht danach auf der Wasserretentionsbeziehung, die nach VAN GENUCHTEN in Formel 3.3 dargestellt wurde (BOHNE 1998).

Auch in der Bodenluft ist Wasser enthalten. Wenn der Wasserdampf, ausgedrückt als ein Partialdruck an verschiedenen Stellen im Boden, unterschiedlich ist, kommt es zur ausgleichenden dampfförmigen Wasserbewegung. In diesem Zusammenhang müssen das isotherme und das anisotherme Dampfdruckgefälle als zwei auslösende Mechanismen der Wasserdampfbewegung berücksichtigt werden (HARTGE & HORN 1999). Für Kapillarsperren und deren Leistungsfähigkeit spielt diese Art der Wasserbewegung eine untergeordnete Rolle (HOLFELDER 2002, STEINERT 1999, STEINERT ET AL. 1996), deshalb wird in diesem Zusammenhang auf eine ausführlichere Beschreibung verzichtet und auf die Literatur verwiesen.

3.1.6 Funktionsprinzip der Kapillarsperre

Kapillarsperren sind mehr oder weniger geneigte Systeme aus nicht bindigen Materialien und einer deutlichen Schichtgrenze. Eine sandige Kapillarschicht liegt über einem meist kiesigen Kapillarblock. Wasser, das in die Kapillarschicht infiltriert, wird dort kapillar als Haftwasser gebunden und fließt oberhalb der Schichtgrenze im Porenraum der Kapillarschicht lateral ab - also dem Hang und nicht der Schwerkraft in den Kapillarblock folgend (MELCHIOR 1993, STEINERT 1999, WOHNLICH 1991).

Die vertikale Versickerung wird verhindert durch die Grenzflächenspannung am Übergang der wassergefüllten Poren in der Kapillarschicht zu den luftgefüllten Poren des Kapillarblocks. Aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers bilden sich unter ungesättigten Verhältnissen hängende Menisken in den Kapillaren des Kapillarschichtandes (HARTGE 1998). Solange die Kapillarkräfte gegenüber den Gravitationskräften überwiegen, behält die Kapillarsperre ihre Wirksamkeit bei. Dabei ist jedoch bezüglich der Materialien der Kapillarschicht darauf zu achten, dass trotz einer ausgeprägten Kapillarität eine gute hydraulische Leitfähigkeit gewährleistet sein muss, damit das Wasser lateral abgeführt werden kann (VON DER HUDE 1999).

Dem Kapillarblock kommt die Aufgabe zu, die Kapillarität zu unterbrechen. Um diese scharfe kapillare Trennung herzustellen, muss die Körnung des Kapillarblockmateri-

als deutlich größer sein als die des Kapillarschichtandes (ZISCHAK 1997). Nach SMESRUD & SELKER (2001) ist die Dränkapazität einer Materialkombination umso leistungsstärker, je größer der Unterschied zwischen den Korngrößen der beiden Kapillarsperrenmaterialien ist. Begrenzt wird dieser Aspekt jedoch durch die geforderte Filterstabilität der beiden Materialien zueinander, durch welche die exakte Schichtgrenze gewährleistet wird (BAUER 2001, STEINERT ET AL. 1996, STEINERT 1999, VON DER HUDE 1999).

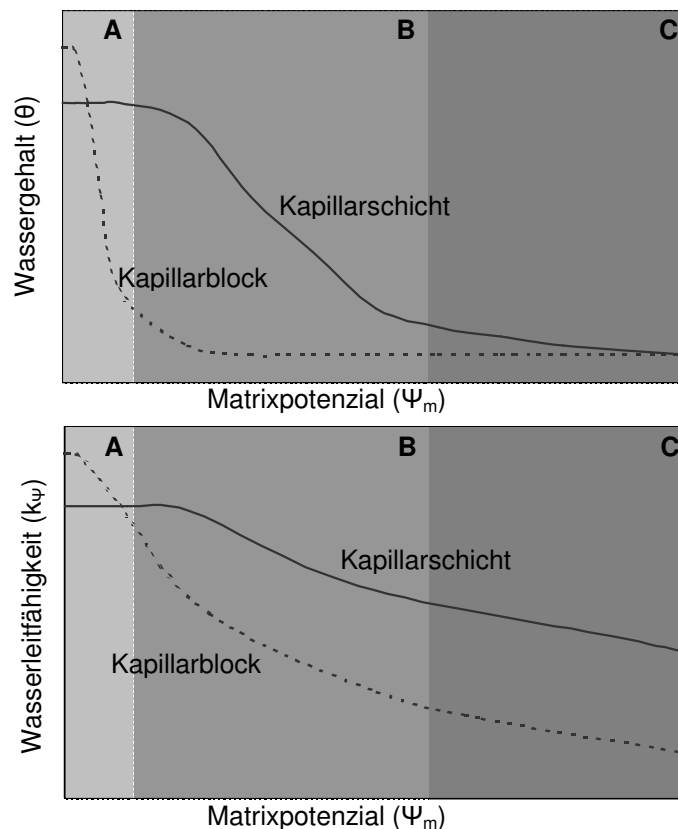


Abbildung 3.2: Schematische Wasserspannungs-Wassergehalts-Beziehung (oben) und Wasserspannungs-Wasserleitfähigkeits-Beziehung (unten) von Kapillarschicht- und Kapillarblockmaterialien (nach STEINERT 1999, verändert)

Die Funktion der Kapillarsperre lässt sich auch anhand der weiter oben beschriebenen Parameterfunktionen abbilden (Abb. 3.2). An der Schichtgrenze zwischen Kapillarblock und Kapillarschicht stellt sich in beiden Materialien das gleiche Matrixpotenzial ein, das jedoch zu großen Unterschieden in den Wassergehalten der jeweiligen Schicht führt. Der höhere Sättigungsgrad im feinkörnigen Material bedingt eine um ein Vielfaches höhere hydraulische Leitfähigkeit im Vergleich zum grobkörnigen Material (siehe Abb. 3.2 Abschnitt B). Aus den ungesättigten Verhältnissen im Kapillarblock ergeben sich extrem geringe Fließquerschnitte, die für eine Wasserleitung zur Verfügung stehen (STEINERT 1999, KÄMPF 2000).

Auch bei höheren Matrixpotenzialen, die eine immer weiter fortschreitende Angleichung der Wassergehalte von Kapillarschicht und –block verursachen (siehe Abb.

3.2 Abschnitt C), bleibt die Wirkung der Kapillarsperre aufgrund der immer noch wesentlich höheren Wasserleitfähigkeit des feinkörnigen Materials bestehen.

Nimmt das Matrixpotenzial an der Grenzschicht immer weiter ab, so dass sich der Wassergehalt der Sättigung nähert, steigt der Wassergehalt des Kapillarblocks in einem relativ geringen Wasserspannungsbereich bis zur Sättigung extrem an und übertrifft sogar den der Kapillarschicht (siehe Abb. 3.2 Abschnitt A). Mit zunehmendem Wassergehalt bzw. abnehmender Wasserspannung an der Grenzschicht steigt auch die Wasserleitfähigkeit des Kapillarblocks, der mehr und mehr durchlässig wird.

Viele Autoren nehmen an, dass die Kapillarsperre ab dem Schnittpunkt der Leitfähigkeitsfunktionen der beiden Materialien ihre Wirksamkeit verliert (BAUER 2001, WOHLNICH 1991, ZISCHAK 1997), während andere, wie z. B. JELINEK (1997) und KHIRE ET AL. (1999, 2000) zu bedenken geben, dass die Dichtwirkung mit der stetigen Zunahme der ungesättigten Leitfähigkeit des Kapillarblocks schon bedeutend früher abnimmt. Solange jedoch der laterale Abfluss der Kapillarschicht die maximale vertikal zufließende Wassermenge übersteigt, ist die Wirksamkeit der Kapillarsperre gegeben (STEINERT 1999).

Das Wasser in der Kapillarschicht wird durch die sich an der Schichtgrenze einstellende Anisotropie hangparallel abgelenkt (HARTGE & HORN 1999). Die Gradienten des hydraulischen Potenzials verlaufen mit zunehmender Nähe zur Schichtgrenze verstärkt lateral, so dass die Richtung des Wasserflusses als Resultierende der horizontal und vertikal wirkenden Kräfte bezeichnet werden kann (BLUME 1992, JELINEK 1997). Durch Tracerversuche konnten STEINERT (1999) und VON DER HUDE (1999) nachweisen, dass maßgeblich die untersten Zentimeter der Kapillarschicht am Wassertransport beteiligt sind. MIYAZAKI (1993) und KUNG (1993) beschreiben den Abfluss direkt oberhalb der Schichtgrenze als präferentiellen Fluss.

Im Kapillarblock können zwei Arten des Wasserflusses beobachtet werden (STEINERT 1999). Zum einen kann von einem Filmfluss gesprochen werden, durch den das Wasser entlang der Kornoberflächen verlagert wird. Er ergibt sich aufgrund der hohen Unterschiede in den Leitfähigkeiten aus den nur sehr geringen Übertrittsmengen an Wasser von der Kapillarschicht in den Kapillarblock. Diese geringen Wassermengen stehen unter großem Einfluss der Adsorptionskräfte und können tatsächlich nur dann ungehindert ablaufen, wenn sich durch eine vorangegangene Bewässerung Wasser in den Porenwinkeln gehalten hat, so dass die Fließstrecke nicht unterbrochen wird. LU ET AL. (1994) messen dem Wasserfluss in der Adsorptionsschicht in gänzlich ausgetrockneten Böden keine Bedeutung zu. Weist das Material hingegen eine gute Benetzbarkeit auf, kann sich eine ausgeprägtere Adsorptionsschicht um die Körner bilden, die einen entsprechend bedeutsamen Filmfluss zur Folge hat. Im Kapillarblock wird der Filmfluss in Kippinnenversuchen durch eine

gleichmäßige Wasserfront parallel zur Schichtgrenze sichtbar (KÄMPF 2000, STEINERT 1999).

Bei einem Wechsel stark unterschiedlicher Texturen, wie es bei Kapillarsperren der Fall ist, können sich als zweite Art des Wasserflusses präferenzielle Fließwege ausbilden, von HILL & PARLANGE (1972, in KUTILEK & NIELSEN 1994, in HILLEL 2004) aufgrund des Erscheinungsbildes als „fingering“ bezeichnet. HILLEL & BAKER bezeichnen den Wassereintrittspunkt des groben Materials der unteren Schicht in diesem Zusammenhang als bedeutendste Einflussgröße (BAKER & HILLEL 1990, HILLEL & BAKER 1988). Solange an der Grenzschicht ein sehr hohes Matrixpotenzial herrscht, wird es nicht zu einem fingerartigen Durchbruch in den Kapillarblock kommen. Steigt der Wassergehalt an der Grenzschicht jedoch soweit an, dass das Matrixpotenzial an der Grenzschicht dem Wassereintrittswert des groben Materials der untenliegenden Schicht entspricht, wird das Wasser auf präferentiellen Fließwegen in den Kapillarblock geleitet.

Wenn durch steigenden Wasserzufluss die hydraulische Leitfähigkeit des groben Kapillarblocks die des feinen Kapillarschichtmaterials erreicht, kann der Kapillarblock das Wasser nicht über sein gesamtes Porenvolumen abführen, da für diesen Fall nicht genügend Wasser an der Grenzschicht vorhanden ist. Aus diesem Grund wird das Wasser, das in den Kapillarblock eintritt, lediglich durch wenige präferenzielle Fließbahnen abgeleitet (BAKER & HILLEL 1990, HILLEL & BAKER 1988, KUTILEK & NIELSEN 1994).

Dieser Effekt wird durch an der Schichtgrenze auftretende Heterogenitäten verstärkt. Instabilitäten können durch stellenweise abweichende Korngrößenverteilungen verursacht werden, die örtlich begrenzt einen kleineren Porensprung bewirken, so dass Wasser in die kleineren Poren übertritt. Des Weiteren wird der präferentielle Fluss in Form des „fingering“ durch wasserabweisende Materialien begünstigt (BAUTERS ET AL. 1998, RITSEMA ET AL. 1998, RITSEMA & DEKKER 1994).

Nimmt die in die Kapillarschicht eindringende Wassermenge wieder soweit ab, dass die Kapillarkräfte dominieren, erlangt die Kapillarsperre erneut ihre Funktion. Einmal auf diese Weise ausgebildete Fließpfade können jedoch bei nachfolgenden überhöhten Belastungen des Systems bestehen bleiben. Dies begründet sich in der extremen Hysterese bzw. der Retentionscharakteristik (RITSEMA & DEKKER 2000, RITSEMA ET AL. 1998).

KÄMPF (2000) und STEINERT (1999) konnten durch Kipprinnen- bzw. Säulenversuche die Ausbildung von fingerartigen Fließwegen im Kapillarblock feststellen. In verschiedenen Messabschnitten der Kipprinnen und der Säulen zeigten sich unregelmäßige Blockabflussraten, die nicht ausschließlich durch die Zuflussraten erklärt werden konnten.

Derzeit ist noch nicht geklärt, ob das Phänomen des „fingering“ gleichermaßen im Feldmaßstab eintritt (GLASS & NICHOL 1996). In den vergangenen Jahrzehnten wurde das „fingering“ in zahlreichen Studien eingehend untersucht (BUTTS & JENSEN 1996, HILL & PARLANGE 1972, RAATS 1973, GLASS ET AL. 1988, 1989a, 1989b, 1989c, 1989d, BAKER & HILLEL 1990, SELKER ET AL. 1992, LU ET AL. 1994, LIU ET AL. 1994a, 1994b, YAO & HENDRICKX 1996, 2001).

Einige Untersuchungen setzten sich in diesem Zusammenhang intensiv mit der Entwicklung numerischer Modelle auseinander, um diese Art des präferentiellen Flusses prognostizieren zu können. Die unterschiedlichen Ansätze bestätigten die Sensitivität bezüglich der bodenhydraulischen Eigenschaften und der Randbedingungen, unter welchen die Experimente durchgeführt wurden (ELIASSI & GLASS 2001, 2002, GLASS & YARRINGTON 2003, HILLEL & BAKER 1988, RITSEMA & DEKKER 2000, WANG ET AL. 1998).

3.1.7 Laterale Dränkapazität als Kenngröße zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Kapillarsperren

Die Leistungsfähigkeit von Kapillarsperren, die im Allgemeinen als laterale Dränkapazität („diversion capacity“) bezeichnet wird, wird auf unterschiedliche Weisen definiert. Für die praktische Umsetzung einer Kapillarsperre als alternative Deponieoberflächenabdichtung steht die Begriffsbestimmung der lateralen Dränkapazität nach STEINERT (1999). Er definiert die laterale Dränkapazität als „die maximale Wassermenge, die pro Zeit von einer Kapillarsperre abgeleitet werden kann, bevor eine nennenswerte Wassermenge in den Kapillarblock sickert.“ Die Wassermenge, die als Kapillarblockabfluss zu tolerieren ist, muss projektspezifisch festgesetzt werden. Als Bezugsgröße wird häufig der geforderte Grenzwert der Wasserleitfähigkeit für die mineralische Dichtung ($k_f=10^{-9} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) herangezogen (VON DER HUDE 1999, JELINEK 1997). BARTH (2003) toleriert 1% Durchbruchrate in Bezug auf die gesamte Sickerwassermenge.

Die laterale Dränkapazität als maximale lateral ableitbare Wassermenge ist nach ROSS (1990) erreicht, wenn der Kapillarblockabfluss dem Zufluss aus der Rekultivierungsschicht entspricht. Diese Definition diene einigen Ansätzen zur mathematischen Beschreibung der Wasserbewegung in Kapillarsperren (vgl. Kap. 3.3.3). Nur diese Definition nach ROSS (1990) ermöglicht es, die Effektivität verschiedener Kapillarsperrenkombinationen bezüglich ihrer bodenhydraulischen Materialeigenschaften unabhängig von der Versuchsanordnung zu vergleichen (KÄMPF 2000).

Im Laufe der Kapillarsperrenforschung wurden verschiedene Methoden entwickelt, die laterale Dränkapazität anhand der Abflussdaten der Kipprinnenversuche zu ermitteln (STEINERT 1999, VON DER HUDE 1999, WOHLNICH 1991).

Eine Methode besteht darin, die laterale Dränkapazität bei der Zuflussrate festzusetzen, bei der die ersten nennenswerten Kapillarblockabflüsse gemessen werden (BARTH 2003, STEINERT 1999, VON DER HUDE 1999, WOHNLICH 1991). STEINERT (1999) stellte die Kapillarblockabflüsse in Abhängigkeit der Zuflüsse dar und ermittelte die laterale Dränkapazität bei der höchsten Kapillarschichtabflussrate, bevor es zum exponentiellen Anstieg der Blockabflüsse kommt. Bei beiden Methoden muss vorher projektspezifisch definiert werden, welche Durchbruchraten toleriert werden können.

Bei der „empirischen“ Ableitung der lateralen Dränkapazität aus den Abfluss-Zufluss-Beziehungen besteht generell der Nachteil, dass aufgrund der Methodik – z. B. hohe Zuflussratensteigerungen – die laterale Dränkapazität nur näherungsweise abgeschätzt werden kann und damit von der Versuchsdurchführung abhängig ist.

STEINERT (1999) entwickelte aufgrund dessen ein Verfahren, um die laterale Dränkapazität methodisch standardisiert ableiten zu können. Dabei schlägt er vor, die Zufluss-/Kapillarblockabflussbeziehung in einem doppelt logarithmischen Koordinatensystem darzustellen. Die Datensätze können daraufhin in zwei Phasen eingeteilt werden. Der erste Bereich steht für Kapillarblockabflüsse, die sich noch vor dem exponentiellen Anstieg befinden, während der zweite Bereich die hohen Durchbrüche zeigt. Für beide Bereiche werden Korrelationen zwischen den Zuflüssen und den Kapillarblockabflüssen erstellt, deren Korrelationsgeraden einen Schnittpunkt bilden, der für eine genau definierte laterale Dränkapazität stehen soll. Der errechnete Schnittpunkt kann sich allerdings in einem Zuflussbereich befinden, bei dem der exponentielle Anstieg des Kapillarblockabflusses schon begonnen hat. STEINERT (1999) empfiehlt deshalb einen Sicherheitsfaktor einzubeziehen.

Die Wirksamkeit der Kapillarsperre bzw. der Kapillarschicht ist neben den Materialeigenschaften von der Menge des aus dem Oberboden abfließenden Wassers abhängig: Je geringer dieser Anteil ist, desto größer ist die Wirksamkeit. Aus diesem Grunde ist es ratsam, die Rekultivierungsschicht ausreichend mächtig zu dimensionieren, um die Verdunstung der Vegetationsdecke zu maximieren und um zusätzlich auch eine gleichmäßige Verteilung bzw. Dämpfung der Sickerwasserspitzen zu erreichen (BARTH 2003, ZISCHAK 1997). Mit zunehmender Hanglänge akkumuliert der Wasserzufluss aus der Rekultivierungsschicht in der Kapillarschicht, so dass der Abfluss aus der Kapillarschicht stetig ansteigt (KÄMPF 2000). Ein weiterer Einflussfaktor auf die laterale Dränkapazität ist die Hangneigung. Mit zunehmendem Neigungswinkel nimmt die Leistungsfähigkeit der Kapillarsperre zu (STEINERT 1999).

Je höher die laterale Dränkapazität der jeweiligen Kapillarsperre ist, desto größere Hangabschnitte können in der Praxis umgesetzt werden und um so weniger Zwi-

schenrigolen sind zur Sickerwasserabführung nötig (JELINEK 1997).

3.2 Chemische Eignung des Einsatzes von Recyclingmaterialien in Kapillarsperren

3.2.1 Chemische Eigenschaften von Recycling-Baustoffen

Die Umweltverträglichkeit von Recycling-Baustoffen und damit deren Eignung als Bestandteil einer Oberflächenabdichtung ist von der stofflichen Zusammensetzung der verschiedenen Baustoffgruppen abhängig (BAASCH & GOETZ 2004, ENGESER ET AL. 1998, JOHNSON ET AL. 1998, KARNUTH 2003). Beton- und Mineralgemische sind die am häufigsten vorkommenden Recycling-Baustoffe (BAASCH & GOETZ 2004). Im Folgenden werden deren Inhaltsstoffe und Zusammensetzungen bzw. die daraus resultierenden Eigenschaften bezüglich einer Auslaugung näher charakterisiert.

Beton besteht aus einem Gemisch von Zement, Gesteinskörnung und Wasser. Mit der Erhärtung wird er dem Naturstein ähnlich und damit dicht (ETTEL 2003). Nach der Dichte wird Leichtbeton, Normalbeton und Schwerbeton unterschieden (DIN 1045). Entsprechend der Anforderungen, die an den Beton gemäß seiner Nutzung gestellt werden, ergeben sich unterschiedliche Zusammensetzungen und Eigenschaften des Materials (Tab. 3.1).

Tabelle 3.1: Einteilung der Betone nach der Rohdichte (DIN 1045)

Betonart	Trockenrohichte in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ bzw. $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$	Gesteinskörnung (Beispiele)
Leichtbeton	0,8 bis 2,0	Blähton, Blähschiefer, Hüttenbims, Naturbims
Normalbeton	>2,0 bis 2,6	Sand, Kies, Splitt
Schwerbeton	>2,6	Schwerspat, Eisenerz, Stahlgranulat

Beton muss verschiedenen chemischen und physikalischen Einwirkungen widerstehen, wie z. B. Frost, chemischen Angriffen (u. a. Taumittel) sowie dem Angriff durch Verschleiß. Die Festigkeit des Betons wird durch den **Zement** realisiert, der hauptsächlich aus Calciumsilicaten und Calciumaluminaten besteht. Bei der Reaktion dieser beiden Bestandteile mit Wasser bilden sich Hydrate, welche die hohe Festigkeit des Zements bewirken und als Erhärtungsprodukte wasserbeständig sind (ETTEL 2003).

Die Auslaugung des Betons erfolgt über die Poren und Risse im Zementstein. Betonangreifende Stoffe sind z. B. organische oder anorganische Säuren, wie sie häu-

fig im Bodenwasser in Form von Huminsäuren und Kohlensäure vorhanden sind. Letztere ist für die Karbonatisierung verantwortlich (SHAFIQUE ET AL. 1998). Sulfate wirken treibend auf den Beton – bei der Bildung von Kristallen kann der Zementstein durch den entstehenden Druck zertreiben (ARNOLD 1981, ETTTEL 2003).

Die Auslaugung der Materialien unterliegt drei Mechanismen (VAN DER SLOOT 2002, BRAMESHUBER UND UEBACHS 2000):

- der Anfangsauswaschung,
- der kontinuierlichen Auflösung und
- der Diffusion.

Die Widerstandsfähigkeit des Betons gegenüber der Auslaugung hängt insbesondere von seiner Dichtigkeit bzw. von der Porosität des Zementgesteins und aufgrund der Wasserbeständigkeit des Zements von dessen Massenanteil im Beton ab (PETZOLD 1992). Niedrige Wassertemperaturen, welche die Reaktionsgeschwindigkeit verlangsamen, nur langsame Erneuerung der betonangreifenden Substanzen durch geringe Mengen an Wasserzufluss, unbewegtes Wasser oder nur kurze Einwirkung führen zu einem nur geringen Angriffsgrad (ETTEL 2003, KARNUTH 2003). Bei vollständig mit Wasser gefüllten Poren ist die Karbonatisierung unbedeutend, da nach Erreichen einer bestimmten Porenlösungskonzentration keine Diffusion oder Auflösung mehr stattfindet. Zusätzlich setzen mit Wasser gefüllte Poren dem Eindringen von CO_2 größeren Widerstand entgegen als leere Poren (ETTEL 2003, KARNUTH 2003, VAN DER SLOOT 1998).

Durch eine Vielzahl von Auslaugversuchen wurde festgestellt, dass aus Zement gebundenen Baustoffen nur äußerst geringe Mengen an Spurenelementen ausgelaugt werden (HOHBERG ET AL. 1996, 1997, SPANKA 2002, VAN DER SLOOT 1998). Dies wird durch die Alkalität der Porenlösung und den großen Diffusionswiderstand der Zementmatrix bedingt. HOHBERG ET AL. (1996, 1997) konnten nachweisen, dass dies selbst für den Fall gilt, wenn gebrochene Materialien mit Korngrößen < 10 mm – entspricht der Korngröße von Kapillarmaterialien - eluiert werden.

Asphalt ist ein Gemisch aus Mineralstoffkörnungen und **Bitumen** oder bitumenhaltigen Bindemitteln. Das Gemisch ist zusammengesetzt aus ca. 95 % mineralischen Gesteinen und etwa 5 % bituminösen Bindemitteln, welche die Einzelkörner zu einem dauerhaft verbundenen Material verkitten (LINDGREN 1996). Die **Gesteinskörnungen**, die als Zuschlag im Asphalt und auch in Mörtel bzw. Beton verwendet werden, sind natürliche oder auch künstliche Mineralstoffe, z. B. industrielle Nebenprodukte wie Schlacken oder Recycling-Baustoffe (KUTZNER 2003). Die Mineralstoffe müssen witterungs- und frostbeständig sein sowie schlag- und druckfest. Zusätzlich soll eine gute und bestehenbleibende Haftung zwischen Gestein und Bitumen hergestellt werden (ROGOSCH 2003).

Bitumen ist ein erdölstämmiges Produkt, das aus einer sehr großen Anzahl verschiedener Kohlenwasserstoffe aufgebaut ist. Es ist beständig gegenüber salzhaltigen und aggressiven Wässern, Kohlensäure sowie anderen schwachen Säuren. Auch zeigt es Resistenz gegenüber Einwirkungen von starker Salzsäure und verdünnter Schwefel- bzw. Salpetersäure bei Raumtemperatur. Je härter das Bitumen ist, desto größer ist seine Widerstandsfähigkeit gegenüber den chemischen Einflüssen. Bei einer guten Verbindung und Verkittung zwischen dem Bitumen und den Gesteinskörnungen ist dies auf den Asphalt entsprechend übertragbar. Alterung durch Oxidation erfolgt nur sehr langsam und wird unter Ausschluss von Licht noch weiter verlangsamt, so dass die Langzeitalterung nahezu keine Bedeutung aufweist. Bitumen ist lediglich in unpolaren Lösungsmitteln, wie etwa Benzin, löslich (KARNUTH 2003, LINDGREN 1996, ROGOSCH 2003).

Der Hauptbestandteil aller keramischen Baustoffe wie **Ziegel, Steinzeug**, Klinker und Porzellan ist Ton bzw. Lehm. Tonminerale bestehen hauptsächlich aus Aluminiumsilikaten. Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung ergeben sich aus den verschiedenen Beimengungen der natürlichen Tonvorkommen, woraus entsprechend auch die Beschaffenheiten und Eigenschaften des mineralischen Rohstoffs resultieren. So zeigen poröse grobkeramische Materialien, die für Ziegel, Dachziegel und Dränrohre eingesetzt werden, eine andere chemische Zusammensetzung als die tonigen Werkstoffe, die für dichtes grobkeramisches Steinzeug genutzt werden (PETZOLD 1992).

Gemäß ihrer unterschiedlichen Porosität und damit Dichtigkeit zeigt sich beim Steinzeug noch eine gute chemische Resistenz. Bei Ziegeln können oberflächlich Salzausblühungen entstehen. Die im Ziegel enthaltenen Salze lösen sich beim Feuchtigkeitseintritt, können ausgewaschen werden oder kristallisieren erneut bei Verdunstung. Bei einer Vergrößerung der Salzkristalle während des Kristallisationsvorgangs kann es zur Zerstörung des porösen Gefüges durch die sogenannte Salzsprengung kommen (KARNUTH 2003, METJE 2003, PETZOLD 1992). Die im Rohstoff angereicherten Schwermetalle werden entweder durch den Brennvorgang ausgetrieben oder in eine stabile, schwer lösliche Matrix eingebunden (HOLNSTEINER 1997 in KARNUTH 2003).

3.2.2 Nachweis der Umweltverträglichkeit von Recyclingmaterialien

Voraussetzung für den Einsatz mineralischer Abfälle in Kapillarsperren ist neben der bautechnischen Eignung die Sicherstellung der Umweltverträglichkeit bezüglich der im KRW-/ABFG (1996) genannten Schutzgüter. In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Elutionsverfahren entwickelt und angewandt, um das Auslaugverhalten verschiedener Recyclingmaterialien prognostizieren zu können. Unterschieden werden muss zwischen Flaschen- bzw. Schütteltests und Säulenversuchen als Laboruntersuchungen und Lysimeterversuchen unter naturnahen Bedingungen (BAASCH &

GOETZ 2004, DÜSER 1999, FÄLLMAN 1997, KARNUTH 2003, REICHERT 1997, VAN DER SLOOT 1998). Das Elutionsverhalten ist von einer beträchtlichen Anzahl physikalischer und chemischer Faktoren abhängig, die wiederum durch die jeweiligen Randbedingungen der verschiedenen Verfahren beeinflusst werden (VAN DER SLOOT 1998).

Zu den wichtigsten physikalischen Einflussfaktoren zählen Korngröße bzw. Porosität der Feststoffmatrix (FRIEGE ET AL. 1990). Sie bedingen in Säulenversuchen bzw. nach Materialeinbau unter realen Bedingungen, wie auch die Lagerungsdichte, das Porengefüge und die darin herrschende Wasserbewegung. Entscheidend ist der Kontakt des Lösungsmittels mit dem Feststoff, wodurch wasserlösliche Substanzen in die flüssige, mobile Phase übergehen. Einen Einfluss hat somit auch die zugeführte Wassermenge, die Niederschlag oder Sickerwasser simuliert und die Verfügbarkeit des Lösungsmittels bedingt (FÄLLMAN 1997, GRECH ET AL. 2002, REICHERT 1997).

Die Elutionsversuche im Labormaßstab werden meist bei Wasser/Feststoffverhältnissen durchgeführt, die weit oberhalb der natürlichen Bedingungen liegen (REICHERT 1997, GRECH ET AL. 2002). Dadurch wird während der Versuchsdauer die vorzeitige Einstellung eines Gleichgewichtszustandes verhindert, der dazu führen würde, dass auch bei noch vorhandenem Auslaugpotenzial keine weitere Elution stattfinden würde. Ein weiterer Vorteil in dem größeren Wasser/Feststoffverhältnis liegt darin, dass die Auslaugung beschleunigt wird und damit ein Zeitraffungseffekt erreicht wird. GRECH ET AL. (2002) sprechen bei einem Wasser/Feststoffverhältnis von 10 von einer ungefähren fiktiven Elutionsdauer in der Praxis von ca. 20-40 Jahren.

Als chemische Einflussfaktoren auf das Elutionsverhalten gelten die potenzielle Auslaugbarkeit der Inhaltsstoffe, die in Abhängigkeit der stofflichen Zusammensetzung der Materialien betrachtet werden muss. Schwer wasserlösliche Verbindungen können mit der Ermittlung von Gesamtfeststoffgehalten abgeschätzt werden (FRIEGE ET AL. 1990). Die Aufschlüsse der Feststoffgehalte durch Königswasser erbringen jedoch keine wesentlichen Erkenntnisse bezüglich der zu erwartenden Mobilität unter naturnahen Bedingungen.

Des Weiteren hängt das Elutionsverhalten von Komplezierungen durch anorganische oder organische Inhaltsstoffe, Sorptions- und Desorptionsvorgängen sowie Veränderungen von Redoxpotenzial und pH-Wert ab. Von vielen Autoren (BAASCH & GOETZ 2004, DÜSER 1999, FÄLLMAN 1997, FRIEGE ET AL. 1990, KARNUTH 2003, REICHERT 1995, VAN DER SLOOT 1998) wird gefordert, dies bei den Auslaugungsversuchen zu berücksichtigen und die Elutionsflüssigkeit nicht nur möglichst nah den entsprechenden natürlichen Bedingungen anzupassen, sondern auch die Art der Schadstoffbelastung des Probenmaterials zu beachten. So werden z. B. organische

Schadstoffe vorrangig durch Tenside als Lösungsvermittler mobilisierbar. Als natürliche Tenside, die in der Umwelt weit verbreitet sind, gelten u. a. Humin- und Gerbsäuren (HIRNER ET AL. 1998, REICHERT 1997). Die Auslaugung von Schwermetallen wird insbesondere vom pH-Wert des Eluenten beeinflusst. So gibt es Elemente, die in saurer Lösung löslich sind, bei hohen pH-Werten aber wieder ausfallen, wie z. B. Cd. Andere Elemente wie Pb und Zn verhalten sich ähnlich wie Cd, gehen aber im stark alkalischen Bereich wieder in Lösung (OBERMANN & CREMER 1992 IN REICHERT 1995, GRECH ET AL. 2002).

Für den Einsatz von Recyclingmaterialien wird die Umweltverträglichkeit nach den Vorgaben der Technischen Regeln der LAGA „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen“ untersucht. Diese Untersuchungen basieren auf Feststoffanalysen und auf Analysen der Eluate nach DIN 38 414-4 (DEV S4).

Mit dem Inkrafttreten der DEPVERWV (2005) wird dieses Untersuchungsprogramm im Rahmen des Nachweises der Umweltverträglichkeit bei dem Einsatz von nicht-stabilisierten Abfällen als Deponieersatzbaustoff rechtsverbindlich. Bei diesen Verfahren handelt es sich jeweils um einfache Versuchsdurchführungen, die reproduzierbar sind. Ferner stehen die Messwerte relativ schnell zur Verfügung und sie können nach DEPVERWV (2005) und dem Merkblatt 20 der LAGA bewertet werden. Erst durch diesen Bewertungsrahmen (vgl. Kap. 4.2.1.2) ist die Möglichkeit der Beurteilung und des Vergleichs der Ergebnisse möglich (REICHERT 1997, VAN DER SLOOT 1998, WALKER & TRÄNKLER 1993, WILSNACK & ERLER 2005). Dennoch bleibt die Unsicherheit bestehen, ob die unter Laborbedingungen im Eluat gemessenen Schadstoffkonzentrationen in die Praxis übertragen werden können und dürfen (BAASCH & GOETZ 2004, DÜSER 1999, FÄLLMAN 1997, FRIEGE ET AL. 1990, KARNUTH 2003, REICHERT 1995, VAN DER SLOOT 1998).

3.3 Praktische Erfahrungen mit Kapillarsperren

Einen ausführlichen Überblick der Kapillarsperrenforschung geben STEINERT (1999), VON DER HUDE (1999) und KÄMPF (2000). Aus diesem Grund sollen an dieser Stelle die wichtigsten Studien nur kurz erläutert und für Details auf die weiterführende Literatur verwiesen werden.

3.3.1 Probefelder und großflächige Umsetzung

Den Grundstein für die Kapillarsperre als Einsatz für eine Deponieabdeckung legte RACON (1980, in VON DER HUDE 1999) mit den ersten Versuchen in Frankreich 1972. In Dänemark wurden Testfelduntersuchungen durchgeführt, die aufgrund hoher Durchbruchsraten nur wenig zufriedenstellende Ergebnisse ergaben (ANDERSEN ET

AL. 1988, GREGERSEN 1995). VON DER HUDE (1999) führt dies zum einen auf die gering mächtige oder sogar fehlende Wasserhaushaltschicht auf den Versuchsfeldern und zum anderen auf die ungünstigen Materialien zurück. In der Schweiz wurden bereits Mitte der 1980er bis Anfang der 1990er Jahre zwei Sondermüll- und eine Schlackedeponie vollständig mit Kapillarsperrensystemen abgedeckt (BRATSCHI & MATTER 1994, COLOMBI 1986, MATTER & GSCHWIND 1989). Über den Kapillarsperren wurde jeweils eine bindige mineralische Dichtung aus Ton oder Schluff eingebaut. Zur Trennung der filterunstabilen Kapillarsperrenmaterialien zueinander war die Verwendung von Geotextilien notwendig (BRATSCHI & MATTER 1994, COLOMBI 1986, MATTER & GSCHWIND 1989).

In den USA wurden ab Mitte der 1980er Jahre Kapillarsperren großmaßstäbig in Versuchsfeldern getestet. Bei der Untersuchung der Effektivität der Kapillarsperren lag das primäre Ziel zunächst nur darin, durch den Kapillarsperreneffekt eine Sickerwassersperre zu erreichen und das Wasser durch Speicherung bzw. Evapotranspiration vom Deponiekörper fernzuhalten (BENSON ET AL. 1994, NYHAN 1990, PAIGE ET AL. 1996). In Versuchen von NYHAN ET AL. (1997), O'DONNELL ET AL. (1994), STORMONT (1995, 1996), WARD & GEE (1997) wurde das Prinzip der lateral wasserabführenden Kapillarsperre in verschiedenen Hangneigungen erfolgreich untersucht.

In Deutschland hat die Kapillarsperre als Alternative zur herkömmlichen Regelabdichtung aufgrund der Erfolge in Forschung und Praxis eine hohe Anerkennung erlangt (BAUER 2001, BARTH 2003, HARDER & KRAMER 2003, HOLFELDER 2002, JELINEK 1997, KÄMPF 2000, MELCHIOR 1993, MOCK ET AL. 1991, STEINERT 1999, VON DER HUDE 1991, 1999, VON DER HUDE ET AL. 1994, WOHNLICH 1990, ZISCHAK 1997). Eine ausführliche Auflistung von Anwendungsbeispielen von Kapillarsperren in Deutschland ist MELCHIOR & STEINERT (2001) zu entnehmen.

Der Beginn der Kapillarsperrenforschung in Deutschland kann mit MELCHIOR & MIEHLICH (1987) für das Ende der 1980er Jahre beschrieben werden. Sie installierten das erste Testfeld für ein Kapillarsperrensystem auf der Deponie Georgswerder in Hamburg (MELCHIOR 1997, MELCHIOR ET AL. 1993, 1994).

Das System einer mineralischen Dichtung über einer Kapillarsperre wird seit 1994 auf der Deponie Karlsruhe-West kontinuierlich untersucht. Der Aufbau des Systems wurde bis Ende 1996 in einem ersten Lysimeter (10 m Breite und 40 m Länge, Neigung 23°) eingehend getestet (ZISCHAK 1997, BREH & HÖTZL 1999). In einer zweiten Phase wurden mit Hilfe zweier weiterer Lysimeter (10 m Breite und 20 m Länge) Untersuchungen an optimierten Systemaufbauten durchgeführt, während die Messungen des ersten Lysimeters fortgeführt wurden (GIURGEA & HÖTZL 2004, HÖTZL & GIURGEA 2004). In beiden Phasen wurden akzeptable Ergebnisse erzielt, die nach Aussage von ZISCHAK (1997) durch eine Optimierung des Kapillarsperrenmaterials verbessert werden könnten.

Eine einfache Kapillarsperre wurde erstmalig in einem Testfeld auf der Deponie „Am Stempel“ in Marburg/Hessen umgesetzt (JELINEK 1993, 1997), und zeigte in den Jahren 1992 bis 1998 mit einer fast 100%-igen Abschirmwirkung sehr gute Ergebnisse (KÄMPF & MONTENEGRO 1999). Das Versuchsfeld wurde in zwei verschiedenen Hangneigungen errichtet. Der flache Bereich mit 10° erstreckt sich über 20 m und der steilere Bereich (16°) weist eine Länge von 30 m auf. Die Kapillarsperre, die von einer 2 m mächtigen Wasserhaushaltsschicht überdeckt ist, besteht aus einem 0,3 m mächtigen Kapillarblock aus Basaltsplitt der Körnung 0,71-2 mm und 0,4 m Feinsand der Körnung 0-1 mm.

Auf der Deponie „Monte-Scherbelino“ (Frankfurt am Main/Hessen) wurden 1994 ebenfalls 4 Testfelder (15 m breit und 40 m lang bei einer Neigung von 11°) allerdings mit unterschiedlichen Aufbauten des Kapillarsperrensystems angelegt und betrieben (JELINEK & VON DER HUDE 1994, JELINEK 1997). Nach einem Versuchszeitraum von 2 Jahren konnte JELINEK (1997) von zufriedenstellenden Ergebnissen aller 4 Varianten berichten.

Aufgrund der positiven Ergebnisse von den Deponien „Am Stempel“ und „Monte-Scherbelino“ wurde 1998 ein einfaches Kapillarsperrensystem als ganzheitliche Oberflächenabdeckung der 5 ha großen Altlast „Am Stempel“ (Marburg/Hessen) genehmigt (JELINEK 1999) und im Jahr 2002 mit einigen Veränderungen umgesetzt.

Auf der Deponie Esch-Beval (Luxemburg) wurde in einem Zeitraum von 2 Jahren neben fünf weiteren Testfeldern eine einfache Kapillarsperre untersucht. Die Rekultivierungsschicht hatte lediglich eine Mächtigkeit von 0,75 m und trotz der geringen Neigung von 5 % ($\approx 3^\circ$) zeigte die Kapillarsperre eine deutliche Funktionsfähigkeit (SCHNATMEYER 1998, WAGNER & SCHNATMEYER 2002).

Auf der Altdeponie Kuhstedt (Rotenburg/Niedersachsen) erfolgte 2001 die Installation von 3 Versuchsfeldern, davon ist eines als Kapillarsperrensystem aufgebaut. Bei überdurchschnittlich hohen Niederschlagsmengen von August 2001 bis Mai 2002 wurden erhöhte Blockabflüsse gemessen (HUPE ET AL. 2004).

Die erste großflächige Umsetzung einer Kapillarsperre, allerdings mit einer darunter liegenden Kunststoffdichtungsbahn, fand auf der Deponie Penig im Rahmen des Modellstandort-Vorhaben des Landes Sachsen statt (GROßMANN ET AL. 2000, Sonderausgabe, SLUG: <http://www.umwelt.sachsen.de/lfug/salfaweb/salfaweb-nt/berichte/aason/aason-7.9.html>). Der 25 cm mächtig eingebrachte Kapillarblock wies eine Körnung 2-8 mm auf und die 40 cm dicke Kapillarschicht eine Körnung von 0-2 mm.

Auf der Deponie Heinersgrund (Bayreuth/Bayern) wurden in den Jahren 2000 bis 2002 zwei Kapillarsperrenfelder auf ihre Eignung als Oberflächenabdichtung unter-

sucht (BARTH 2003, BARTH & WOHNLICH 1999, 2001). Die Neigungen der Felder betragen 10 % sowie 26 % und maßen etwa 2000 m². Die Großlysimeter - mit entsprechender Messeinrichtung bestückt - hatten eine Größe von 20 m Breite und 30 m Länge. Der Kapillarblock besaß eine Körnung 4-16 mm und der Kapillarschichtsand umfasste dem gegenüber eine entsprechend filterstabile Körnung von 0-4 mm (BARTH 2003). BARTH (2003) beschreibt eine Dichtwirkung von mehr als 95 % des Jahresniederschlags über den gesamten Versuchszeitraum, mit Ausnahme des flachen Versuchsfeldes im niederschlagsreichen Jahr 2002. Daraus folgte seine Empfehlung, bei der Wahl dieser Materialkombination mit einer darüber liegenden 1,5 m mächtigen Wasserhaushaltsschicht, für Deponien der Klasse II ein weiteres Dichtungselement einzuplanen.

Die derzeit größten Maßnahmen zum Einsatz von Kapillarsperrensystemen als Deponieoberflächenabdichtung finden auf der Deponie Grix mit fast 12 ha und auf der Zentraldeponie Emscherbruch mit 35 ha statt. Auf der Deponie Grix (Offenbach/Hessen) ist die Kapillarsperre mit einer darunter liegenden Kunststoffdichtungsbahn kombiniert (http://www.walter-heilit-vwb.de/deutsch/transportation/b_gross_depon.htm, <http://www.deponie-stief.de/abdichtung/kapillar.htm#grix>). Auf der Zentraldeponie Emscherbruch (Gelsenkirchen/Nordrhein-Westfalen) fungiert die Kapillarsperre als Entwässerungs- und Kontrollsystem über einer Kombinationsdichtung nach TA Abfall mit einer 50 cm mächtigen mineralischen Dichtung und einer Kunststoffdichtungsbahn (LÖWE 2003). Beide Bauvorhaben sollen noch im Jahr 2005 abgeschlossen werden.

In einem weiteren Probefeld, das vom Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe auf der Deponie Hohberg (Pforzheim/Baden-Württemberg) betreut wird, ist eine Kapillarsperre mit einer darüber liegenden Asphaltabdichtung kombiniert. Im ersten Halbjahr 2004 wurde eine Dichtigkeit von 99,96 % erreicht (GIURGEA ET AL. 2004).

Eine Weiterentwicklung der Kapillarsperrensysteme zeigte sich 1999 mit dem Einsatz von Kapillarblockbahnen (KBB), durch welche die Kapillarblockschicht ersetzt wird (VON DER HUDE ET AL. 1999). Die KBB wurde erstmals auf einem von mehreren Kapillarsperrentestfeldern auf der Deponie Breiner Moor (Leer/Schleswig-Holstein) eingesetzt und zeigte eine sehr gute Wirksamkeit (VON DER HUDE ET AL. 1999).

Auf der Deponie am Lemberg (Stuttgart/Baden-Württemberg) kam die KBB zum großflächigen Einsatz. Nach WOHNLICH (2003) wurde das Plateau der Deponie mit einer Kapillarsperre oberflächenabgedichtet. Durch eine dachartige Profilierung mit der Ausbildung mehrerer Spitzen über das Plateau verteilt, konnte der laterale Wasserabfluss und somit die Funktion der Kapillarsperre sichergestellt werden (WOHNLICH 2003).

Auch auf der Deponie Deetz (Brandenburg), wo seit 2003 in einem umfangreichen Versuchsprogramm mit neun angelegten Testfeldern die Wirksamkeit innovativer Deponieoberflächenabdichtungssysteme untersucht wird, ist ein Feld neben einer konventionellen Kapillarsperre mit KBB bestückt (BRÜCKLMEIER ET AL. 2003).

3.3.2 Kipprinnenversuche

Im Leitfaden zur Deponiestilllegung (PALM ET AL. 2003) sowie im Entwurf der GDA-Empfehlung zur Kapillarsperre (GARTUNG & NEFF 2000, VON DER HUDE ET AL. 1999) wird die Notwendigkeit beschrieben, vor dem Bau eines großmaßstäbigen Testfelds die Eignung einer Kapillarsperrenkombination als Deponieoberflächenabdichtung in einer Großkipprinne zu überprüfen. WOHNLICH schlägt im Rahmen eines Parameterkatalogs zur Vorgehensweise bei der Prüfung von Kapillarsperrenmaterialien auch einen Großrinnenversuch vor (WOHNLICH & BAUER 1999, WOHNLICH ET AL. 2000). Die Kipprinne sollte nach von der HUDE ET AL. (1999) mindestens 5 m lang sein.

Diese Vorgabe hat sich im Laufe der Jahre der Kapillarsperrenforschung als ein geeignetes Instrument entwickelt, die laterale Dränkapazität der Materialkombinationen zu ermitteln. International wurden zunächst kleinere Container für die Laborversuche verwandt. MIYAZAKIS (1988) führte seine Laborversuche an einer Versuchsaapparatur mit 0,2 m Breite und 1,6 m Länge bei 15° Neigung durch. O'DONNELL ET AL. (1994) hingegen testeten ihre Kapillarsperrenmaterialien in einer 6,4 m langen und etwa 0,2 m breiten Rinne.

Die Untersuchungen an Kipprinnen in Deutschland begannen mit WOHNLICH (1991). Er untersuchte verschiedene Materialkombinationen in einem neigbaren Glaskanal, der allerdings nur eine Länge von 1,2 m einnahm.

Auch MELCHIOR begann 1987 zunächst mit Labortests mit Hilfe einer 0,2 m breiten und 1 m langen Kipprinne, bevor 1993 am Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg eine Großkipprinne mit 10 m Länge und 0,5 m Breite gebaut wurde (MELCHIOR ET AL. 1996). STEINERT (1999) führte in seiner Dissertation vergleichende Untersuchungen mit Kipprinnen unterschiedlicher Längen (0,5 m, 1 m und 10 m) durch. Er stellte fest, dass die laterale Dränkapazität der gleichen Materialkombination im Vergleich zu den Ergebnissen der 10 m-Rinne, in der 0,5 m-Rinne unter- und in der 1 m-Rinne überschätzt wird und somit nicht übertragbar ist (STEINERT 1999). STEINERT ET AL. (1996) und STEINERT (1999) führten des Weiteren ausführliche Kipprinnenversuche durch, die zu einem besseren Verständnis der hydraulischen Vorgänge in Kapillarsperren führten.

Das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU-Darmstadt kann ebenfalls auf eine langjährige Erfahrung der Kapillarsperrenforschung mit zwei 8 m langen und 0,2 m breiten Kipprinnen zurückblicken. Seit 1990 wurden zahlreiche Untersu-

chungen zu Fragen der Baupraxis, der Leistungsfähigkeit bzw. der Funktion der Kapillarsperre sowie bezüglich der Wechselwirkungen zwischen Kapillarschicht und Kapillarblock durchgeführt (HOLFELDER 2002, KÄMPF 2000, VON DER HUDE ET AL. 1994, VON DER HUDE 1999). KÄMPF ET AL. (1999) führten ausführliche Untersuchungen bezüglich der Eignung von industriellen Reststoffen im Dichtungssystem Kapillarsperre durch. Während vergleichsweise wenige Reststoffe als Kapillarschichtmaterial geeignet waren, wiesen recht viele der untersuchten Materialien die Eignung für den Einsatz als Kapillarblockmaterial auf (KÄMPF ET AL. 1999).

WOHNLICH ET AL. (1996) und BAUER (2001) nutzten Versuchstanks mit 1,5 m Länge und 0,5 m Breite. Sie untersuchten, ob mögliche Inhaltsstoffe im Niederschlagswasser, wie z. B. Huminstoffe, Düngemittel und Tenside, einen Einfluss auf die Kapillarsperrenwirkung ausüben bzw. ob sich Reststoffe als Kapillarsperrenmaterialien eignen. Die ungünstigen Ergebnisse der Tankversuche mit einer Materialkombination aus Edelbrechsand und Elektroofenschlacke sowie einer Materialkombination aus Residualsanden der Schwerspatindustrie und Frostschutzkies können primär auf die für Kapillarsperren ungünstigen Korngrößenverteilungen der Materialien zurückgeführt werden (BAUER 2001).

WOHNLICH und BARTH etablierten schließlich 1998 eine 6 m lange und 0,6 m breite Versuchsrinne am Institut für Hydrogeologie der Universität München, in der BARTH (2003) die Eignungsprüfungen für die Kapillarsperrenmaterialien durchführte, die auf dem Probefeld der Deponie Heinersgrund zum Einsatz kamen.

Seit 2003 werden auch an der Hochschule Bremen Kapillarsperren unter Einsatz von Baustoffrecyclaten getestet. Für die Untersuchung der lateralen Dränkapazität steht eine 7,2 m lange und 0,5 m breite Kipprinne zur Verfügung. Es konnte eine grundsätzliche Eignung von Betonbruch als Kapillarblockmaterial nachgewiesen werden (HARDER 2003).

3.3.3 Modellierung von Kapillarsperren

Im Laufe der Kapillarsperrenforschung bzw. mit der steigenden Anerkennung von Kapillarsperrensystemen als Deponieoberflächenabdichtung hat auch die Bedeutung stark zugenommen, diese Systeme in Modellen nachzustellen und deren Leistungsfähigkeit durch Simulation der Wasserflüsse zu berechnen (MIYAZAKI 1993, STEENHUIS ET AL. 1991, STEINERT 1999, TAMI ET AL. 2004, VON DER HUDE 1999). Das Ziel liegt zum einen darin, die Kapillarsperre und ihre Wirkungsweise besser zu verstehen und zum anderen, mit nur wenig Aufwand, eventuell auch unter Verzicht auf Kipprinnenversuche geeignete Materialkombinationen und ihre Leistungsfähigkeit zu ermitteln (STEINERT ET AL. 1996).

Die entwickelten Modelle basieren auf unterschiedlichen physikalischen Ansätzen (STEINERT ET AL. 1996). KUNG (1990) und WOHNLICH (1990, 1991) beschreiben den

setzen.

Mit steigender Rechnerleistung wurden in den vergangenen Jahren auf Grundlage der RICHARDS-Gleichung zwei- und dreidimensionale Simulationsmodelle entwickelt, wie z. B. von GREGERSEN ET AL. (1991), GREGERSEN (1995), KHIRE ET AL. (1997, 1999, 2000), OLDENBURG UND PRUESS (1993), TAMI ET AL. (2004), YEH ET AL. (1994). Die Parametrisierung der numerischen Modelle erfolgte dabei nach VAN-GENUCHTEN (1980) oder nach BROOKS & COREY (1964). Hillflow2 (BRONSTERT ET AL. 1996, BRONSTERT 1994) wurde von ZISCHAK (1997) mit einem mathematisch numerischen Modell von HOLBAN (1997) verglichen, wobei letzteres die Messergebnisse aus dem Feldversuch besser wiedergab. MORRIS & STORMONT (1996, 1997, 1998) entwickelten mit mäßigem Erfolg das Finite-Differenzen-Modell TRACER3D. HO & WEBB 1998 kombinierten den Ansatz von ROSS mit Wassergehalts-Wasserspannungsbeziehung von VAN GENUCHTEN (1980) mit Hilfe des Finite-Differenzen-Modells Tough2. Sie verglichen mit ihrem Modell homo- bzw. heterogene Kapillarschichten und den Einfluss von Iso- und Anisotropie an der Schichtgrenze. BARTH (2003) nutzte das Finite-Elemente-Modell Feflow 5.0 (DIERSCH 2002).

Während BERGER (in STEINERT ET AL. 1996) bei der Simulation von Rinnenversuchen mit SWMS_2D (Version 1.1, SIMUNEK ET AL. 1992) eine deutliche Überschätzung der lateralen Dränkapazität beobachtet, beschreibt KÄMPF (2000) für Kipprinnenversuche eine hohe Genauigkeit der Ergebnisse der Dränkapazität aus der Simulation mit HYDRUS-2D. HYDRUS-2D baut auf SWMS_2D als Rechenkern auf. Als Vergleichsgrundlage diente BERGER (in STEINERT ET AL. 1996) ein Kipprinnenversuch mit einer Kapillarsperrenkombination aus Mittelsand der Körnung 0-1 mm und einem Kapillarblock der Körnung 1-3 mm. Die Materialkombination, die KÄMPF zur Parameteridentifizierung nutzte, bestand aus einem Rheinsediment 0-1 mm als Kapillarschichtmaterial und einem Edelbrechsand 0,7-2 mm als Kapillarblock. Der Einsatz dieser Kombination erfolgte auch auf dem Marburger Probefeld, so dass diese Daten in die Modellierung einfließen konnten.

Mit der Simulation von Ergebnissen aus Testfeldern und Versuchsrinnen kristallisierte sich die Problematik heraus, die Komplexität der in Kapillarsperren vorhandenen Wechselwirkungen nachzustellen. Von immenser Bedeutung sind in dem Zusammenhang die Ermittlung repräsentativer Parameter der hydraulischen Eigenschaften der Kapillarsperrenmaterialien, da sie eine hohe Sensitivität gegenüber der berechneten lateralen Dränkapazität aufweisen (GREGERSEN 1995, BRONSTERT ET AL. 1996, MORRIS & STORMONT 1997, HOLBAN 1997, BARTH 2003, BERGER IN STEINERT ET AL. 1997, KÄMPF 2000). BARTH (2003) gibt zu bedenken, dass schon geringe Fehleinschätzungen der Parameter der Kapillarsperrenmaterialien zu erheblichen Fehlprognosen führen können.

Grundsätzlich gilt bei jedem Simulationsmodell, dass die zugrundeliegenden An-

nahmen erfüllt bleiben. Die RICHARDS-Gleichung unter Verwendung der DARCY-Gleichung setzt voraus, dass laminares Fließen stattfindet (vgl. Kap. 3.1.5), was allerdings bei geschichteten Systemen wie einer Kapillarsperre zu hinterfragen ist, bei dem präferenzielle Fließvorgänge wie fingering-flow beobachtet wurde. Streng genommen ist die numerische Simulation mit den aktuellen Modellen nur für die Kapillarschicht bis zum Zeitpunkt des Kapillardurchbruchs möglich. Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich allerdings mit der Koppelung des DARCY-Flusses mit Prozessen des Makroporenflusses (ELIASSI & GLASS 2001, VOGEL ET AL. 2005).

4 Material und Methoden

4.1 Untersuchungsmaterialien

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden 8 Sande und 4 Kiese auf ihre Eignung als Kapillarschicht- bzw. Kapillarblockmaterial untersucht. Bei der Vorauswahl der Materialien wurde zunächst eine grobe petrographische Ansprache durchgeführt, indem das Material augenscheinlich auf Kornform, Beschaffenheit der Oberfläche, organische Anteile und Kornstabilität überprüft wurde, um es bei vorläufiger Eignung den entscheidenden chemischen und physikalischen Untersuchungen zu unterziehen.

Die untersuchten Bauschutt-Materialien stammen von der Bauschutt-Recyclinganlage der Fa. Brück/Reiskirchen-Burkhardsfelden. Auf der Recyclinganlage wird das angelieferte Bauschuttmaterial klassifiziert, gesiebt, von Metallen befreit und sortiert gelagert, so dass eine hohe Qualität der aufbereiteten Bauschuttabfälle gewährleistet werden kann. Des Weiteren ist auf der Bauschutt-Recyclinganlage eine Misanlage im Einsatz, die eine korngößenspezifische, nachfrageorientierte Produktherstellung ermöglicht.

Nach den Kriterien der Vorauswahl wurden 7 Recyclingmaterialien (4 Sande, 3 Kiese) ausgesucht, die sich in ihrer Zusammensetzung und Korngrößenverteilung unterscheiden: Es handelt sich einerseits um Material, welches ausschließlich aus Beton, Asphalt und Naturstein besteht und im Folgenden als Qualitätsmaterial bezeichnet wird. Dieses Material ist ebenfalls im Straßenbau einsetzbar. Andererseits wurden Materialien untersucht, deren Zusammensetzung ein breiteres Spektrum umfassen (zusätzliche Inhaltsstoffe z. B. Mauerwerk, Ziegel, Steinzeug).

Für vergleichende Untersuchungen wurden des Weiteren 5 Naturmaterialien verschiedener Herkunft der oben beschriebenen petrographischen Ansprache unterzogen, die sich dem ersten Eindruck nach für eine Kapillarsperrenkombination auch in Verbindung mit dem Recyclingmaterial eignen konnten.

Tabelle 4.1: Untersuchungsmaterialien

	Kapillarschichtmaterial (KS)	Kapillarblockmaterial (KB)
Recyclingmaterial (R)	R-KS-0/3	R-KB-2/11
	R-KS-Q-0/3	R-KB-Q-2/8
	R-KS-0,71/2	R-KB-5/22
	R-KS-Q-0/2	
Naturmaterial (N)	N-KS-0/1-(Rhein/Main)	N-KB-2/5-(Brandenburg)
	N-KS-0/2-(Rhein/Main)	
	N-KS-0/2-(Ems)	

Der Tabelle 2.1 können die untersuchten Materialien und deren Bezeichnung entnommen werden. Die Abkürzungen stehen für:

1. Naturmaterial (**N**) oder für Bauschutt-Recyclingmaterial (**R**)
2. die mögliche Verwendung in der Kapillarschicht (**KS**) oder im Kapillarblock (**KB**)
3. die Materialzusammensetzung (**Q – Qualitätsmaterial**) und
4. die Korngrößenbereiche (**z. B. 0/3 für 0 bis 3 mm Korndurchmesser**).

Bei den Naturmaterialien wurde zusätzlich die Herkunft ergänzt.

4.2 Untersuchungsmethoden

4.2.1 Materialcharakterisierung

Die Einsatzmöglichkeit von Naturmaterialien als auch von mineralischen Reststoffen in einer Kapillarsperre hängt in großem Maße von den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Materialien ab.

Tabelle 4.2: Untersuchungskatalog zur Eignungsfeststellung von Kapillarsperrenmaterialien (nach WOHLNICH & BAUER 1999, ergänzt)

Parameter	Vorauswahl	Optimierung
Physikalische Parameter		
Bestimmung der Korndichte (DIN 18124)	♦	
Kornform (DIN EN 933)	♦	
Korngrößenverteilung (DIN 18123)	♦	
Ungleichförmigkeitszahl	♦	
Berechnung der Filterstabilität (TERZAGHI)	♦	
Untersuchung der Filterstabilität in Säulenversuchen		♦
gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f)	♦	
ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_v)	♦	
Wasserspannungs-Wassergehalts-Beziehung	♦	
Berechnung des Lufteintrittswertes	♦	
Lockerste und dichteste Lagerung (DIN 18126)		♦
Kornzertrümmerungsversuch	♦	
Wasseraufnahmefähigkeit (DIN EN 1097-6)	♦	
Chemische Stabilität		
Eluat nach DEV S-4	♦	
Spezielle Elutionsverfahren		♦
Carbonatgehalt	♦	
Glühverlust	♦	
Sonstige Parameter		
Herkunft	♦	
Mengenmäßige Verfügbarkeit	♦	
Transportentfernung	♦	

In Tabelle 4.2 sind in Anlehnung an den Entwurf der GDA-Empfehlungen - Geotechnik der Deponien und Altlasten der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) – für Kapillarsperren bzw. den Leitfaden für Deponiestilllegung des DVWK-ATVs die Parameter aufgelistet, die sich anhand der bisherigen Forschung als geeignete Einflussgrößen des Nachweises für Funktion und Leistungsfähigkeit der Kapillarsperre herauskristallisiert haben (PALM ET AL. 2003, BAUER 2000, GARTUNG & NEFF 2000, WOHLICH & BAUER 1999).

Wenn die Eignung für den Einsatz als Kapillarsperrenmaterialien schon anhand einer oder mehrerer chemischer und/oder physikalischer Materialeigenschaften ausgeschlossen werden musste, wurde auf die Untersuchung weiterer Parameter verzichtet.

4.2.1.1 Physikalische Parameter

Bestimmung der Korndichte (DIN 18124)

Die Dichte der Festsubstanz wurde nach DIN 18124 mit Hilfe von Pyknometern bestimmt. Kapillarpyknometer dürfen bei Korngrößen bis maximal 5 mm eingesetzt werden und wurden für die Bestimmung der Korndichte des Kapillarschichtsandes verwendet. Die Dichten größerer Materialien bis etwa 10 mm, wie das Kapillarblockmaterial, wurden mittels sogenannter Weithalspyknometer ermittelt.

Kornform (DIN EN 933)

Zur Vermeidung eines Platten- oder Imbrikationsgefüges im Kapillarsperrensystem und zur Herstellung eines idealen Porensystems, sollte auf gerundete bis gut gerundete Einzelkörner geachtet werden. Zu diesem Zweck wurden nach DIN EN 933-4 Proben der jeweiligen Kapillarsperrenmaterialien mit einem Kornform-Meßschieber nach dem Verhältnis ihrer Kornlänge L zu ihrer Korndicke E untersucht. Körner mit einem Verhältnis von $L/E > 3$ werden als nicht-kubisch bezeichnet. Der Massenanteil in Prozent dieser nicht-kubischen Körner, bezogen auf die gesamte Trockenmasse der untersuchten Körner, wird berechnet und als Kornformkennzahl angegeben. Je kleiner die ermittelte Kornformkennzahl ist, desto größer ist der Anteil der gut gerundeten bzw. kubischen Körner in der jeweiligen Probe.

Bestimmung der Kornverteilung (DIN 18123)

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung wurde nach DIN 18123 durchgeführt. Für den Kapillarschichtsand wurde eine Nasssiebung und für das Kapillarblockmaterial eine Trockensiebung angewandt.

Die Analysen wurden mit Metalldrahtgewebesieben und den entsprechenden Analysensiebmaschinen nach DIN ISO 3310-1 (Fa. Retsch, Haan) durchgeführt (Tab 4.3).

Tabelle 4.3: Maschenweiten der Siebe zur Bestimmung der Korngrößenverteilung

Siebmaschenweiten in mm	
für Kapillarschichtmaterial	für Kapillarblockmaterial
4	16
3	11,2
2	8
1	5
0,8	4
0,5	2
0,25	0,71
0,125	0,125
0,1	
0,063	

Ungleichförmigkeit

Die Ungleichförmigkeit ist ein Maß für die Beurteilung der Körnungssummenkurven. Sie steht für die mittlere Neigung der Körnungslinie. Es sollte sowohl bei dem Kapillarschichtmaterial als auch bei dem Kapillarblockmaterial eine steile Summenkurve vorliegen. Je größer die Steilheit einer Körnungssummenkurve ist, desto kleiner ist die Ungleichförmigkeitszahl. Diese ergibt sich aus dem Quotienten: Korndurchmesser des Siebdurchgangs bei 60 % geteilt durch den Korndurchmesser des Siebdurchgangs bei 10 % (Formel 4.1). Die Werte werden grafisch aus den Kornsummenkurven ermittelt.

Ungleichförmigkeit:
$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \leq 3 \quad (\text{Formel 4.1})$$

d_{60} = Korndurchmesser des Siebdurchgangs bei 60% [mm]

d_{10} = Korndurchmesser des Siebdurchgangs bei 10% [mm]

Filterstabilität

Die Materialien einer Kapillarsperre müssen filterstabil zueinander sein. Dadurch kann sichergestellt werden, dass keine feineren Partikel aus der Kapillarschicht in die größeren Poren des Kapillarblocks verlagert werden. Durch Suffosion oder Kolmation könnte ansonsten die Funktion der Kapillarsperre, beruhend auf dem Porensprung, außer Kraft gesetzt werden. Für eine erste Bemessung der Filterstabilität von Kapillarsperrenmaterial hat sich die Filterregel nach TERZAGHI bewährt (STEINERT ET AL. 1996, KÄMPF ET AL. 1999, BAUER 2001; VON DER HUDE 2000) und wurde auf die zu untersuchenden Materialkombinationen angewandt. Diese Regel beruht auf einer Vorgabe, die sich wie bei der Ungleichförmigkeit auf die grafische

Bestimmung entsprechender Korndurchmesser bei definierten Siebdurchgängen bezieht (Formel 4.2):

Filterstabilität:
$$F = \frac{d_{15}^{KB}}{d_{85}^{KS}} \leq 4 \quad (\text{Formel 4.2})$$

d_{15}^{KB} = Korndurchmesser des Siebdurchgangs KB-Material bei 15% [mm]

d_{85}^{KS} = Korndurchmesser des Siebdurchgangs KS-Material bei 85% [mm]

Die Filterregel nach TERZAGHI bezieht sich nur auf die geometrische Filterstabilität in der Kontaktzone zwischen fein- und grobkörnigen Schichten. Die Gültigkeit der Filterregel kann laut SMOLTZYK (1996) und PRINZ (1997) nur bei Materialien mit kleinen Ungleichförmigkeiten von $U < 2$ gewährleistet werden. In Grenzfällen ist es empfehlenswert, die Filterstabilität in Säulenversuchen zu überprüfen. Der Versuchsaufbau zur Durchführung der Filterstabilitätsuntersuchungen ist in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt.

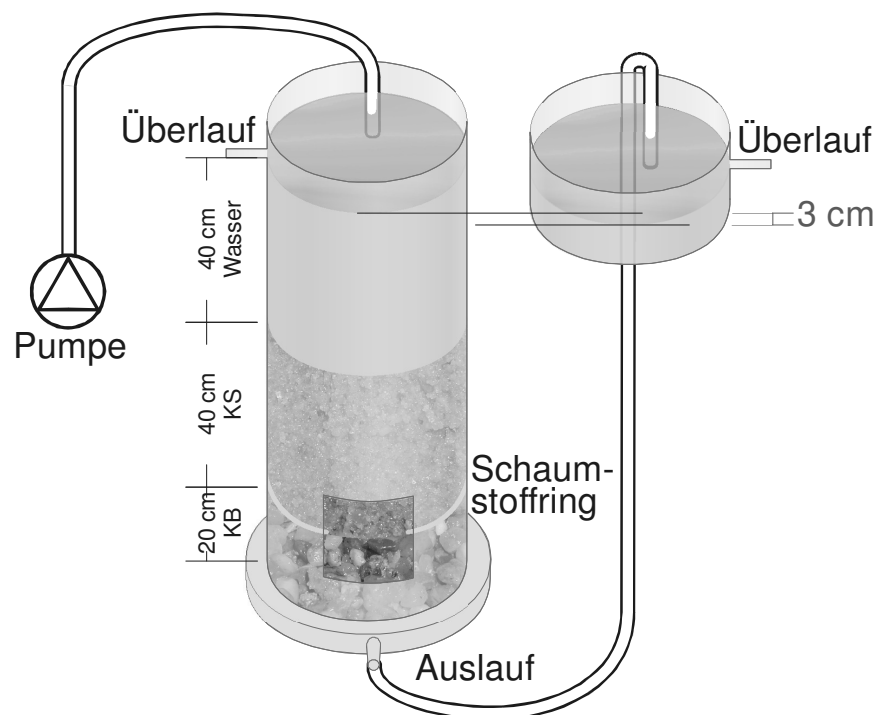


Abbildung 4.1: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Filterstabilität

Es handelt sich dabei um eine 110 cm hohe Plexiglasröhre, die auf der Höhe von 60 cm teilbar ist, um eine problemlose Befüllung garantieren zu können. Am Fuß befindet sich ein Kunststoffsockel, der mit einem Lochblech ausgelegt ist. Damit wird sowohl der freie Wasserabfluss als auch eine gleichmäßige Aufsättigung von unten nach oben erreicht. Durch die gleichmäßige Aufsättigung sollen Lufteinschlüsse weitestgehend verhindert werden. Bei diesem Versuch werden die Materialien in den Mächtigkeiten eingebaut, wie sie auch auf der Deponie für den Kapillarsperrenein-

satz Verwendung finden sollen (Kapillarblockmaterial 20 cm, Kapillarschicht 40 cm). Zur Reduzierung von Randeffekten wurde an der Grenzfläche zwischen KB- und KS-Material an der Wand der Plexiglasröhre eine 1 cm starke Schaumstoffauskleidung angebracht.

Nachdem das Material aufgesättigt und 40 cm überstaut wurde, wird ein Gradient von ca. 3 cm angelegt, wobei das Wasser etwa 5 Stunden durch das gesamte System frei abfließt. Anschließend kann ein an der Grenzfläche gelegenes Fenster (10 x 12 cm) entfernt werden, um eventuelle Suffosionserscheinungen optisch zu erfassen (Abbildung 4.2). Dazu werden vorsichtig einige Zentimeter der Materialien in die Tiefe der Grenzschicht gehend entfernt und bildlich festgehalten. Es sollte sich eine eindeutige und exakte Schichtgrenze ohne Verlagerungen des feineren Materials der Kapillarschicht in den Kapillarblock zeigen.

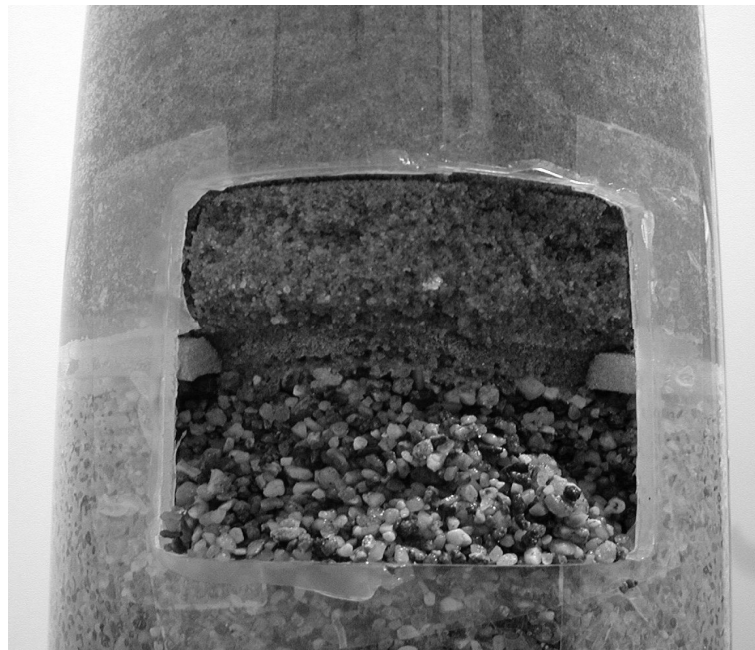


Abbildung 4.2: Fensterausschnitt der Versuchssäule zum Nachweis der Filterstabilität nach Ende einer fünfstündigen Durchströmung

Zur weiteren Kontrolle wurde ein parallel laufender Säulenversuch durchgeführt, bei dem die Randbedingungen zu dem oben beschriebenen Versuch identisch waren. Nach dem Wasserdurchfluss wurde das Kapillarschichtmaterial vorsichtig bis zur Schichtgrenze abgetragen, um ab der Höhe von 20 cm das Kapillarblockmaterial schichtweise in 1 bis 2 cm Mächtigkeiten der Plexiglasröhre zu entnehmen. Das Material der jeweiligen Schicht wurde auf einem Sieb mit der Maschenweite von 2 mm nass abgesiebt, um es von allen Feinteilen zu befreien. Dieser Kornanteil mit dem Durchmesser unter 2 mm wurde mit dem der vorangegangenen Korngrößenanalyse in Relation gesetzt. Wenn diese Fraktionsanteile gut übereinstimmten, ergab sich eine Bestätigung der Filterstabilität der ausgewählten Materialien zueinander.

Gesättigte Wasserleitfähigkeit (DIN 18130)

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) wurde mit der Haubenpermeameter-Methode nach HARTGE (1966) an 250 cm³ großen Stechzylindern nach den Vorgaben der DIN 18130 ermittelt (Formel 4.3):

gesättigte Wasserleitfähigkeit:
$$k_f = \frac{V \cdot L}{t \cdot A \cdot h} \quad (\text{Formel 4.3})$$

k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit	[cm*s ⁻¹]	V = perkolierendes Wasservolumen	[cm ³]
L = Länge der Fließstrecke	[cm]	t = Zeit in der das Volumen V perkoliert	[s]
A = Fließquerschnitt	[cm ²]	h = Druckhöhengradient	[cm]

Fließquerschnitt und Fließstrecke werden von den Maßen der Stechzylinder vorgegeben. Die Zeit, in der das Wasser die Probe durchfließen sollte, wurde festgesetzt. Das Wasservolumen wurde mittels einer Waage bestimmt. Die TASI (1993) sieht bei der Untersuchung von mineralischen Dichtungen einen Gradienten von 30 cm vor. Bei den Sanden wurde sowohl ein Gradient von 2 cm als auch von 20 cm eingestellt, um die Werte anschließend zu vergleichen. Die k_f -Werte der Kapillarblockkiese wurden lediglich mit dem geringeren Gradienten von 2 cm gemessen. Größere Gradienten wurden nicht gewählt, da aufgrund der groben Porosität und der hohen Wasserleitfähigkeit der laminare Fluss des Wassers in der Probe, der als Voraussetzung für die DARCY-Gleichung gilt, nicht mehr gewährleistet werden kann.

Des Weiteren wurde die gesättigte Wasserleitfähigkeit in m*sec⁻¹ über Näherungsgleichungen aus den Korngrößenverteilungen sowohl

nach HAZEN (1895 in Hartge & Horn 1999):
$$k_f = 0,0116 \cdot d_{10}^2 \quad (\text{Formel 4.4})$$

als auch

nach BEYER (1964):
$$k_f = C \cdot d_{10}^2 \quad (\text{Formel 4.5})$$

berechnet.

Für beide Berechnungswege gilt, dass sie nur bei nicht bindigen Materialien angewandt werden dürfen. Für die Gleichung nach HAZEN (1895 in Hartge & Horn 1999) ist ein Ungleichförmigkeitsgrad < 5 Voraussetzung.

Die Bestimmung von C für die Berechnung nach BEYER (1964) erfolgte anhand Tabelle 4.4. C ist eine Funktion des Ungleichförmigkeitsgrads (U) der Körnung.

Die Bestrebungen, den k_f -Wert zu berechnen, resultierten aus den Schwierigkeiten, die grobkörnigen Proben störungsfrei zu messen und die Randbedingungen des

laminaren Fließens einzuhalten. Bei Materialien, die in einer Einzelkornstruktur vorliegen und gut gerundet sind, konnten sich diese Gleichungen insbesondere im bautechnischen Bereich durchsetzen (HARTGE & HORN 1999).

Tabelle 4.4: Bestimmung von C (BEYER 1964)

U	C	C Mittelwert
1-1,9	0,012-0,0105	0,0110
2-2,9	0,0105-0,0095	0,0100
3-4,9	0,0095-0,0085	0,0090
5-9,9	0,0085-0,0075	0,0080
10-19,9	0,0075-0,0065	0,0070
>20	0,0065	0,0065

Ungesättigte Wasserleitfähigkeit

Die ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u) wurde mit Hilfe der Daten der Wasserretentionskurve und der gesättigten Wasserleitfähigkeit der Materialien mit dem Programm RETC berechnet. Dieses Programm beruht auf dem VAN-GENUCHTEN-MUALEM-Modell (VAN GENUCHTEN 1980) (vgl. Kapitel 3.1.5).

Wasserspannungs-Wassergehalts-Beziehung

Zur Bestimmung der Wasserspannungskurven wurde das Überdruckverfahren nach RICHARDS & FIREMAN (1943) angewandt. Die Proben wurden in 250 cm³ Stechzylinder eingebaut, aufgesättigt und anschließend auf keramischen Platten in Drucktöpfen stufenweise mit zunehmenden Drücken entwässert.

Die Retentionsbeziehung wurde lediglich im Bereich von 0 hPa bis 100 hPa untersucht, da in Kapillarsperren diesem Matrixpotenzialbereich die größte Bedeutung zukommt (STEINERT 1999). Es wurden die Porenanteile bei 5 hPa, 10 hPa, 15 hPa, 20 hPa, 25 hPa, 40 hPa, 60 hPa, 80 hPa und 100 hPa ermittelt.

Lufttrittswert

Mit den Wasserspannungs-Wassergehalts-Beziehungen ist es ebenfalls möglich, den Lufttrittswert zu ermitteln. HILLEL (1998) definiert den Lufttrittswert als den Wert der ansteigenden Saugspannung, bei der, bei vorheriger Sättigung, erstmalig die größte Pore entleert wird.

Nach dem VAN-GENUCHTEN-Modell steht der Lufttrittswert im reziproken Verhältnis zu dem Parameter α [$1 \cdot \text{cm}^{-1}$]. Der aus der Retentionsbeziehung grafisch ermittelte Lufttrittswert konnte mittels RETC genau an die Kurve angepasst werden.

Lockerste und dichteste Lagerung (DIN 18 126) - Verdichtungsfähigkeit

Die Untersuchung der lockersten und dichtesten Lagerung dient zur Beurteilung der Verdichtungsfähigkeit und kann nur bei nichtbindigen Böden angewandt werden.

Dazu wurde nach den Vorgaben der DIN 18 126 ein Versuchszylinder mit einem Durchmesser von 71 mm eingesetzt. Die Größe des Versuchszylinders ist abhängig vom Durchmesser des Größtkorns und der Ungleichförmigkeit des Materials.

Zunächst wurde die lockerste Lagerung $\min \rho_d$ über das vorsichtige Einfüllen des Materials in den Zylinder mit Hilfe eines Trichters in 3 Wiederholungen festgestellt und die Lagerungsdichte errechnet.

Mit dem Material der letzten Wiederholung zur Untersuchung der lockersten Lagerung erfolgte die Bestimmung der dichtesten Lagerung $\max \rho_d$ mittels des Schlaggaberversuchs.

Kornzertrümmerungsversuch

Dieser Versuch liefert Erkenntnisse über die Kornfestigkeit der Gesteinskörnungen bei definierter mechanischer Belastung. Das durchgeführte Untersuchungsverfahren, basierend auf den Randbedingungen des Proctorversuches (DIN 18127), richtet sich nach QUENZLER (PRÜHS ET AL. 1996), der den Kornzertrümmerungsversuch in dieser Form im Deponiebereich für Dränmaterialien etabliert hat. QUENZLER setzte den Kornzertrümmerungsgrad bei baustellentypischer mechanischer Belastung auf der Deponie mit der im Labor in Beziehung. Nach KÄMPF ET AL. (1999) sind 48 Schläge im Rahmen des Kornzertrümmerungsversuchs für die Belastungen, die auf Kapillarsperrensysteme wirken, repräsentativ.

Bei diesem Parameter sind bis zu 6 Einzelversuche mit unterschiedlichen Schlagzahlen (6, 12, 24, 48, 96, 192) durchzuführen, wozu die Geräte des Proctorversuchs eingesetzt werden. Das Material wird in einer Mächtigkeit von mindestens dem 4-fachen Durchmesser des Größtkorns in den Zylinder eingefüllt. Nach der Verdichtung wird für jeden Einzelversuch sowohl die Trockendichte berechnet als auch der Kornzertrümmerungsgrad mittels Trockensiebung bestimmt. Die ermittelten Werte für den Kornzertrümmerungsgrad werden in Abhängigkeit der Schlagzahl dargestellt und mit Referenzkurven verglichen.

Nach der Belastung darf der Feinkornanteil von $< 0,125$ mm des Kapillarschichtmaterials nicht mehr als 3 Masse-% zugenommen haben und das Kapillarschichtmaterial sollte insgesamt nicht mehr als 4 Masse-% der Fraktion kleiner 0,5 mm beinhalten, bis zu 8 Masse-% sind aber noch tolerierbar (KÄMPF ET AL. 1999).

Dieser Parameter wurde vorrangig beim Bauschutt-Recycling-Material untersucht, da aufgrund der zusammengesetzten Materialien eine Instabilität vorhanden sein

kann. Das Kapillarschichtmaterial wurde auf 0,2 mm und das Kapillarblockmaterial wurde auf 0,71 mm abgesiebt.

Wasseraufnahmefähigkeit

Die Wasseraufnahmefähigkeit entspricht nach DIN EN 1097-6 der Massenzunahme einer ofentrockenen Gesteinskörnung infolge Eindringens von Wasser in zugängliche Hohlräume. Die Wasseraufnahmefähigkeit ist vor allem dann von großer Bedeutung, wenn mit einer Eigenporosität des Materials zu rechnen ist, aufgrund welcher ein Wasserübertritt in den Kapillarblock erfolgen kann.

Zur Bestimmung der Wasseraufnahme als Anteil der Trockenmasse in Prozent wurden die Materialien (1000 g des jeweiligen Kapillarblockmaterials und 250 g des jeweiligen Kapillarschichtmaterials) in ein Wasserbad mit der Temperatur von 22 ± 1 °C eingeweicht. Nach 24 Stunden wurde das Wasser abgegossen und die Materialien mit Hilfe eines Tuchs oder eines Gebläses bis zur Oberflächentrockenheit gebracht. Mit einer anschließenden Wiegung konnte das Gewicht der Wasseraufnahme in Bezug zur Trockenmasse gesetzt werden.

4.2.1.2 Chemische Parameter

Elution nach DEV S4

Durch Elutionstests soll das Auslaugverhalten von Materialien dargestellt werden. Beim angewandten Elutionstest nach DEV S4 bzw. DIN 38414 Teil 4 wurden die Materialproben 24 Stunden in destilliertem Wasser langsam über Kopf geschüttelt. In 1 l-PE-Flaschen wurde jeweils 50 g der Probe eingewogen und mit 500 ml Wasser aufgefüllt. Damit sind die Mengenangaben des Verfahrens verändert - das geforderte Verhältnis von 1:10 wurde jedoch eingehalten.

Spezielles Elutionsverfahren

Zusätzlich wurde ein „Langzeitschüttelversuch“ als spezielles Elutionsverfahren durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden Proben des Bauschutt-Materials in destilliertem Wasser im Verhältnis 1:10 ein bis sieben Tage lang geschüttelt, um das Auslaugverhalten der Materialien in Abhängigkeit der Zeit zu untersuchen.

Extraktion der Festsubstanz

Die Konzentration an Spurenelementen der Festsubstanz wurde nach DIN ISO 11466 mit Königswasser durchgeführt.

Die getrockneten Proben wurden mit einer Kugelmühle (Typ S 1000 Fa. Retsch, Haan) auf Korngrößen $< 150 \mu\text{m}$ gemahlen, um anschließend als Teilprobe von 3-5 g in das Reaktionsgefäß eingewogen zu werden.

Analytik

Die Messungen der Anionen der Proben aus den Elutionsverfahren wurden mit dem Ionenchromatographen DX-120 der Firma Dionex (Idstein) durchgeführt. Vor der Analyse wurden die Proben auf $0,45 \mu\text{m}$ mit Hilfe eines Spritzenfilters aus Polypropylen (Whatman, Brentford) abfiltriert. Mit einer Flussrate von $1,2 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ und einem Eluenten aus Na_2CO_3 und NaHCO_3 (im Verhältnis 3,5:1) wurden $50 \mu\text{l}$ der Probe zunächst über die Vorsäule des Typs AG 14 geleitet, anschließend über die Trennsäule des Typs AS14 getrennt und im Detektor gemessen.

Tabelle 4.5: Analyseverfahren zur Bestimmung der Anionen mit Bestimmungsgrenze unter Berücksichtigung des Aufschlussverfahrens

Parameter	Analyseverfahren/Gerät	Bestimmungsgrenze	
		Eluate DEV-S4	spezielle Eluate
Cl^- SO_4^{2-}	Ionenchromatographie/IC von Dionex mit AS14 Säule	0,5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	

Tabelle 4.6: Analyseverfahren zur Bestimmung der Spurenelemente mit Bestimmungsgrenzen unter Berücksichtigung des Aufschlussverfahrens

Parameter	Analyseverfahren/Gerät	Bestimmungsgrenze		
		Königswasser-extrakte	Eluate DEV-S4	spezielle Eluate
As	ICP-MS	1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0,025 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0,0064 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
Pb		0,1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0,0005 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0,0007 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
Cd		0,1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0,0025 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0,0028 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
Cr		0,1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0,0025 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0,0021 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
Cu		0,1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0,0005 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0,0006 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
Ni		0,1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0,0025 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0,0006 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
Hg		-	0,001 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0,001 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
Zn		1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0,005 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0,0013 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
Tl		0,1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	-	-

Die Bestimmung der Gehalte an Schwer- bzw. Halbmetallen (Arsen) erfolgte über den ICP-MS Ultra Mass von Varian (Darmstadt). Sowohl die Eluatproben als auch die Proben der Königswasseraufschlüsse wurden auf 0,45 µm abfiltriert. Behälter (PE-Flaschen) und Spritzen wurden vor der Probenaufbereitung mit Salpetersäure konditioniert und mit Reinstwasser gründlich gespült. Die Proben wurden nach der Filtration mit Salpetersäure (1 % des Probenvolumens, 65 % HNO₃ p.a.) stabilisiert.

Die methodischen Bestimmungsgrenzen der Parameter unter Einsatz der entsprechenden Analyseverfahren können den Tabellen 4.5 und 4.6 entnommen werden.

Phenolindex

Der Phenolindex der Eluate als Summenparameter für leichtflüchtige Phenole und phenolartiger Substanzen wurde von dem akkreditierten Prüflaboratorium biodata ANALYTIK GmbH (Linden) nach DIN 38 409 H16-1 untersucht. Die Bestimmungsgrenze lag bei 0,01 mg/l.

pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit

Die Messung der pH-Werte erfolgte mit dem Gerät pH 197 von WTW (Weilheim) unter Einsatz der Redoxelektrode SenTix ORP von WTW (0-100 °C, 3mol/l KCl). Für die Messung der elektrischen Leitfähigkeit wurde das Conductometer LF 191 (WTW) verwendet. Diese Messungen wurden an den unfiltrierten Proben durchgeführt.

Kalkgehaltsbestimmung (DIN 18129)

Die Kalkgehaltsbestimmung wurde nach DIN 18129 mit einem CO₂-Gasometer (Calcimeter, Fa. Eijkelkamp, Giesbeek, NL) durchgeführt, dies entspricht dem Prinzip der quantitativen Bestimmung nach SCHEIBLER. Je 3 g des pulverfeinen Materials wurden eingewogen und in 5-facher Wiederholung gemessen. Über die gasometrische Kohlendioxidbestimmung unter Einsatz von Salzsäure wird der Massenanteil an Gesamtcarbonaten, überwiegend Kalzit (CaCO₃) oder Dolomit (CaMg(CO₃)₂), bezogen auf die Trockenmasse ermittelt.

Glühverlust (DIN 18128)

Mit Hilfe des Glühverlusts kann der organische Anteil eines Materials abgeschätzt werden (DIN 18128). Des Weiteren wird er für die mechanische Beurteilung benötigt.

Die Mindestprobenmenge beträgt bei Sand 30 g, bei kiesigem Sand – wie z. B. dem Sand aus Recyclingmaterial – 200 g und für Kiese muss eine Probenmenge von mindestens 1000 g eingesetzt werden. Die auf Gewichtskonstanz getrockneten Pro-

ben werden auf 0,01 g ihrer Masse in Porzellantiegel eingewogen und bei 550 °C 2 Stunden im Muffelofen (thermicon®, Heraeus Instruments, Hanau) geblüht. Nachdem die Proben abgekühlt sind, werden sie erneut gewogen und der Massenverlust in Bezug zur Eingangsmasse gesetzt. Pro Material wurden 3 Wiederholungen geblüht.

Kohlenwasserstoffe (DIN EN 14039)

Die Untersuchung der Kohlenwasserstoffe in der Festsubstanz erfolgte nach DIN EN 14039 durch die biodata ANALYTIK GmbH (Linden, akkreditiertes Prüflaboratorium). Die Bestimmungsgrenze lag bei 100 mg/kg.

PAK und EOX (DIN 38414 S21)

Die Werte der Summenparameter polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) nach DIN 38414 S21 und extrahierbare organischgebundene Halogene (EOX) nach 38414 S17 wurden dem „Prüfzeugnis über die Untersuchung von Wiederverwendenden Baustoffen“ vom 07. Juli 2004 entnommen, welches das Laboratorium für Baustoffprüfung AG für die Karl Brück, Hoch- und Tiefbau GmbH erstellt hat. Diese Untersuchungen werden ¼-jährlich im Rahmen der Zulassung der Recyclingmaterialien als Frostschutzschicht im Straßenbau von einem Fremdüberwacher durchgeführt. Die chemischen Analysen, die in diesem Zusammenhang die Wasser-Verträglichkeit nachweisen, wurden von der akkreditierten Dr. Weßling Laboratorien GmbH vorgenommen.

PCB (DIN 38414 S20)

Die polychlorierten Biphenyle wurden in Anlehnung an DIN 38414 S20 durch ein gaschromatografisches Verfahren mit massenspektrometrischer Detektion (GC 3800/MS Saturn 2000 mit Ionenfalle, Varian, Darmstadt) analysiert. Der Aufschluss der PCB₆ erfolgte mittels der beschleunigten Lösungsmittlextraktion (ASE, accelerated solvent extraction) nach der US EPA Methode 3545. Der mit der Dionex ASE 200 mit 11-mL Edelstahl-Extraktionszellen gewonnene Extrakt wurde auf 3 mL eingengt.

Die Analytik im MS/MS-Modus wurde unter Benutzung zweier interner Standards (1, 2, 3, 4-Tetrachlornaphthalin und PCB 209) durchgeführt. Für den Summenparameter PCB₆ sind sechs Kongenere maßgeblich: PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 153, PCB 138 und PCB 180.

Bewertung nach den Zuordnungswerten

Die chemischen Analysen des Eluates orientieren sich seit September 2005 an den Zuordnungskriterien der Eluate nach DEPONIEVERWERTUNGSVERORDNUNG

(DEPVERWV 2005). Der veränderte Parameterkatalog, der mit Inkrafttreten der DEPVERWV für Deponieersatzbaustoffe gültig ist, konnte im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht vollständig berücksichtigt werden.

Tabelle 4.7: Zuordnungskriterien der Eluate für Deponieersatzbaustoffe nach DEPVERWV (2005) und LAGA M20 - Zuordnungswerte für Eluate von Recyclingbaustoffen (1997)

chemische Parameter Eluat nach DEV S-4	DepVerwV	LAGA M20 Zuordnungswerte Eluat für Recyclingbaustoffe	
	Z 1.1	Z 1.1	Z 1.2
Chlorid [mg*L ⁻¹]	10	20	40
Cyanid [mg*L ⁻¹]	0,01	-	-
Sulfat [mg*L ⁻¹]	50	150	300
Wasserlöslicher Anteil [Masse-%]	1	-	-
Arsen [mg*L ⁻¹]	0,01	0,01	0,04
Blei [mg*L ⁻¹]	0,04	0,04	0,1
Cadmium [mg*L ⁻¹]	0,002	0,002	0,005
Chrom [mg*L ⁻¹]	-	0,03	0,075
Chrom VI [mg*L ⁻¹]	0,015	-	-
Thallium [mg*L ⁻¹]	0,001	-	-
Kupfer [mg*L ⁻¹]	0,05	0,05	0,15
Nickel [mg*L ⁻¹]	0,04	0,05	0,1
Quecksilber [mg*L ⁻¹]	0,0002	0,0002	0,001
Zink [mg*L ⁻¹]	0,1	0,1	0,3
Phenole [mg*L ⁻¹]	-	0,001	0,005
pH-Wert	6,5-9,0 ¹	7,0-12,5	7,0-12,5
Leitfähigkeit [µS*cm ⁻¹]	500	1500	2500

Vor Inkrafttreten der DEPVERWV galt das Merkblatt 20 der LAGA als maßgeblich, das explizit eine Empfehlung zur Einordnung bzw. Verwendung von mineralischen Abfällen als Funktion einer Kapillarsperre zur Deponieoberflächenabdichtung gibt. Dabei sollen die Zuordnungswerte Z1.1 des Eluates für Recyclingbaustoffe für das Material der Kapillarschicht eingehalten werden. Für den Kapillarblock gelten die Werte der Einteilung Z1.2 (LAGA M20 1997). In Tabelle 4.7 sind die entsprechenden LAGA-Werte den Grenzwerten der DEPVERWV gegenübergestellt.

Tabelle 4.8: Zuordnungswerte der Feststoffgehalte nach DEPVERWV (2005) und LAGA M20 - Zuordnungswerte für Feststoffe von Recyclingbaustoffen (1997)

Chemische Parameter Feststoff	DepVerwV	LAGA Zuordnungswerte Feststoff für Recycling- baustoffe			
		Z0	Z1.1	Z1.2	Z2
Arsen [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	-	20	-	-	-
Blei [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	-	100	-	-	-
Cadmium [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	-	0,6	-	-	-
Chrom [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	-	50	-	-	-
Kupfer [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	-	40	-	-	-
Nickel [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	-	40	-	-	-
Thallium [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	-	-	-	-	-
Quecksilber [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	-	0,3	-	-	-
Zink [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	-	120	-	-	-
Kohlenwasserstoffe [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	300	100	300 ¹	500 ¹	1000 ¹
Summe BTEX	1	-	-	-	-
Summe LHKW	1	-	-	-	-
PAK nach EPA [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] 1	5	1	5 (20) ²	15 (50) ²	75 (100) ²
EOX [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	3	1	3	5	10
PCB [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	0,1	0,02	0,1	0,5	1

¹Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar.

²Im Einzelfall kann bis zu dem in Klammern genannten Wert abgewichen werden.

Für Arsen und Schwermetalle existieren keine Zuordnungswerte der Feststoffgehalte in den Klassen Z1.1 und Z1.2 für Recyclingbaustoffe bzw. nichtaufbereiteten Bauschutt (Tabelle 4.8). Den Zuordnungswerten nach LAGA sind die zulässigen Feststoffgehalte für Deponieersatzbaustoffe nach der DEPVERWV (2005) gegenübergestellt.

Für die Parameter Carbonatgehalt und Glühverlust werden die Kriterien der TASI herangezogen und in Tabelle 4.9 mit den Anforderungen der DEPVERWV dargestellt.

Tabelle 4.9: Grenzwerte von Carbonatgehalt, Glühverlust und TOC nach DEPVERWV (2005) und TASI (1993)

Geochemische Parameter	DepVerwV	Grenzwerte nach TASI
Carbonatgehalt [Masse-%]	-	10
Glühverlust [Masse-%]	3	5
TOC [Masse-%]	1	-

4.3 Kipprinnenversuche

Wie in Kapitel 3.3.2 dargelegt, sind für einen Gleichwertigkeitsnachweis Kapillarsperren-Materialkombinationen, die als Deponieoberflächenabdichtung zum Einsatz kommen sollen, in Großkipprinnenversuchen auf ihre Leistungsfähigkeit zu testen.

Versuchsaufbau der Meßrinne

Die Kipprinne des Instituts für Ressourcenmanagement der Universität Giessen befindet sich in einer klimatisierten Halle des Biotechnikums des Interdisziplinären Forschungszentrums (IFZ).

Die 6 m lange, 0,6 m breite und 1 m hohe Kipprinne ist aus einem Stahlrahmen konstruiert, mit einem aus T-Trägern bestehenden Grundgestell und Seitenrahmen aus Vierkantrohren (Abbildung 4.3). Auf der rechten Seite (Hang aufwärts) besteht die Wandbefestigung aus 2 cm starkem Acrylglas. Auf der linken Seite wurde aufgrund des Messgeräteeinbaus zur Seitenbefestigung auf Alubleche zurückgegriffen. Die Rinne ist in ihrem unteren Drittel auf einem Stahlbock kugelgelagert, so dass ein entsprechendes Gefälle eingestellt werden kann. Die Neigung kann von 5° bis 30° in 5°-Schritten variiert werden (Tabelle 4.10).

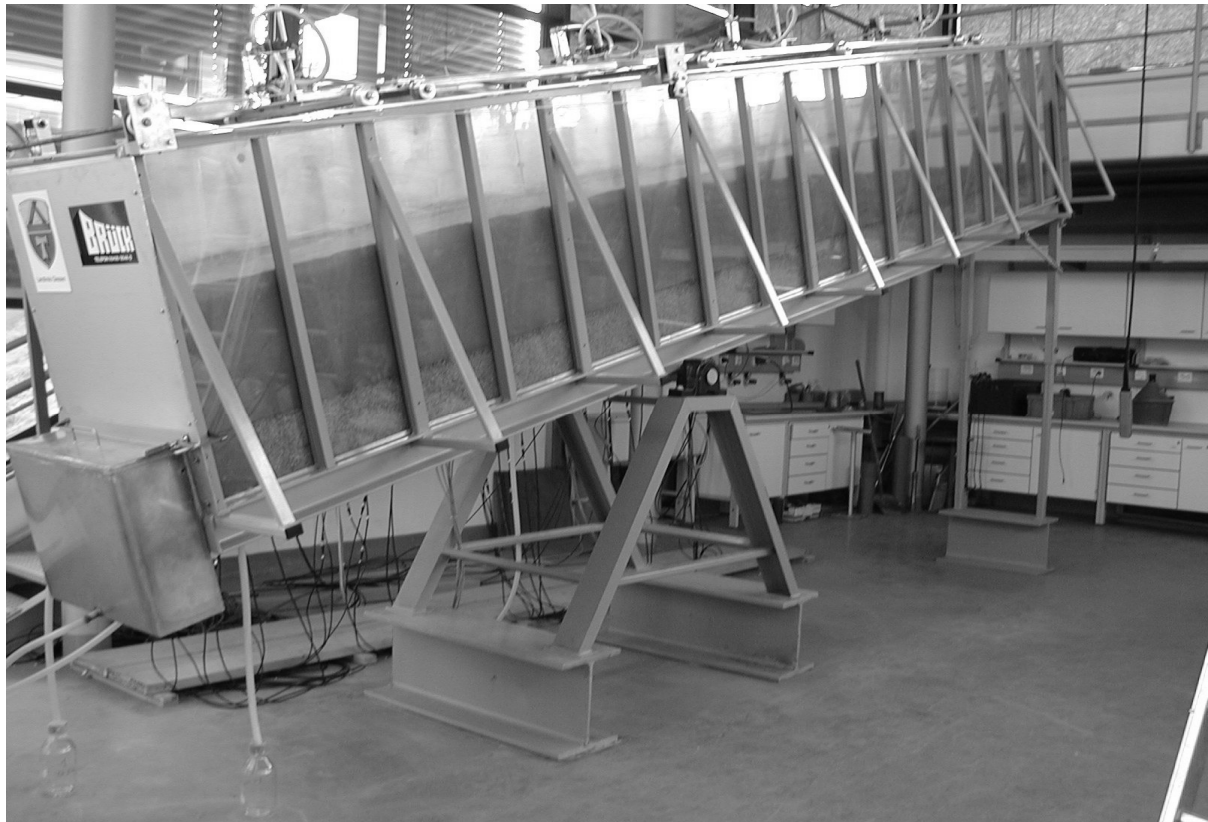


Abbildung 4.3: Kipprinne (6 m lang)

Tabelle 4.10: Neigungsmöglichkeiten der Kipprinne

Winkel in Grad	Winkel in Prozent	Winkel im Verhältnis
5°	8,8 %	1 : 11,4
10°	17,6 %	1 : 5,7
15°	26,8 %	1 : 3,7
20°	36,4 %	1 : 2,8
25°	46,6 %	1 : 2,2
30°	57,7 %	1 : 1,7

An der unteren Stirnseite befindet sich ein Vorbau in Form eines 60 cm breiten, 20 cm tiefen und 50 cm hohen Kastens, der so angebracht wurde, dass er 30 cm über den Rinnenboden hinabragt. Der Kapillarschichtabfluss ist an der unteren Kante des Kastens installiert. Auf Höhe des Rinnenbodens befindet sich der Kapillarblockabfluss. Der Kapillarblock und die Kapillarschicht sind durch eine Metallplatte voneinander getrennt. Diese 19 cm hohe Begrenzungswand ist V-förmig, so dass der Haupt-Kapillarblockabfluss in der Spitze zusammenlaufen und abfließen kann. Um eventuelle Randumläufigkeiten registrieren und entsprechend in den Berechnungen berücksichtigen zu können, wurden des Weiteren zwei Seitenabflüsse installiert. Die Kapillarschicht wird in L-Form um den Kapillarblock bis auf den Boden des Vorbaus

herabgeführt, damit sich das lateral abfließende Wasser sammeln und frei abfließen kann. Der reine Fließweg oberhalb der Schichtgrenze beträgt gemäß der V-förmigen Begrenzung zwischen Kapillarblock und –schicht 5,80 m bis 5,90 m.

Bewässerungsanlagen

Die Bewässerung des eingebauten Kapillarsperrenmaterials kann über zwei Systeme geregelt werden. Ein Beregnungsschlitten bewegt sich in beliebig einstellbarer Geschwindigkeit über die Rinne. Auf dem Schlitten sind 4 Präzisions-Flachstrahldüsen (Typ Quick-Veejet QVV-500017, Fa Spraying Systems, Hamburg) montiert, womit eine gleichmäßige Befeuchtung der Materialoberfläche garantiert werden kann. Magnetventile vor den Düsen regeln den Wasserfluss. Sie werden ebenso wie der Schlitten über eine Zeitschaltuhr gesteuert, so dass mit der entsprechenden Programmierung die Einstellung der Beregnungsraten vollzogen wird (Abbildungen 4.4 und 4.5). Durch dieses System ist es möglich, die Beregnung von $< 0,1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ bis auf nahezu $100 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ zu steigern, bei Auslastung entspricht dies einer lateralen Dränkapazität von ca. $570 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

Die Oberflächenbewässerung spiegelt die Verhältnisse der Realität an der Untergrenze der Rekultivierungsschicht wider. Dort sickert das Wasser gleichmäßig in die Kapillarschicht und akkumuliert dem Hang folgend.

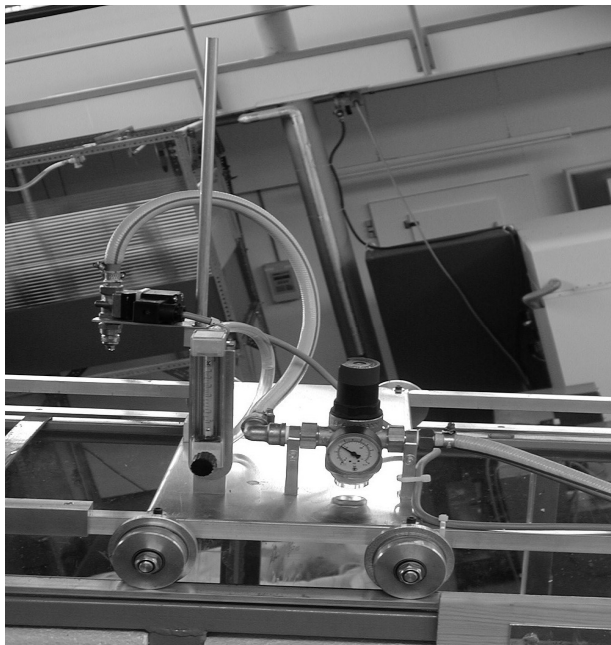


Abbildung 4.4: Beregnungssystem mit Düse, Magnetventil, Durchlaufmesser und Druckregler

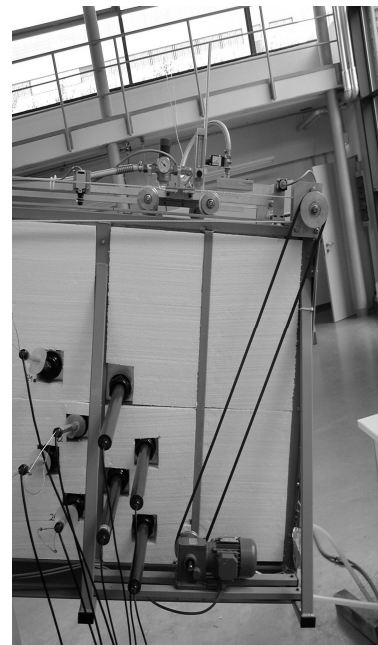


Abbildung 4.5: Antrieb des Beregnungsschlittens und Anordnung der Messgeräte

Bei dem zweiten System handelt es sich um eine Stirnwandbewässerung. Zu diesem Zweck enden 8 PE-Schläuche in gleichen Abständen auf der Breite der Stirnwand, 20 cm über der Schichtgrenze in der Kapillarschicht (Abbildung 4.6). Über

eine Schlauch-Rollen-Pumpe (ISM 931 der Fa. ISMATEC), die das Wasser aus einem 300 L Behälter fördert, wird die Zuflussmenge genau reguliert. Die Befüllung des Behälters aus der Wasserleitung wird über einen Schwimmer gesteuert. Um eine weitere Kontrolle der Zuflussmenge zu gewährleisten, wird das Wasser bei jedem Füllvorgang des 300 L Behälters über einen Kippzähler geführt, dessen Kipp-Signale per Computer aufgezeichnet werden.

Die Pumpe, mit 8 Schläuchen bestückt, ist in der Lage Wassermengen von $0,023 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ bis ca. $510 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ zu fördern, was auf die Versuchsrinne bezogen einer lateralen Dränkapazität von knapp $860 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ entspricht. Die Vorteile der Stirnwandbewässerung gegenüber dem Beregnungsschlittens liegen in der geringeren Wartungsanfälligkeit und der Tatsache, dass durch die direkte Einleitung des Wassers in die Kapillarschicht nahezu keine Verdunstungsdefizite beachtet werden müssen. Es ist ebenfalls möglich, die Oberfläche abzudecken, um Verdunstung zu vermeiden.

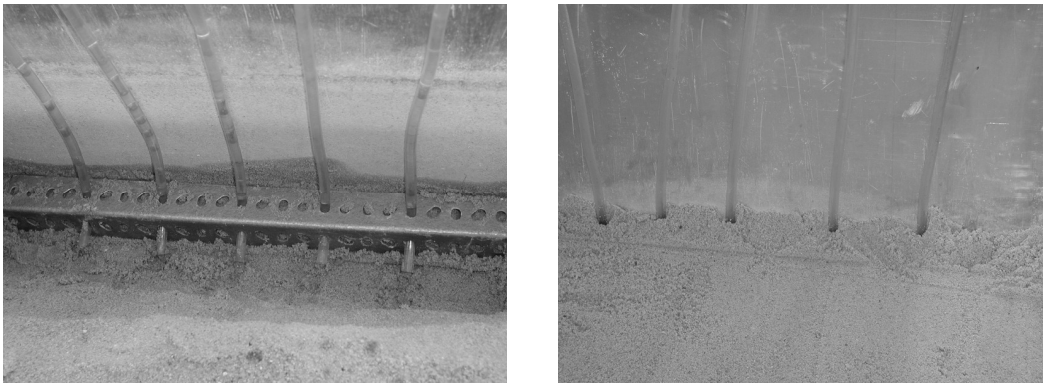


Abbildung 4.6: Stirnwandbewässerung

Sowohl die Kapillarschichtabflussmessung als auch die Wassermengen, die den Kapillarblock durchfließen, werden mit Kippzählern (UMS, München) erhoben. Das Signal wird vom Datenlogger (UMS, München) registriert und aufgezeichnet. Das Wasser, das aus den Seiten-Kapillarblock-Abflüssen kommt, wird in 1 L-Flaschen aufgefangen und regelmäßig händisch ausgelitert. Alle Abflussraten werden den Beregnungs- bzw. Zuflussmengen gegenübergestellt.

Messung bodenphysikalischer Größen

Mittels Tensiometern wurde kontinuierlich das **Matrixpotenzial** gemessen, um Fließprozesse innerhalb der Kapillarsperre vor allem im Zusammenspiel der speziellen Materialkombinationen zu verdeutlichen.

Bei den zur Verfügung stehenden Tensiometern handelt es sich um das Modell T8 der Firma UMS GmbH (München). Es misst sowohl die Wasserspannung als auch die Bodentemperatur und den Befüllzustand. Der letzte Aspekt stellt sicher, dass

laufende Untersuchungen nicht durch einen Ausbau der Messgeräte gestört werden müssen. Die Messgenauigkeit liegt bei ± 5 hPa für das Matrixpotenzial und bei $\pm 0,5$ K für die Temperatur.

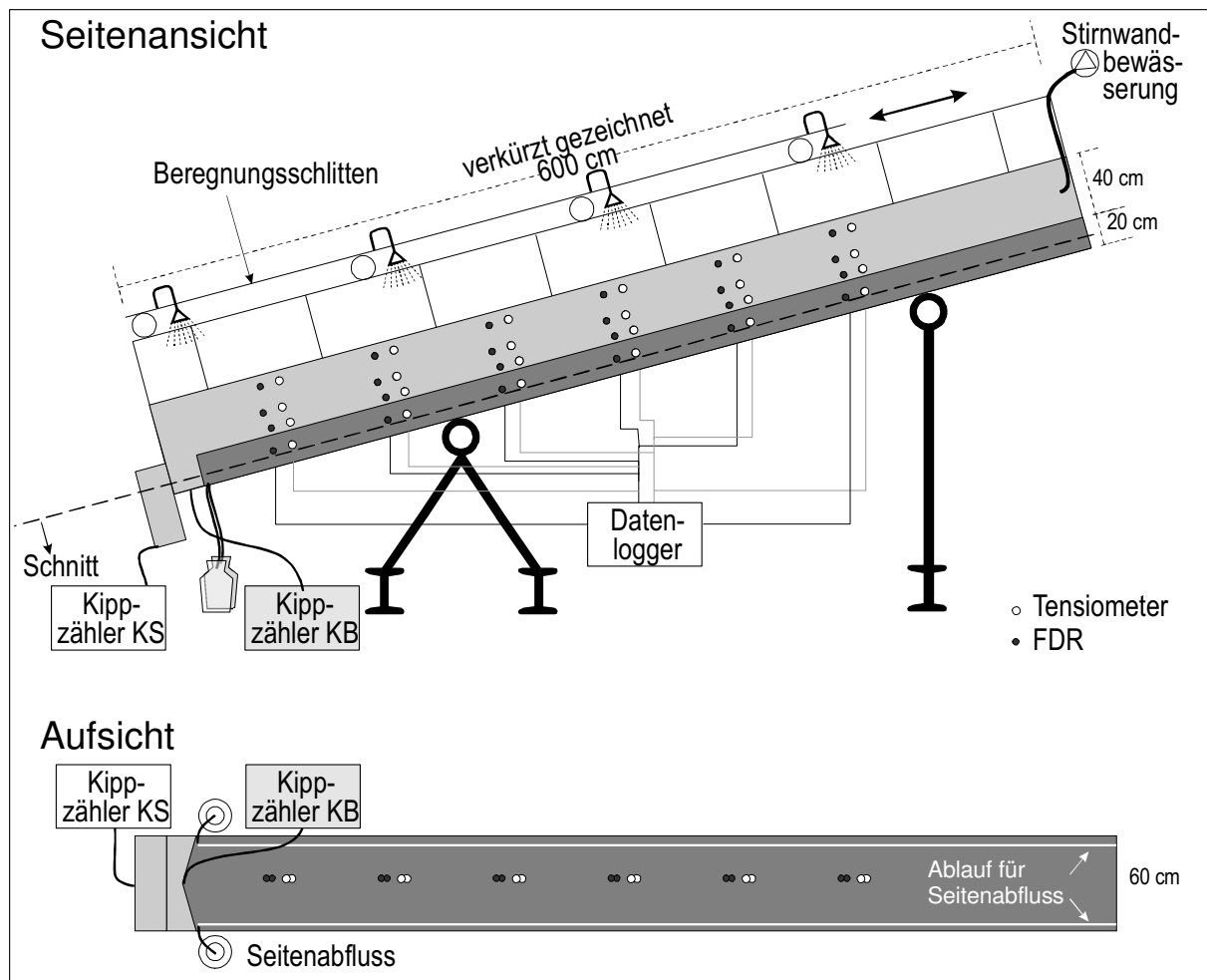


Abbildung 4.7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Kipprinne mit Positionierung der Messgeräte

Die Daten der **Wassergehalte** werden mit ThetaProbe-Sonden (UMS GmbH, München) erhoben. Diese Sonde arbeitet nach der FD-Methode (Frequency Domain). Sie erreicht mit einer Genauigkeit von bis zu 1 % fast die der von TDR-Sonden, ist jedoch zuverlässiger und weist eine geringere Fehleranfälligkeit auf. Insbesondere können Bodenwasserschwankungen im Bereich von 0 bis 3 % gemessen werden.

Die Tensiometer und die ThetaProbe-Sonden sind in sechs eingeteilten Segmenten jeweils in der Höhe von 11 cm, ausgehend vom Rinnenboden, im Kapillarblock sowie in den Höhen 25 cm, 35 cm und 52 cm in der Kapillarschicht eingebracht. Wie aus der Abbildung 4.7 entnommen werden kann, handelt es sich um insgesamt 48 Messgeräte, die gleichmäßig über die Seitenfläche der Rinne verteilt sind.

Wassergehalte, Matrixpotenzial und im Material herrschende Temperaturen wurden regelmäßig im Abstand von 10 Minuten von einem Datenlogger registriert.

Dokumentation des Einbaus

Das Kapillarschichtmaterial wurde in 20 cm Mächtigkeit eingebaut. Mit dem Kapillarschichteinbau werden zeitgleich die Messgeräte dieser Schicht eingebracht, da dies nach Einbau aufgrund der Grobkörnigkeit nicht mehr möglich ist (Abbildung 4.8). Der Kapillarschichtblock wurde mit 6 Schlägen mittels eines Stempels (20 x 20 cm, 6,2 kg) aus der Höhe von ca. 15 cm verdichtet. Danach wurde die Oberfläche mit einer Leiste abgezogen und die Ebenheit mit einer Wasserwaage überprüft (Abbildung 4.9).



Abbildung 4.8: Kapillarschichtblock - inklusive Messgeräte-Einbau



Abbildung 4.9: Verdichtung des Kapillarschichtblocks mit anschließender Begradigung



Abbildung 4.10: Kapillarschichteinbau; Verdichtung des Sandes und anschließendes Aufrauen der eingebauten Schicht

Vor dem Einbau des Kapillarschichtmaterials wurde dieser auf 4 bis 4,5 Gew.-% angefeuchtet. Das Kapillarschichtmaterial wurde anschließend vorsichtig über der Schicht-

grenze ausgebreitet. Der Sand wurde in drei Schichten eingebaut. Nach der Verdichtung der jeweiligen Lage mit dem oben beschriebenen Stempel wurde die Oberfläche mit einem Rechen aufgeraut, um eine Verzahnung der Schichten zu gewährleisten und eine Schichtbildung innerhalb der Kapillarschicht zu vermeiden (Abbildung 4.10).

Im Weiteren wurden die Messgeräte (Tensiometer und TDR-Sonden) in die Kapillarschicht eingebaut und zusammen mit den Kippzählern für den KS- und den KB-Abfluss an den Datenlogger angeschlossen.

Nach dem Materialeinbau wurden die Berechnungssysteme wie oben beschrieben, installiert und die Rinne wurde in Neigung versetzt. Die im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Kipprinnenversuche erfolgten mit einer Neigung von 15°.

Zum Abschluss wurde die Versuchsrinne von allen Seiten mit Styropor isoliert, um den Einfluss von Temperaturschwankungen zu minimieren. Sofern die Stirnwandbewässerung zum Einsatz kam, wurde auch die Oberfläche mit Styropor abgedichtet, um Verdunstungsverluste zu minimieren.

4.4 Bestimmung der lateralen Dränkapazität

Ziel von Kipprinnenversuchen ist die Bemessung der hydraulischen Leistungsfähigkeit bzw. der lateralen Dränkapazität der zu untersuchenden Materialkombination, indem die Zuflussraten so lange schrittweise gesteigert werden, bis die hydraulische Kapazität des Kapillarschichtmaterials erreicht ist und Wasser in den Kapillarblock übertritt. Die laterale Dränkapazität wird in Liter pro Meter Hangbreite und Tag angegeben ($L \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$). Unter Berücksichtigung einer standortabhängigen mittleren Sickerwasserrate aus der Rekultivierungsschicht kann mit Hilfe der aus Kipprinnenversuchen bestimmten lateralen Dränkapazität die maximale Hanglänge abgeschätzt werden, an deren unterem Ende eine Dränage oder Zwischendrainage nötig ist.

Die im Folgenden beschriebene Methode zur Ermittlung der lateralen Dränkapazität beruht auf der Definition von Ross (1990). Danach ist die laterale Dränkapazität erreicht, wenn die Kapillarblockabflussrate der Zuflussrate in das Kapillarsperrensystem entspricht, die Kapillarschicht also nicht in der Lage ist, zusätzlich ins System zugeführte Wassermengen abzuleiten.

Unter dieser Annahme muss beim Erreichen bzw. Überschreiten der lateralen Dränkapazität eine lineare Regression zwischen dem Zufluss Z und dem Kapillarblock-Abfluss A bestehen, deren Steigung im Idealfall 1 beträgt (vgl. Abb. 4.11).

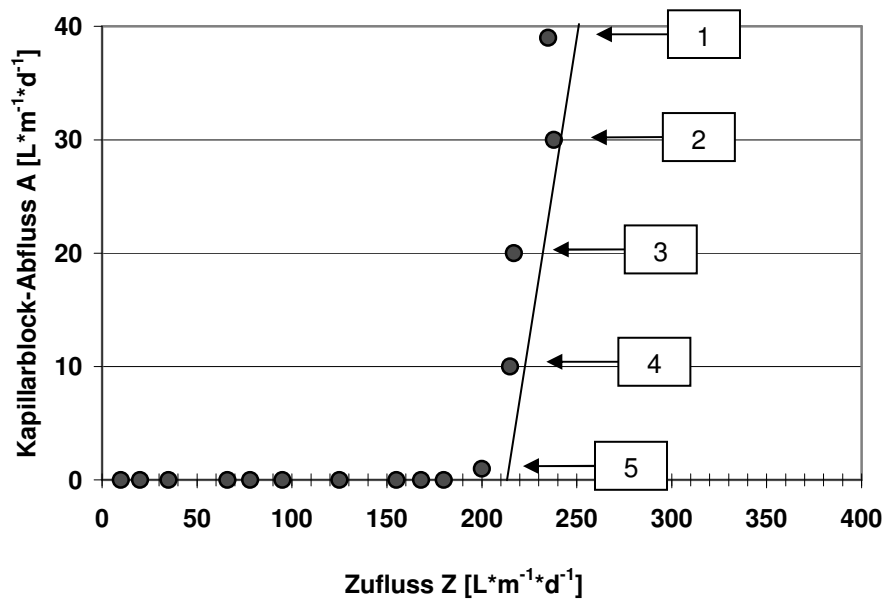


Abbildung 4.11: Schematische Darstellung der Zufluss-Abfluss-Beziehung aus Kipprinnenversuchen zur Herleitung der lateralen Dränkapazität

Wie die Abbildung 4.11 schematisch darstellt, treten unter Berücksichtigung der vorangestellten Überlegungen ab einer Zuflussmenge Z von beispielhaft ca. $200 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ die ersten Kapillarblock-Abflüsse A auf. Mit jeder weiteren Steigerung von Z nimmt A proportional zu. Die lineare Funktion ab dem Überschreiten der lateralen Dränkapazität lautet vereinfachend (Formel 4.1)

$$A = aZ + b \quad (\text{Formel 4.1})$$

wobei für den Idealfall gilt, dass die Steigung $a = 1$ ist.

Dann kann vereinfachend geschrieben werden (Formel 4.2):

$$A = Z + b \quad (\text{Formel 4.2})$$

Der Achsenabschnitt b in der Regression – ohne Berücksichtigung des negativen Vorzeichens - entspricht unter dieser Annahme der lateralen Dränkapazität (Formel 4.3):

$$|b| = A - Z \quad (\text{Formel 4.3})$$

Auf Basis dieses linearen Zusammenhangs wurde ein Modellansatz programmiert², bei dem ausgehend von den beiden höchsten Zuflussmengen schrittweise lineare

² Der Quellcode des Programmes ist im Anhang dokumentiert.

Regressionsanalysen berechnet werden, allerdings mit der Forderung, dass die Steigung stets 1 ist. Zur Verdeutlichung dient Abbildung 4.11: Zunächst wird eine lineare Regression mit den Wertepaaren 1 und 2 gerechnet, dann mit 1, 2 und 3, gefolgt von 1, 2, 3 und 4 u.s.w.. Demnach wurden in die lineare Regression mit der Steigung 1 kontinuierlich die Datensätze mit den nächst kleineren Zuflussmengen eingebunden, bis kein Kapillarblock-Abfluss mehr vorhanden war. Auf diese Weise erhält man eine Vielzahl linearer Regressionen mit der Steigung 1, deren gleichsam berechnetes Bestimmtheitsmaß R^2 die Anpassungsgüte der gemessenen Daten an die jeweilige Regression widerspiegelt. Bei der abschließenden Bestimmung der lateralen Dränkapazität ist die Regressionsgerade auszuwählen, die das maximale R^2 ausweist. Dabei bleibt die Funktion des 1. Rechenschrittes mit nur zwei Datenpaaren unberücksichtigt, bei der R^2 definitionsgemäß 1 sein muss!

Vier bis 6 Berechnungsschritte reichen erfahrungsgemäß aus, um die laterale Dränkapazität nach der Formel 4.3 mit einem hohen Bestimmtheitsmaß abzuleiten. Die auf diese Weise ermittelte laterale Dränkapazität wird im Folgenden als „potenzielle laterale Dränkapazität“ bezeichnet.

Da im Regelfall unter Praxisbedingungen schon vor Erreichen der potenziellen lateralen Dränkapazität nennenswerte Kapillarblockabflussmengen gemessen werden können, sollte für die Übertragung der Laborergebnisse auf den Feldmaßstab ein Sicherheitsbereich festgelegt werden. Bei den durchgeführten Kipprinnenversuchen wurde ein Sicherheitsbereich von 10 % angenommen und zusätzlich mit der maximal zulässigen Durchlässigkeit der mineralischen Dichtung für die Deponieklasse II (Oberflächenabdichtung) nach DepV (2002) von $5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ verglichen³.

4.5 Simulation

Simulationsberechnungen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit dem Ziel durchgeführt, den Einfluss einzelner Versuchs- und materialtechnischer Randbedingungen von Kipprinnenversuchen auf das Ergebnis der lateralen Dränkapazität zu bewerten. Dazu wurde das Modell HYDRUS-2D an die Ergebnisse des Kipprinnenversuchs mit der Natur-/Recyclingmaterialkombination validiert.

Die grundsätzliche Eignung des Modells HYDRUS-2D zur Simulation der Kapillarsperrenfunktion konnte von KÄMPF (2000) gezeigt werden. Dabei handelt es sich um ein zweidimensionales Strömungsmodell für gesättigte und ungesättigte Medien auf der Basis der Finite-Element-Methode (FEM) nach dem Galerkin-Verfahren. HYDRUS-2D simuliert den Wasser-, Wärme- und gelösten Stofftransport durch die

³ Bei der Übertragung der zulässigen Durchlässigkeit mineralischer Dichtungen nach DepV (2002) wurde von einem hydraulischen Gradienten von 1 ausgegangen; bezogen auf die Rinnenlänge und der Einheitshangbreite von 1 m ergibt sich eine maximal zu tolerierende Durchbruchrate von $2,6 \text{ L}^3 \text{ m}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

ungesättigte Zone unter Verwendung der RICHARDS-Gleichung. Für die Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften, die durch die Retentions- und die Leitfähigkeitsfunktion charakterisiert sind, wurde das VAN GENUCHTEN-MUALEM-Modell gewählt (vgl. Kapitel 3.1.5).

Die benötigten VAN-GENUCHTEN-Parameter - der Residualwassergehalt θ_r , der Sättigungswassergehalt θ_s , α , n und l - wurden mit Hilfe der Daten der Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung mit dem Programm RETC ermittelt. Für die Identifizierung der hydraulischen Parameter standen Stechzylindermessungen und die während des Kipprinnenversuchs erhobenen Daten der Matrixpotenziale und Wassergehalte zu Verfügung. Für die gesättigte Wasserleitfähigkeit wurden sowohl gemessene als auch berechnete Werte (siehe 4.2.1.1) eingesetzt.

Mit Hilfe des in HYDRUS implementierten MESHGEN-2D Moduls wurde eine 6 m lange Kipprinne als Finite-Elementenetz mit 3469 Knoten und 6637 Elementen nachgestellt. Die Simulation der ungesättigten Fließprozesse in Verbindung mit den großen hydraulischen Gradienten, bedingt durch die deutlichen Unterschiede in den Parameterfunktionen der Materialien, erfordert eine feine Diskretisierung.

Mit einer großen Zahl an Knoten bzw. Elementen nimmt die Operationalität der numerischen Modellierung ab. Aufgrund der damit verbundenen langen Rechenzeit wurde zusätzlich eine 1 m lange Kipprinne mit 1272 Knoten und 2443 Elementen konstruiert. Die Geometrie der Elementenetze soll den Versuchsaufbau der Kipprinne bei 15° Neigung im Prinzip nachstellen.

Um den Modellaufbau für die Simulation möglichst einfach zu gestalten, wurden die Stirnseiten senkrecht dargestellt. Das Netz wurde bei beiden Rinnen so konzipiert, dass eine exakte Schichtgrenze zugeordnet werden kann. Dieser Bereich ist für die Fließprozesse maßgebend und ist aus diesem Grund feiner diskretisiert (Abbildung 4.12).

Durch die Nachstellung des Vorbaus kann die senkrechte Modellaußengrenze im Bereich des Kapillarblocks als Abfluss charakterisiert werden. Der Kapillarschichtabfluss befindet sich an der Unterseite des Vorbaus.

Die Wasserzuflussrate wurde als variabler Zufluss an der oberen Stirnseite und somit als Stirnwandbewässerung definiert. Auf diese Weise kann ein direkter Vergleich mit den praktischen Kipprinnenversuchen geführt werden. Bei allen Berechnungen werden Evaporation und Transpiration ausgeschlossen.

Die Anfangsbedingungen wurden über das Matrixpotenzial mit 200 hPa für die Kapillarschicht und mit 30 hPa für den Kapillarblock festgelegt.

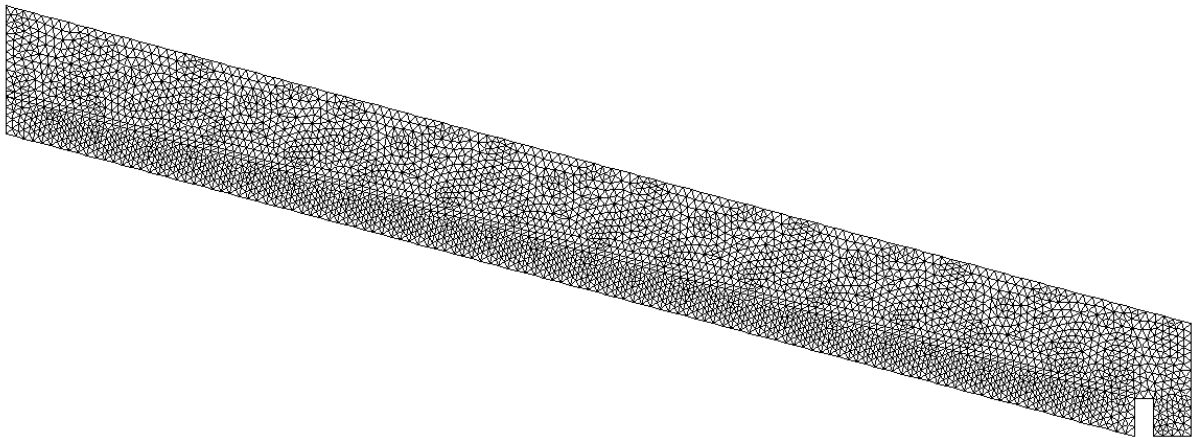


Abbildung 4.12: Aufbau des Finite-Elementenetz der 6 m langen Kipprinne in 15° Neigung

4.6 Datenverarbeitung und Statistik

Die deskriptive Datenauswertung von Mittelwerten als Lageparameter und der Standardabweichung als Streuungsmaß sowie die Darstellung der Daten wurde mit MS Excel 2000 durchgeführt.

Im Rahmen des Kornzertrümmerungsversuchs wurde bei Vorliegen einer Varianzhomogenität der Tukey-Test als multipler Mittelwertvergleich durchgeführt. Lag keine Homogenität der Varianzen vor, wurde der Games-Howell-Test eingesetzt. Für paarweise Vergleiche wurde der Dunnett-T-Test angewendet. Des Weiteren wurde auf eine normalverteilte Grundgesamtheit getestet, welche die Voraussetzung für die anschließende Varianzanalyse darstellt.

Die Konzentrationen der chemischen Parameter des Langzeitschüttelversuchs wurden auf ihren Zusammenhang mit der Schütteldauer untersucht. Bei Vorliegen einer Normalverteilung fand der Maßkorrelationskoeffizient nach Pearson Anwendung, war die Voraussetzung der normalverteilten Grundgesamtheit nicht gegeben, wurde die Korrelation mit dem Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman überprüft.

Die Art des Zusammenhangs zwischen Zuflussmenge und Kapillarblockabfluss während der Kipprinnenversuche wurde mit Regressionsanalysen getestet.

Die statistischen Tests wurden mittels SPSS 12.0 durchgeführt.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Materialeigenschaften

Die physikalischen und chemischen Materialeigenschaften sind für die Funktion, die nachhaltige Wirksamkeit und die Umweltverträglichkeit der Kapillarsperre von großer Bedeutung. Im Laufe der Kapillarsperrenforschung haben sich einige Materialeigenschaften herauskristallisiert, für die Gütekriterien formuliert werden konnten (BAUER 2001, GARTUNG & NEFF 2000, LAGA 1997, PALM ET AL. 2003, STEINERT 1999). Die physikalischen Anforderungen sind als Empfehlungen zu betrachten und stellen keine strikten Grenzwerte dar. In Tabelle 5.1 sind den untersuchten Parametern diese Kriterien gegenübergestellt. Um die Eignung mineralischer Reststoffe als Kapillarsperrenmaterialien bewerten zu können, müssen sie die gleichen Anforderungen wie die natürlichen Primärbaustoffe erfüllen.

Tabelle 5.1: Gütekriterien für Kapillarsperrenmaterialien

	Gütekriterien	Kapillarschicht	Kapillarblock
Physikalische Parameter	Korndichte ¹	$\geq 2,6 \text{ g*cm}^{-3}$	$\geq 2,6 \text{ g*cm}^{-3}$
	Kornform ¹	gerundet bis gut gerundet	gerundet bis gut gerundet
	Kornverteilung ^{1, 2, 3}	0-2 mm	filterstabil entsprechend der Kapillarschicht
	Ungleichförmigkeitszahl ^{1,2}	$d_{60} / d_{10} \leq 3; \text{ besser } \leq 2,5$	$d_{60} / d_{10} \leq 3; \text{ besser } \leq 2,5$
	Filterstabilität ^{1, 2, 3}	$d_{15}^{KB} / d_{85}^{KS} \leq 4$	
	gesättigte Wasserleitfähigkeit ¹	$\geq 5 \cdot 10^{-5} \text{ m*s}^{-1}$	10^{-3} m*s^{-1}
	ungesättigte Wasserleitfähigkeit ⁴	k _u -Funktion von Kapillarschichtmaterial sollte um mehrere 10'er Potenzen über der k _u -Funktion des Kapillarblockmaterials verlaufen	
	Lufteintrittswert ¹	10 bis 44 hPa	sehr klein
	Kornzertrümmerungsversuch ²	nach Belastung Zunahme der Fraktion < 0,125 mm von max. 3 Masse-%	nach Belastung Fraktion < 0,5 mm max. 4 Masse-%
	Wasseraufnahmefähigkeit ¹	1 Masse-%	1 Masse-%
Chemische Parameter	Eluat nach DEV S-4 ⁵	LAGA Z1.1	(LAGA Z1.2) LAGA Z1.1*
	Untersuchung der Festsubstanz ⁵	LAGA Z1.1	(LAGA Z1.2) LAGA Z1.1*
	Carbonatgehalt ⁶	$\leq 10 \text{ Masse-\%}$	$\leq 10 \text{ Masse-\%}$
	Glühverlust ⁶	$\leq 5 \text{ Masse-\%}$	$\leq 5 \text{ Masse-\%}$

¹BAUER 2001, ²GARTUNG & NEFF 2000, ³PALM ET AL. 2003, ⁴Steinert 1999, ⁵LAGA 1997, ⁶TASI 1993

*nach DepVerwV vom 01.09.2005 gelten auch für den Kapillarblock die Zuordnungswerte Z1.1

5.1.1 Physikalische Eigenschaften

Korndichte

Nach den empfohlenen Gütekriterien von BAUER (2001) sollten Kapillarsperrenmaterialien eine Dichte von $\geq 2,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ besitzen. Wie den Tabellen 5.2 und 5.3 zu entnehmen ist, konnte dies bei den untersuchten Naturmaterialien, deren Hauptbestandteil Quarz mit einer Dichte von $2,65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ist, durchgängig eingehalten werden.

Die Untersuchungen der Bauschuttrecyclingmaterialien ergaben Werte zwischen $2,3 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ und $2,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Die höheren Dichten von $2,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ wiesen die Qualitätsmaterialien auf, die einen höheren Anteil an Naturstein beinhalten. Die geringeren Dichten des Recyclingmaterials R-KS-0/3, R-KS-0,71/2, R-KB-2/11 und R-KB5/22 sind auf die Beimengungen von Ziegel und Mauerwerk zurückzuführen, die aufgrund ihrer hohen Porosität Dichten von $< 2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ aufzeigen (METJE 2003).

Tabelle 5.2: Korndichte der Kapillarschichtmaterialien

Kapillarschichtmaterial	Korndichte [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]
R-KS-0/3	2,55
R-KS-0,71/2	2,30
R-KS-Q-0/3	2,60
R-KS-Q-0/2	2,60
N-KS-0/1(Rhein/Main)	2,65
N-KS-0/2(Rhein/Main)	2,65
N-KS-0/2(Ems)	2,65

Tabelle 5.3: Korndichte der Kapillarblockmaterialien

Kapillarblockmaterial	Korndichte [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]
R-KB-2/11	2,40
R-KB-5/22	2,40
R-KB-Q-2/10	2,60
N-KB-2/5	2,65

Kornform

Die Kornform wurde vorrangig an den Recyclingmaterialien nach DIN EN 933 überprüft, da es sich um gebrochene Materialien handelte und deshalb mit eventuellen Unregelmäßigkeiten gerechnet werden konnte. Alle Recyclingmaterialien wurden als kubisch eingestuft, wobei kantige Bruchstellen überwogen. Im Vergleich zu den Naturmaterialien besaßen die Recyclingmaterialien wesentlich rauere Oberflächen. Bei den Naturmaterialien wurde auf die Durchführung von DIN EN 933 verzichtet, weil sie fluviatil beeinflusst sind und dadurch entsprechende Abrundungen aufweisen müssen.

Während STEINERT (1999) den hohen Aufwand dieser Untersuchung als nicht gerechtfertigt ansieht, da kein Bewertungsrahmen für den Einfluss der Kornform auf die ungesättigte Wasserleitfähigkeit in der Literatur existiert und somit keine Konsequenzen für die Kapillarsperrenfunktion gefolgert werden können, betonen WOHLNICH & BAUER (1999), BAUER (2001) und KÄMPF ET AL. (1999) die Wichtigkeit einer gerundeten Kornform. Der Vorteil liegt ihrer Meinung nach in der hohen Verdichtbarkeit der runden Körner und der daraus resultierenden stabilen Porenraumstruktur.

Korngrößenverteilung

Die Funktion der Kapillarsperre beruht auf dem deutlichen Sprung der Porengrößen zwischen Kapillarschicht und Kapillarblock, der auf den unterschiedlichen Korngrößenverteilungen basiert. Der Abbildung 5.1 können die Verläufe der Kornverteilungskurven der untersuchten Materialien entnommen werden.

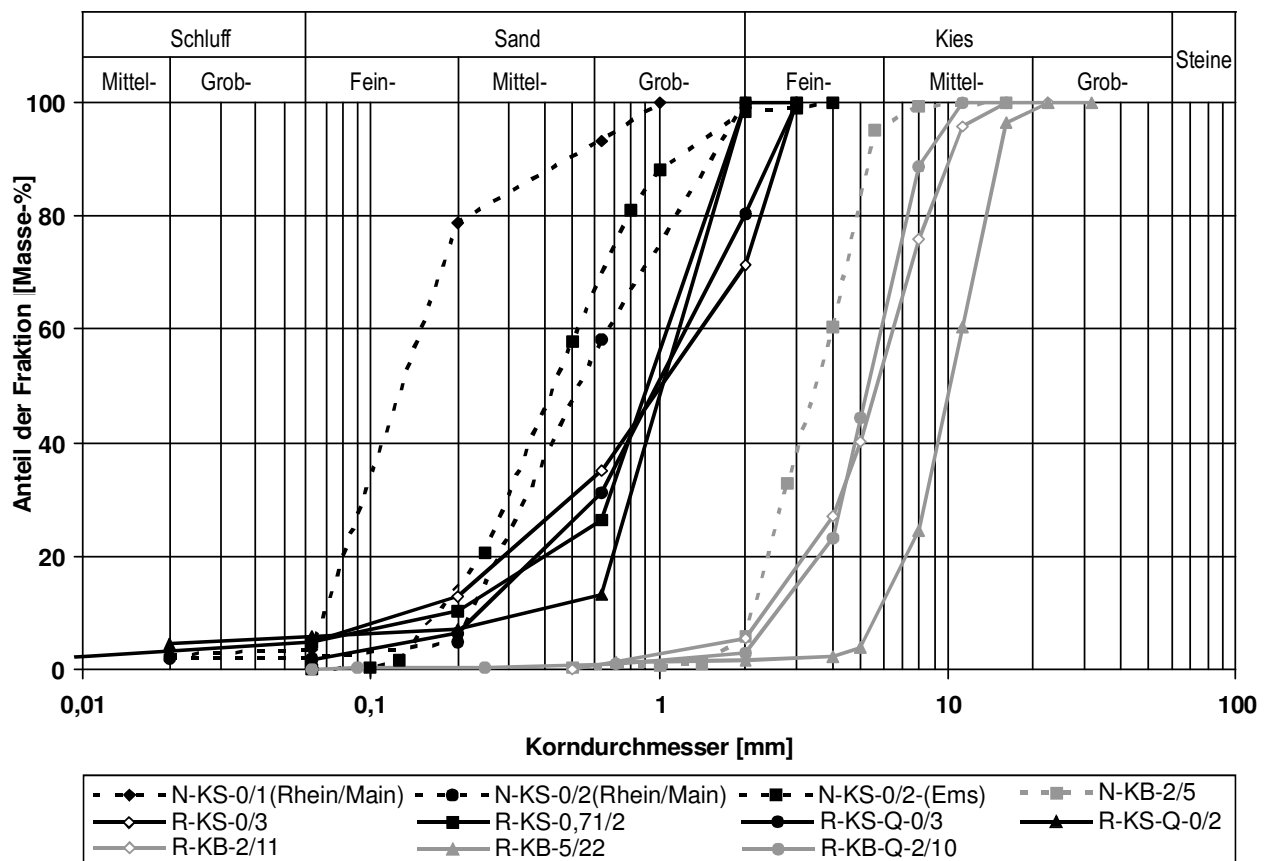


Abbildung 5.1: Korngrößenverteilungen der untersuchten Bauschuttrecycling- und Naturmaterialien

Die Korngrößen der Kapillarschichtmaterialien, in schwarz dargestellt, bewegen sich zwischen 0 bis 4 mm. Die Natursande, deren Korngrößenverteilungen durch die gestrichelten Kurven widerspiegelt werden, zeigen größere Anteile an Feinsand - N-KS-0/1(Rhein/Main) - bzw. Mittelsand - N-KS-0/2(Rhein/Main) und N-KS-0/2(Ems) -

als die Recyclingsande. Die Recyclingsande können als Grobsande bezeichnet werden, wobei die Materialien R-KS-0/3 und R-KS-Q-0/3 mit 20 bzw. 30 % in den Feinkiesbereich übergehen.

Die Kapillarschichtmaterialien sind in grau dargestellt und weisen, wie gefordert, wesentlich größere Körnungen auf. Die Korngrößenverteilung des Naturmaterials wird durch die gestrichelte Kurve wiedergegeben. Dabei handelt es sich um einen Feinkies mit der Körnung 2 bis 5 mm. Die Kapillarschichtmaterialien aus Recyclingmaterial können mit weit größeren Körnungen von 2 bis 10 mm bzw. bis 11 mm (R-KB-Q-2/10 und R-KB-2/11) sowie von 5 mm bis 22 mm (R-KB-5/22) als Mittelkiese bezeichnet werden.

Je steiler die Kurven der Korngrößenverteilungen der Materialien verlaufen, desto gleichförmiger sind die Materialien, die dadurch ein homogenes Porensystem ausbilden können. Die Kurvensteigungen, die durch die **Ungleichförmigkeitszahl (U)** ausgedrückt werden, sind in den Tabellen 5.4 und 5.5 dargestellt.

Tabelle 5.4: Ungleichförmigkeit der Kapillarschichtmaterialien

Kapillarschichtmaterial	Ungleichförmigkeit (d_{60}/d_{10})
R-KS-0/3	10,5
R-KS-0,71/2	6,3
R-KS-Q-0/3	5,3
R-KS-Q-0/2	3,5
N-KS-0/1(Rhein/Main)	2,1
N-KS-0/2(Rhein/Main)	2,9
N-KS-0/2(Ems)	2,7

d_{60} = Korndurchmesser [mm] des Siebdurchgangs bei 60 %

d_{10} = Korndurchmesser [mm] des Siebdurchgangs bei 10 %

Tabelle 5.5: Ungleichförmigkeit der Kapillarschichtmaterialien

Kapillarschichtmaterial	Ungleichförmigkeit (d_{60}/d_{10})
R-KB-2/11	2,8
R-KB-5/22	1,9
R-KB-Q-2/10	2,0
N-KB-2/5	1,9

d_{60} = Korndurchmesser [mm] des Siebdurchgangs bei 60 %

d_{10} = Korndurchmesser [mm] des Siebdurchgangs bei 10 %

Die größte Homogenität der Kapillarschichtmaterialien zeigt sich bei den Naturmaterialien durch die geringen Werte in der Ungleichförmigkeit. BAUER (2001) fordert eine Ungleichförmigkeit von ≤ 3 . Nach dem Entwurf der GDA-Empfehlungen zur Kapillarsperre (GARTUNG & NEFF 2000) sollte ein Wert $< 2,5$ erreicht werden (vgl. Tab 5.1).

Während die Recyclingmaterialien R-KS-0/3, R-KS-0,71/2 und R-KS-Q-0/3 stark von den geforderten Werten abweichen, wird das Material R-KS-Q-0/2 aufgrund der nur geringen Überschreitung weiterhin berücksichtigt. Auch aus der Literatur lässt sich entnehmen, dass geringe Abweichungen von der empfohlenen Ungleichförmigkeitszahl nicht als Ausschlusskriterium für den Einsatz als Kapillarsperrenmaterialien betrachtet werden (BARTH 2003, JELINEK 1997).

Aus den Korngrößenverteilungen der Kapillarsperrenmaterialien ergeben sich sowohl für das Naturmaterial als auch für die Recyclingmaterialien große Steilheiten in den Kurvenverläufen. Mit einer Ungleichförmigkeit (U) von < 3 bei R-KB-2/11 bzw. $U \leq 2$ bei R-KB-5/22, R-KB-Q-2/10 und N-KB-2/5 werden die Anforderungen gut erfüllt.

Für die Ermittlung der **Filterstabilität** nach TERZAGHI werden ebenfalls die Kornverteilungskurven herangezogen. Die Quotienten der Kapillarsperrenmaterialien zu den Kapillarschichtmaterialien von $d_{15}^{KB} / d_{85}^{KS}$ sollen einen Wert ≤ 4 zeigen. Der Tabelle 5.6 ist zu entnehmen, dass die Filterregel nach TERZAGHI bei der Kombination der Recyclingsande mit allen Kapillarsperrenmaterialien erfüllt wäre. Die Körnung des Materials N-KS-0/1(Rhein/Main) ist so fein, dass der Siebdurchgang von 85 % bei einem sehr geringen Korndurchmesser liegt und die Filterstabilität zu keinem der Kapillarsperrenmaterialien gewährleistet werden kann. Die Natursande N-KS-0/2(Ems) und N-KS-0/2(Rhein/Main) mit den etwas gröberen Körnungen sind im überwiegenden Maß filterstabil zu den Kapillarsperrenmaterialien. Nicht als Kombination geeignet ist N-KS-0/2(Ems) mit R-KB-5/22. Die Kombination N-KS-0/2(Rhein/Main) mit R-KB-5/22 weist mit 4,5 eine kleine und die Kombination N-KS-0/2(Ems) mit 4,2 eine noch geringere Überschreitung des geforderten Quotienten auf.

Tabelle 5.6: Quotienten der Filterregel nach TERZAGHI aus der Materialgegenüberstellung

$F = d_{15}^{KB} / d_{85}^{KS}$		Kapillarschichtmaterial						
		R-KS-0/3	R-KS-Q-0/3	R-KS-0,71/2	R-KS-Q-0/2	N-KS-0/1(R/M)	N-KS-0/2(R/M)	N-KS-0/2(E)
Kapillarsperrenmaterial	R-KB-2/11	1,2	1,3	1,7	1,7	7,4	1,9	3,2
	R-KB-Q-2/10	1,5	1,7	2,2	2,2	9,7	2,5	4,2
	R-KB-5/22	2,7	3,1	3,9	3,8	17,4	4,5	7,6
	N-KB-2/5	0,9	1,0	1,3	1,3	5,9	1,5	2,5

d_{15}^{KB} = Korndurchmesser [mm] des Siebdurchgangs KB-Material bei 15 %

d_{85}^{KS} = Korndurchmesser [mm] des Siebdurchgangs KS-Material bei 85 %

Ob diese geringe Überschreitung der Filterregel der Kombination N-KS-0/2(Ems) mit R-KB-Q-2/10 einen entscheidenden Einfluss auf die Filterstabilität hat, wurde mit

Hilfe von Säulenversuchen überprüft. Als Referenzversuch wurde die Naturmaterialkombination aus dem gleichen Kapillarschichtsand mit N-KB-2/5 als Kapillarblock auf die identische Art getestet.

Die Abbildungen 5.2 und 5.3 zeigen die Grenzschichten der in die Säulen eingebauten Materialkombinationen nach 5-stündiger gesättigter Durchströmung. Sowohl bei der Naturmaterialkombination (N-KS-0/2(Ems) mit N-KB-2/5) als auch bei der Natur-/Recyclingmaterialkombination (N-KS-0/2(Ems) mit R-KB-Q-2/10) ist die exakte Schichtgrenze ohne Verlagerungen des feineren Materials der Kapillarschicht in den Kapillarblock deutlich zu erkennen.

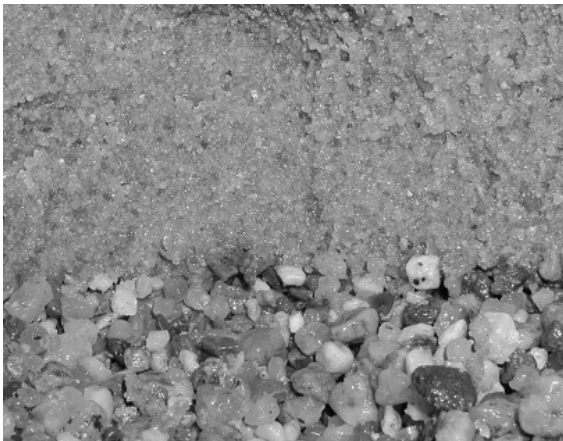


Abbildung 5.2: Grenzfläche der Naturmaterialkombination N-KS-0/2 mit N-KB-2/5 nach 5-stündiger Durchströmung



Abbildung 5.3: Grenzfläche der Natur-/Recyclingmaterialkombination N-KS-0/2 mit R-KB-Q-2/10 nach 5-stündiger Durchströmung

Zur ergänzenden Kontrolle sind parallel zwei weitere Säulenversuche mit den gleichen Materialkombinationen unter identischen Versuchsbedingungen durchgeführt worden. Nach der Grenzschichtbelastung durch die Wasserströmung wurde das Kapillarblockmaterial schichtweise ausgebaut, um durch einen Korngrößenvergleich eine mögliche Verlagerung von Feinanteilen nachweisen zu können. Für den Vergleich der Anteile der Fraktion < 2 mm wurden die Daten der vorangegangenen Korngrößenanalysen (vgl. Abb. 5.1) herangezogen.

An der Grenzschicht von Kapillarschicht und Kapillarblock ist keine exakte Trennung der Materialien möglich, da sich der Kapillarschichtsand in die oberflächlichen Poren des Kapillarblocks setzt. Aus diesem Grund wurden in den Kapillarblockmaterialschichten beider Materialkombinationen bis 2 cm unterhalb der Grenzschicht erhöhte Anteile der Fraktion < 2 mm ermittelt (Tab. 5.7 und 5.8). Bei der Naturmaterialkombination wurden 13,8 Masse-% der Fraktion < 2 mm in den oberen 2 cm des Kapillarblocks festgestellt, im Recyclingblock wurde ein Anteil von 14,0 Masse-% nachgewiesen. In den darunter liegenden Schichten zeigen beide Kapillarblockmaterialien gleichbleibende Fraktionsanteile der Körner < 2 mm. Das Naturmaterial N-KB-2/5 weist Anteile von 0,6 bis 1,3 Massen-% auf, im Vergleich zu 5,9 Masse-% aus der

Korngrößenanalyse (vgl. Abb. 5.1). Im Material R-KB-Q-2/10 sind Anteile von 2,2 bis 3 Masse-% zu beobachten, was gut mit der Korngrößenverteilung aus Abb. 5.1 übereinstimmt, die 2,9 Masse-% der Fraktion < 2 mm zeigt.

Durch die Untersuchung der Feinanteilverlagerung konnte die Filterstabilität auf eine Tiefe von 2 cm nachgewiesen werden. Es zeigt sich ein vergleichbares Verhalten zwischen den Kapillarmaterialien N-KB-2/5 und R-KB-Q-2/10 bezüglich ihrer Filterstabilität zu dem Kapillarschichtsand N-KS-0/2(Ems). Daraus folgt, dass in Verbindung mit der optischen Überprüfung der Grenzschicht nach Belastung die Filterstabilität der Materialkombination aus N-KS-0/2(Ems) und R-KB-Q-2/10 bestätigt werden kann. Durch dieses Vorgehen konnte ebenfalls nachgewiesen werden, dass die Filterregel nach Terzaghi für das Material N-KS-0/2(Ems) gilt, trotz einer Überschreitung der in dem Zusammenhang mit der Filterregel geforderten Ungleichförmigkeit ≤ 2 (PRINZ 1997). Dies geht konform mit Ergebnissen von SMOLTCYK (1996), der die Filterstabilität auch bei Werten von 5 und höher als gewährleistet ansieht.

Tabelle 5.7: Ergebnis der Feinkornabsiebung des Kapillarsblocks nach der Durchführung des Säulenversuches der Naturmaterialkombination N-KS-0/2 mit N-KB-2/5 zur Überprüfung der Filterstabilität

Lage unter Schichtgrenze [cm]	Fraktion < 2 mm [Masse-%]
0 bis 2,0	13,8
2,0 bis 3,0	1,1
3,0 bis 4,5	0,9
4,5 bis 5,5	1,0
17,5 bis 20,0	0,6
Kontrolle N-KB-2/5	5,9

Tabelle 5.8: Ergebnis der Feinkornabsiebung des Kapillarsblocks nach der Durchführung des Säulenversuches der Natur-/Recyclingmaterialkombination N-KS-0/2 mit R-KB-Q-2/10 zur Überprüfung der Filterstabilität

Lage unter Schichtgrenze [cm]	Fraktion < 2 mm [Masse-%]
0 bis 2,0	14,0
2,0 bis 3,0	3,0
3,0 bis 4,0	2,7
4,0 bis 4,5	2,9
4,5 bis 5,5	2,2
5,5 bis 6,5	2,6
12 bis 14,5	2,9
Kontrolle R-KB-Q-2/10	2,9

Aus den Erfahrungen und Forschungsprojekten zum Einsatz von Kapillarsperren als Deponieoberflächenabdichtung resultieren Empfehlungen für Kornverteilungen ge-

eigneter Materialkombinationen (BAUER 2001, GROßMAN ET AL. 2000, PALM ET AL. 2003, VON DER HUDE 1999, WEIGEL 1993, WÖHNLICH & BAUER 1999). In diese Empfehlungen fließen sowohl der Parameter der Ungleichförmigkeit sowie die Filterstabilität ein. Die Ungleichförmigkeit gibt die optimale Steigung der Korngrößenverteilungskurven vor und die Abstände zwischen den Körnungen von Kapillarschicht und Kapillarblock werden durch die Filterstabilität charakterisiert. Mit Hilfe dieser Parameter und zahlreicher Versuche mit verschiedenen Materialien konnten Bandbreiten entwickelt werden, die günstige Kornverteilungskurven für Kapillarsperren abbilden. Durch eine Einordnung in diese Bandbreiten kann eine erste Eignungsbeurteilung der zu untersuchenden Materialien vorgenommen werden. In Abbildung 5.4 sind beispielhaft Bandbreiten günstiger Kornverteilungskurven für Kapillarsperrenmaterialien nach WEIGEL (1993) und nach VON DER HUDE (1999) dargestellt.

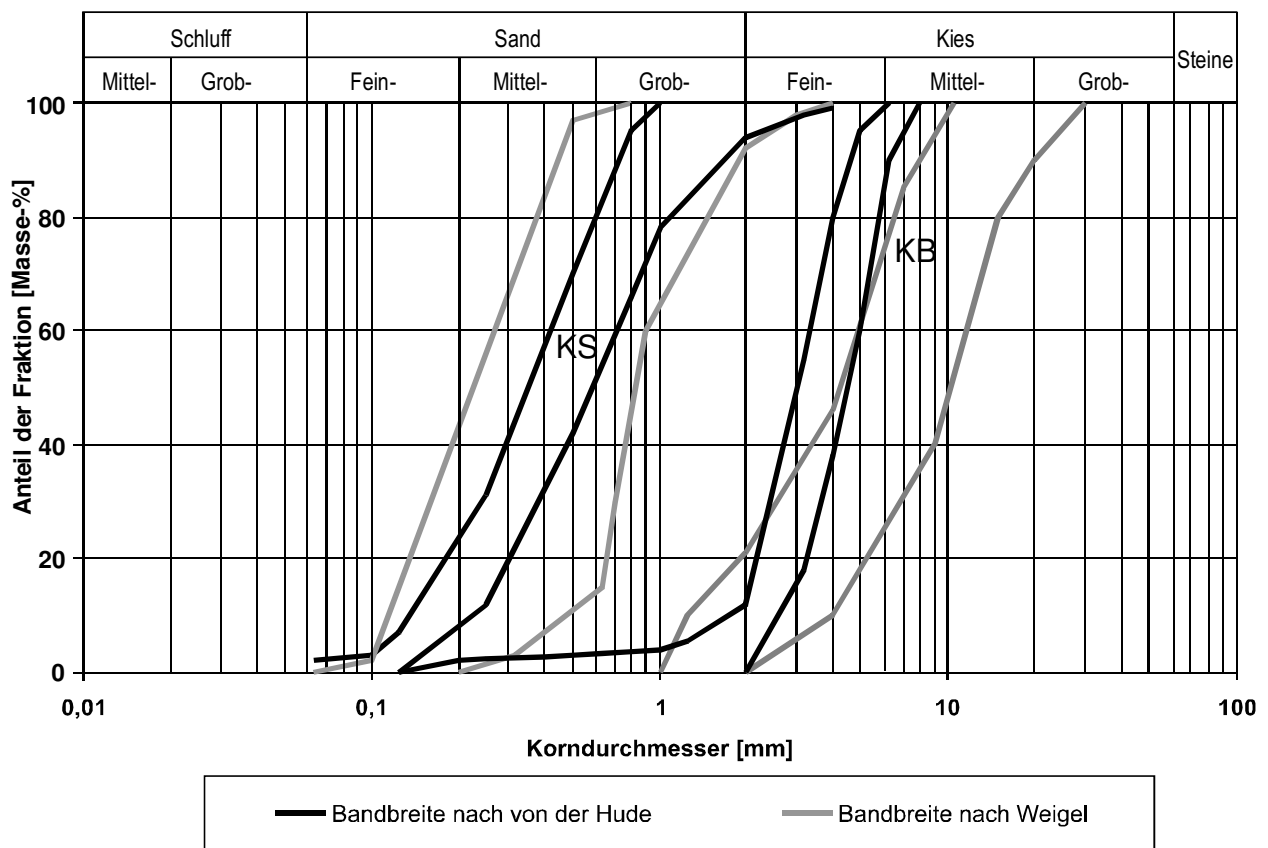


Abbildung 5.4: Bandbreiten günstiger Kornverteilungskurven für Kapillarschicht (KS)- und Kapillarblock (KB)-Materialien nach WEIGEL (1993) - grau - und VON DER HUDE (1999) - schwarz -

Eine Einordnung der Kornsummenkurven der Materialien aus Abbildung 5.1 in die genannten Bandbreiten zeigt, dass sich die Naturmaterialien N-KB-2/5 und N-KS-0/2(Ems) gut mit den Anforderungen für Kapillarblock und Kapillarschicht nach VON DER HUDE (1999) decken. Auch N-KS-0/2(Rhein/Main) kann noch im groben Bereich dieser Kapillarschichtbandbreite eingeordnet und mit N-KB-2/5 als geeignete Kombination betrachtet werden (Abb. 5.5).

Die Kornverteilungskurven der Recyclingmaterialien R-KB-2/11 und R-KB-Q-2/10 entsprechen dem Verlauf der als ebenfalls geeignet angesehenen Kapillarblockbandbreite nach WEIGEL (1993) (Abb. 5.6). Im Vergleich zu den Bandbreiten nach VON DER HUDE (1999) sind sie als Beurteilungsbasis für die Eignungsprüfung von Kapillarblockmaterialien im größeren Körnungsbereich von 1 mm bis 16 mm geeignet.

Die zu diesen Blockmaterialien passenden Sande sind wiederum die Natursande N-KS-0/2(Ems) und N-KS-0/2(Rhein/Main), die sich gut in die entsprechende Kapillarschichtbandbreite einordnen lassen. Das Recyclingmaterial R-KS-Q-0/2 überschreitet knapp die Begrenzung im groben Bereich, erfüllt jedoch die Anforderungen der Ungleichförmigkeit und der Filterstabilität zu den Kapillarblockmaterialien. Deshalb wird dieser Recyclingsand in Kombination mit R-KB-2/11 und R-KB-Q-2/10 auch im Weiteren für den Einsatz in einer Kapillarsperre als potenziell geeignet angesehen.

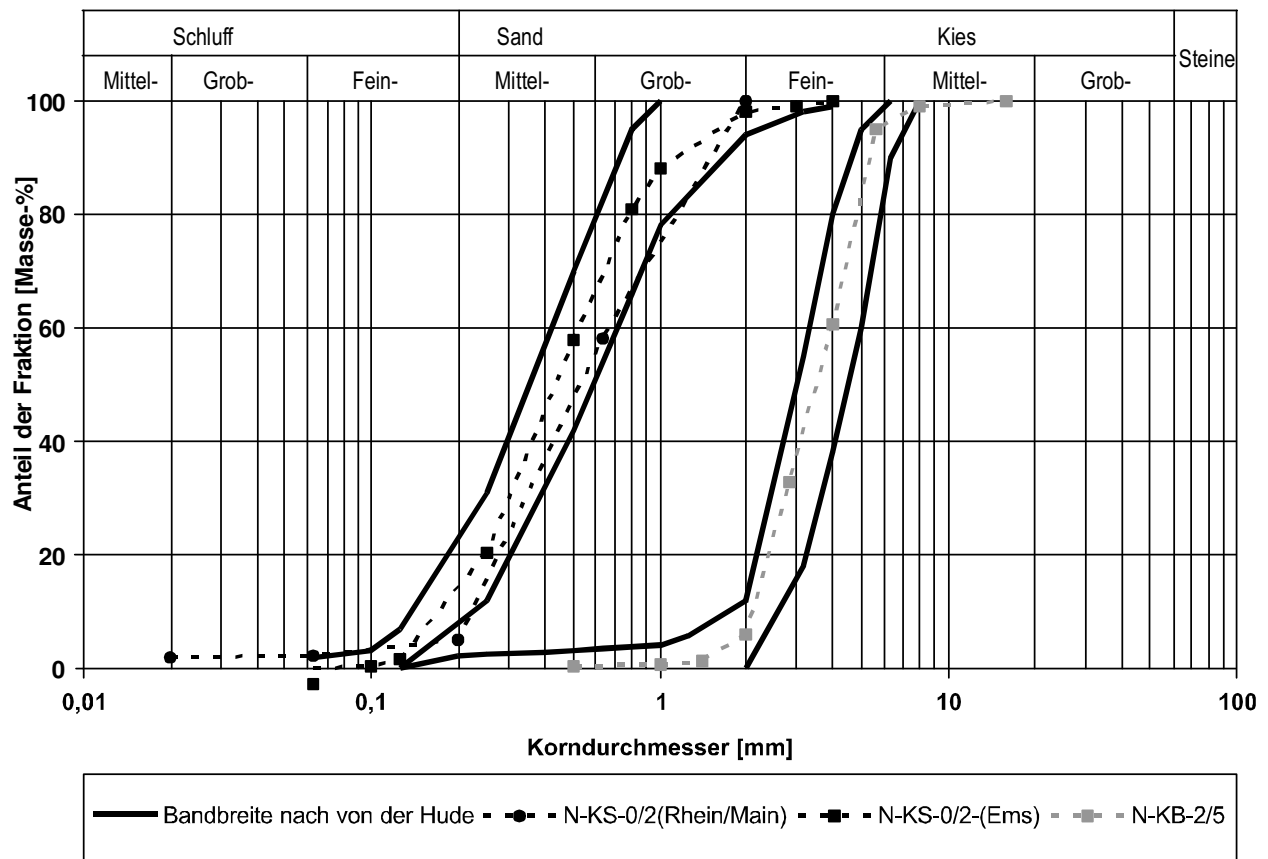


Abbildung 5.5: Einordnung geeigneter Materialien - N-KS-0/2 (Rhein/Main), N-KS-0/2(Ems) und N-KB-2/5 - in die Bandbreiten nach VON DER HUDE (1999)

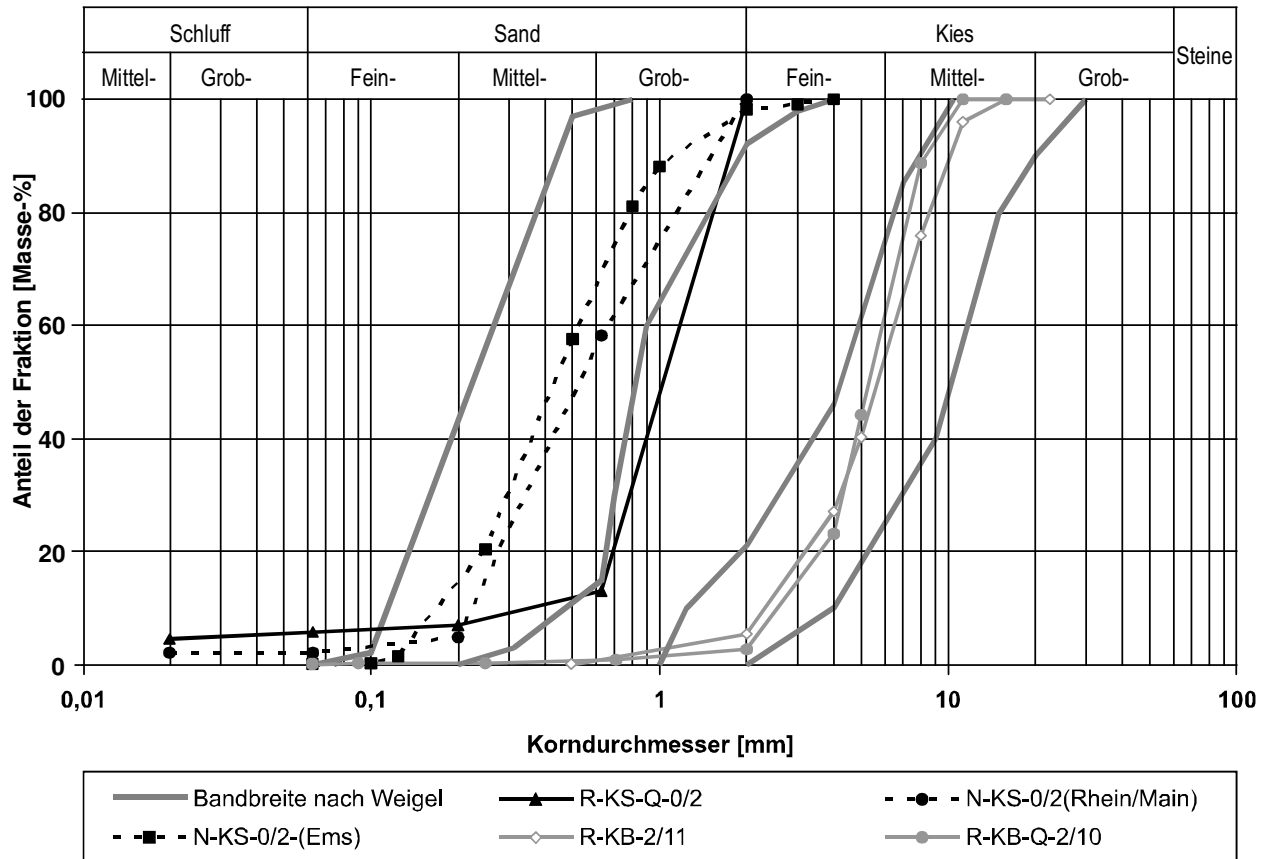


Abbildung 5.6: Einordnung geeigneter Materialien – R-KS-Q-0/2, N-KS-0/2 (Rhein/Main), N-KS-0/2(Ems) und R-KB-2/11 - in die Bandbreiten nach WEIGEL (1993)

Alle anderen Materialien sind im Sinne der Funktionsfähigkeit einer Kapillarsperre aufgrund ihrer Korngrößenverteilung als ungeeignet einzustufen. Das Naturmaterial N-KS-0/1(Rhein/Main) weist eine deutlich zu feine Körnung auf. Die Recyclingsande R-KS-0,71/2, R-KS-0/3 und R-KS-Q-0/3 sind wie auch das Kapillarblockmaterial R-KB-5/22 von zu grober Beschaffenheit, erfüllen aber auch nicht die Anforderungen bezüglich der Ungleichförmigkeit.

Wasserretentionsbeziehung

In den Abbildungen 5.7 und 5.8 sind die Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehungen der Materialien dargestellt, die nach der Einordnung ihrer Korngrößenverteilungen in die Bandbreiten auf geeignete Kapillarsperrenkombinationen hinweisen. In Abbildung 5.7 ist den Kapillarblockmaterialien (R-KB-2/11, R-KB-Q2/10 und N-KB-2/5) der Bauschuttrecyclingsand R-KS-Q-0/2 gegenübergestellt während Abbildung 5.8 den Vergleich zwischen den Natursanden N-KS-0/2(Rhein/Main) sowie N-KS-0/2(Ems) mit den Kapillarblockmaterialien (R-KB-2/11, R-KB-Q2/10 und N-KB-2/5) zeigt.

Die Kapillarblockmaterialien zeigen erwartungsgemäß bei steigendem Matrixpotenzial sehr steile Kurven der Entwässerung. R-KB-2/11 besitzt ein Gesamtporenvolu-

men von 42 Vol.-%, das nach vollständiger Sättigung bei 4,5 hPa auf 2,3 Vol.-% entwässert. Die Entwässerung des Materials R-KB-Q-2/10 von 40 Vol.-% bei Sättigung auf den Restwassergehalt von etwa 3 Vol.-% ist bis 15 hPa zu beobachten. Der Naturkies gibt das Porenwasser bis auf einen Restwassergehalt von etwa 2 Vol.-% bereits bis 10 hPa ab. Die frühzeitige Entwässerung der Kapillarblockmaterialien bei steigender Wasserspannung äußert sich in sehr geringen Lufteintrittswerten. Die von BAUER (2001) aufgestellte Forderung eines Lufteintrittswerts von 1 hPa können sowohl das Naturmaterial N-KB-2/5 als auch die Kiese aus Recyclingmaterial erfüllen.

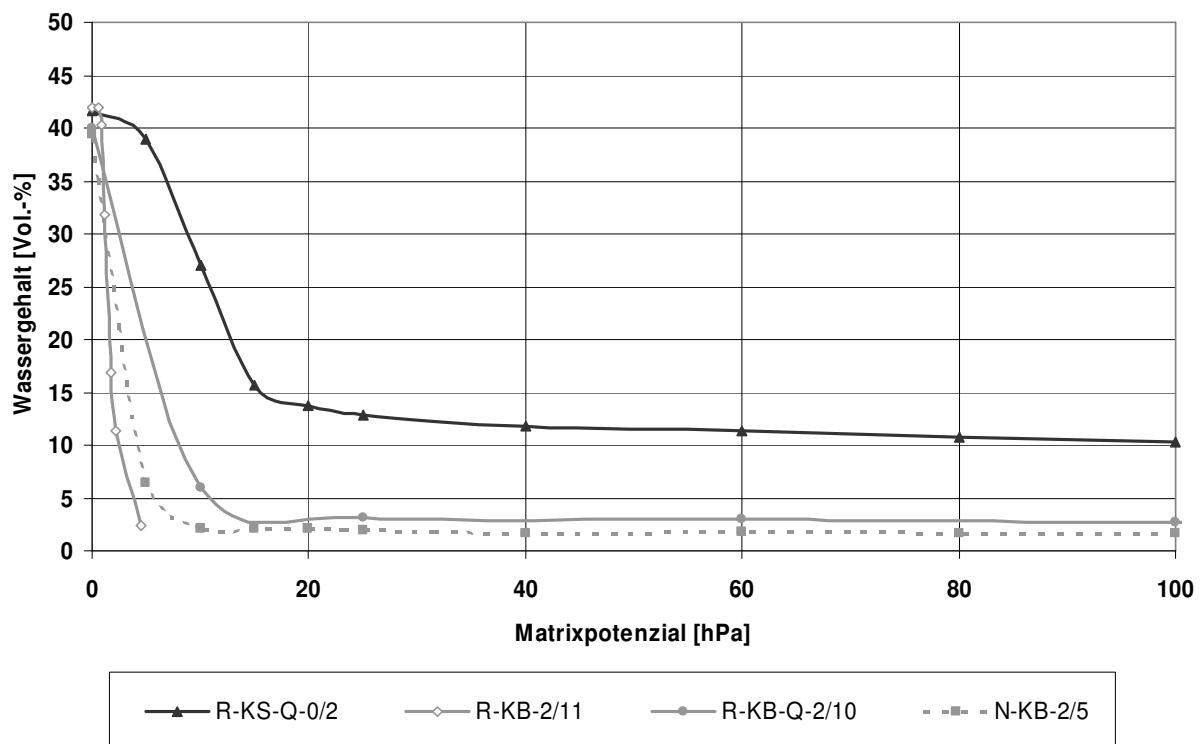


Abbildung 5.7: Gegenüberstellung der Wasserretentionsbeziehungen des Bauschuttrecyclingsands R-KS-Q-0/2 mit den Kapillarblockmaterialien R-KB-2/11, R-KB-Q-2/10 sowie N-KB-2/5

Das Gesamtporenvolumen bzw. der Wassergehalt des Recyclingsands R-KS-Q-0/2 unter gesättigten Verhältnissen liegt bei etwa 42 Vol.-% und weist bei 5 hPa noch Werte nahe Sättigung auf. Der Verlauf der Retentionskurve von R-KS-Q-0/2 sinkt bis 15 hPa auf ca. 16 Vol.-% Wassergehalt ab. Der Restwassergehalt liegt bei ca. 10 Vol.-%. Dieser relativ hohe Wert könnte ein Hinweis auf die Eigenporosität dieses Materials sein.

Nach BAUER (2001) sollte das Kapillarschichtmaterial einen Lufteintrittswert zwischen 10 hPa und 44 hPa besitzen. R-KS-Q-0/2 unterschreitet diese Vorgabe leicht.

In Abbildung 5.8 sind die Natursande N-KS-0/2(Rhein/Main) und N-KS-0/2(Ems) den Kapillarblockmaterialien R-KB-2/11, R-KB-Q-2/10 sowie N-KB-2/5 gegenübergestellt. Im Vergleich zu den Recyclingsanden bleibt der Wassergehalt der Natursande N-KS-0/2(Ems) und N-KS-0/2(Rhein/Main) bis 15 hPa nahezu konstant. Der Lufteintrittswert der Mittelsande kann somit bei etwas unter 20 hPa festgesetzt werden. Die Kurven fallen anschließend steil ab bis auf etwa 11 Vol.-% bzw. 6 Vol.-% Wassergehalt bei 40 hPa. Bei 100 hPa weisen sie einen Restwassergehalt von etwa 4 Vol.-% auf.

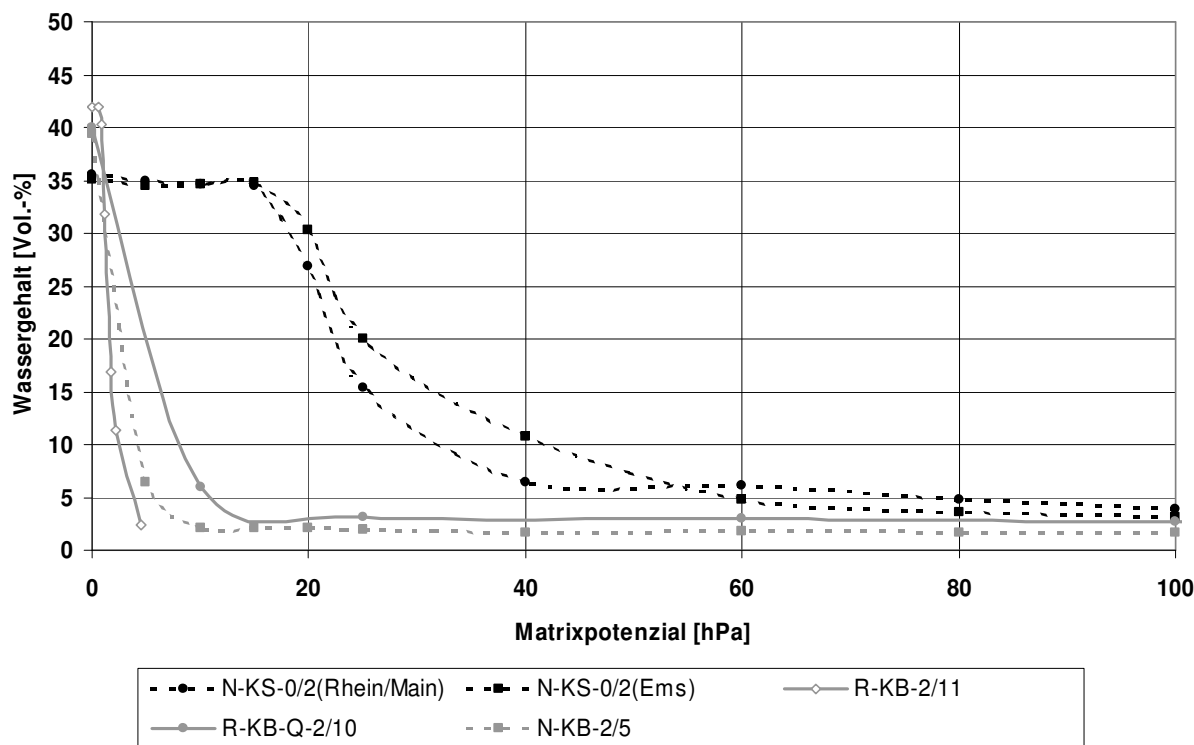


Abbildung 5.8: Gegenüberstellung der Wasserretentionsbeziehungen der Natursande N-KS-0/2(Rhein/Main) und N-KS-0/2(Ems) mit den Kapillarblockmaterialien R-KB-2/11, R-KB-Q-2/10 sowie N-KB-2/5

Im Recyclingsand überwiegen die Porengrößen von 150-300 μm und $> 300 \mu\text{m}$ (Abb. 5.9). Mit 10,3 Vol.-% nehmen aber auch die engen Grobporen ($< 30 \mu\text{m}$) einen großen Anteil des Gesamtporenvolumens von ca. 42 Vol.-% ein. Bei den Natursanden zeigen die Porengrößen 75-150 μm den größten Anteil in der Porengrößenverteilung, während die engen Grobporen mit ca. 3 Vol.-% (N-KS-0/2(Ems)) bzw. ca. 4 Vol.-% (N-KS-0/2(Rhein/Main)) im Vergleich zum Recyclingsand nur einen geringen Anteil einnehmen. Der höhere Anteil der Poren $< 30 \mu\text{m}$ in R-KB-Q-0/2 verglichen mit den Natursanden bedingt offensichtlich keine höhere Kapillarität bzw. keinen höheren Lufteintrittswert, der um nahezu 10 hPa geringer ist als bei N-KS-0/2(Ems) und N-KS-0/2(Rhein/Main). Dies bewirken sicherlich zum einen die hohen Anteile der Poren $> 150 \mu\text{m}$, zum anderen weisen die Bestandteile des Recyclingsands Beton und Asphalt (weniger der Naturstein) eine geringere Dichte (vgl.

Tab.5.2) und damit eine höhere Eigenporosität auf (ETTEL 2003, ROGOSCH 2003). Die inneren Poren der Recyclingsandkörner werden zwar bei der Ermittlung der Wasserretentionsbeziehung in den Drucktopfuntersuchungen erfasst, haben aber aufgrund des doppelporigen Systems keinen Einfluss auf die Kapillarität.

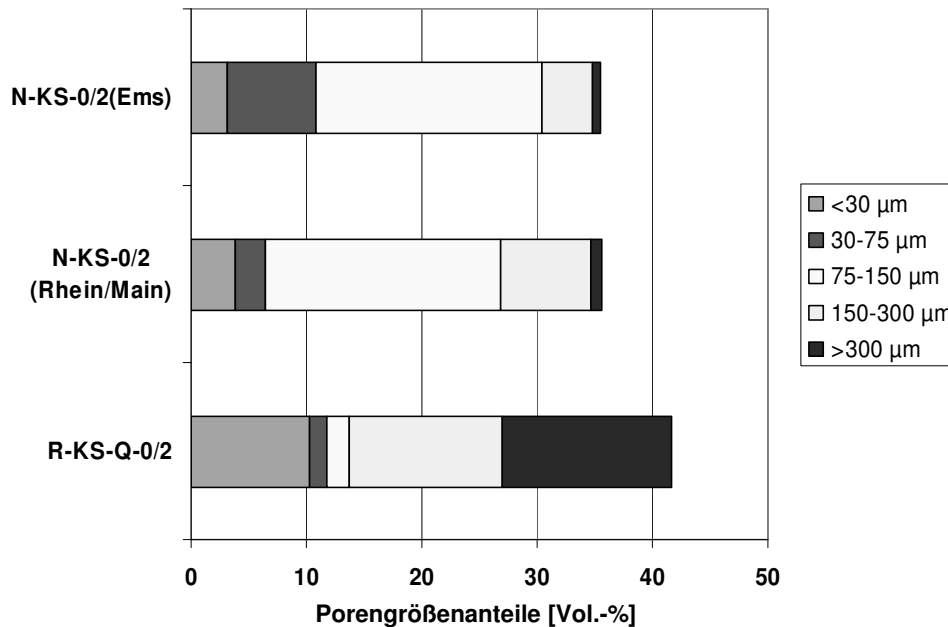


Abbildung 5.9: Porengrößenverteilungen der Kapillarschichtmaterialien R-KS-Q-0/2, N-KS-0/2(Rhein/Main) und N-KS-0/2(Ems)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Natursande N-KS-0/2(Ems) sowie N-KS-0/2(Rhein/Main), der Naturkies N-KB-2/5 bzw. die Kapillarschichtmaterialien R-KB-2/11 und R-KB-Q-2/10 nach ihrer Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung als Kapillarsperrenmaterialien geeignet sind. Das Material R-KS-Q-0/2 weist aufgrund des etwas zu geringen Lufteintrittswertes nach den Empfehlungen von BAUER (2001) eine eingeschränkte Eignung auf.

Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Die nach BEYER (1964) berechneten gesättigten Wasserleitfähigkeiten der Kapillarschichtmaterialien erfüllen alle das Gütekriterium nach BAUER (2001), wonach der k_f -Wert $\geq 5 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ betragen soll (Tabelle 5.9). Der Richtwert des VKS, ATV-DVWKs (PALM ET AL. 2003) für die gesättigte Wasserleitfähigkeit von $\geq 1 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ kann nur noch das Material R-KS-0,71/2 einhalten, wenn von den mittels Haubenpermeameter gemessenen Werten ausgegangen wird. KHIRE ET AL. (1999) konnten die Eignung von Materialien für den Einsatz als Kapillarschicht mit gesättigten Leitfähigkeiten von etwa $2 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis $6 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ nachweisen.

Die nach BEYER (1964) berechneten k_f -Werte überschätzen das jeweilige geometrische Mittel der gemessenen gesättigten Leitfähigkeiten um ca. eine Viertel bis über eine Zehnerpotenz bei R-KS-Q-0/2. Der Grund der Überschätzung dürfte ins-

besondere darin gesehen werden, dass die Porenkontinuität bei der Berechnung nicht berücksichtigt wird. Die gemessenen k_f -Werte zeigen eine Variationsbreite ($k_{f \text{ Max}} - k_{f \text{ Min}}$) von bis zu über einer halben Zehnerpotenz (R-KS-Q-0/2, N-KS-0/2(Rhein/Main), N-KS-0/2(Ems)).

Tabelle 5.9: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) der Kapillarschichtmaterialien (gemessen) und nach BEYER (1964) berechnet

Kapillarschichtmaterial	k_f [m^*s^{-1}] gemessen	n	Min	Max	k_f [m^*s^{-1}] nach BEYER
R-KS-0/3	$5,8 \cdot 10^{-5}$	5	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
R-KS-0,71/2	$1,1 \cdot 10^{-4}$	6	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
R-KS-Q-0/3	$8,1 \cdot 10^{-5}$	5	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$
R-KS-Q-0/2	$9,9 \cdot 10^{-5}$	9	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
N-KS-0/1(Rhein/Main)	$2,9 \cdot 10^{-5}$	6	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$6,4 \cdot 10^{-5}$
N-KS-0/2(Rhein/Main)	$7,5 \cdot 10^{-5}$	6	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$
N-KS-0/2(Ems)	$8,8 \cdot 10^{-5}$	35	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$

Aufgrund der Porengrößenverteilung (vgl. Abb. 5.9) wurde für den Recyclingsand R-KS-Q-0/2 im Vergleich zu den Natursanden N-KS-0/2(Rhein/Main) und N-KS-0/2(Ems) eine deutlich höhere gesättigte Wasserleitfähigkeit erwartet, da ein wesentlich höherer Anteil von Poren $> 150 \mu m$ für die Wasserbewegung zur Verfügung steht. Die nach BEYER (1964) berechneten k_f -Werte der genannten Kapillarschichtmaterialien zeigen einen Unterschied von etwa einer halben Zehnerpotenz, was durchaus der Variationsbreite unter natürlichen Bedingungen entsprechen kann bzw. bei den gemessenen gesättigten Leitfähigkeiten beobachtet wurde. Die Differenz der gemessenen k_f -Werte zwischen dem Recyclingsand R-KS-Q-0/2 und den Natursanden N-KS-0/2(Rhein/Main) bzw. N-KS-0/2(Ems) ist sogar noch geringer.

Eine Erklärung für diesen Sachverhalt kann in der Eigenporosität des Materials R-KS-Q-0/2 liegen, auf die der relativ hohe Restwassergehalt von über 10 Vol.-% der Wasserretentionskurve hindeutet. Aufgrund des doppelporigen Systems muss davon ausgegangen werden, dass die Poren im Inneren der Recyclingsandkörner kaum für einen Wasserfluss zur Verfügung stehen. Damit verringert sich das für die Wasserleitfähigkeit verantwortliche Porenvolumen und somit der k_f -Wert.

Die gesättigten Leitfähigkeiten der Kapillarschichtmaterialien wurden nach BEYER (1964) berechnet, die Ergebnisse sind in der Tabelle 5.10 zusammengestellt. Nach BAUER (2001) sollte der Wert von etwa $10^{-3} m^*s^{-1}$ Zielgröße sein. Die berechneten gesättigten Leitfähigkeiten der Kapillarschichtmaterialien können ca. um eine halbe Zehnerpotenz höher eingestuft werden.

Tabelle 5.10: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) der Kapillarblockmaterialien nach BEYER 1964 berechnet

Kapillarblockmaterial	k_f [$m*s^{-1}$] nach BEYER
R-KB-2/11	$3,61*10^{-2}$
R-KB-5/22	$5,63*10^{-2}$
R-KB-Q-2/10	$3,25*10^{-2}$
N-KB-2/5	$4,85*10^{-2}$

Der gesättigten Wasserleitfähigkeit der Kapillarschichtmaterialien muss weit mehr Bedeutung beigemessen werden als der des Kapillarblocks. Denn in der Kapillarschicht herrschen an der Schichtgrenze zum Kapillarblock und einige cm darüber, insbesondere bei hohen Belastungen, Matrixpotenziale unterhalb des Lufteintrittswerts (STEINERT 1999, VON DER HUDE 1999), denen Wassergehalte nahe Sättigung gegenüberstehen (vgl. Abb. 5.7 und 5.8). Somit kann der k_f -Wert als erste Orientierung dienen, welche Wassermengen maximal in der Kapillarschicht abgeführt werden können.

Ungesättigte Wasserleitfähigkeit

Die Abbildung 5.10 zeigt die berechneten Funktionen der ungesättigten Wasserleitfähigkeit der Natur- bzw. Recyclingsande N-KS-0/2(Rhein/Main), N-KS-0/2(Ems), R-KS-Q-0/2 im direkten Vergleich zu den Kapillarblockmaterialien N-KB-2/5, R-KB-2/11 und R-KB-Q-2/10.

Die Wasserleitfähigkeiten der Kapillarblockmaterialien N-KB-2/5 und R-KB-Q-2/10 bewegen sich bei 100 hPa im Bereich von $1*10^{-14} m*s^{-1}$ bis $2,5*10^{-14} m*s^{-1}$ und zeigen bei 40 hPa noch Werte um $1*10^{-11} m*s^{-1}$. Die Leitfähigkeiten von R-KB-2/11 liegen in diesen Wasserspannungsbereichen zwei bis drei Zehnerpotenzen darunter. Bis etwa 20 hPa weisen N-KB-2/5 und R-KB-Q-2/10 noch Leitfähigkeiten in der Größenordnung von $< 5*10^{-9} m*s^{-1}$ auf. Mit der weiteren Abnahme des Matrixpotenzials steigt die ungesättigte Wasserleitfähigkeit stark an. Im Bereich von 5 hPa bis 3 hPa kreuzen die Wasserleitfähigkeitsfunktionen der Kapillarblockmaterialien die der Kapillarschichtsannde R-KS-Q-0/2, N-KS-0/2(Rhein/Main) bzw. N-KS-0/2(Ems) (Abb. 5.10), um sie bei gesättigten Verhältnissen um mehrere Zehnerpotenzen zu überschreiten.

Der Verlauf der Wasserleitfähigkeitsfunktionen des Recyclingsands R-KS-Q-0/2 zeigt erwartungsgemäß bei Matrixpotenzialen bis 20 hPa einen wesentlich geringeren Abfall der Leitfähigkeiten im Vergleich zu den Kapillarblockmaterialien. Während sich die k_u -Werte von R-KS-Q-0/2 und den Kapillarblockmaterialien bei Matrixpotenzialen von 3 bis 5 hPa noch nahezu entsprechen, übersteigt bereits ab 10 hPa die hydraulische Leitfähigkeit des Recyclingsands die der Kapillarblockmaterialien um mehr als eine bis drei Zehnerpotenzen. Die Differenz der k_u -Funktion von

R-KS-Q-0/2 zu N-KB-2/5 und R-KB-2/11 liegt zwischen 20 hPa bis 100 hPa bei ca. zwei Zehnerpotenzen, während sich der Unterschied der Leitfähigkeitsfunktionen des Recyclingsands zu R-KB-Q-2/10 von ca. 4 Zehnerpotenzen bei 20 hPa auf fast 5 Zehnerpotenzen bei 100 hPa ausweitet.

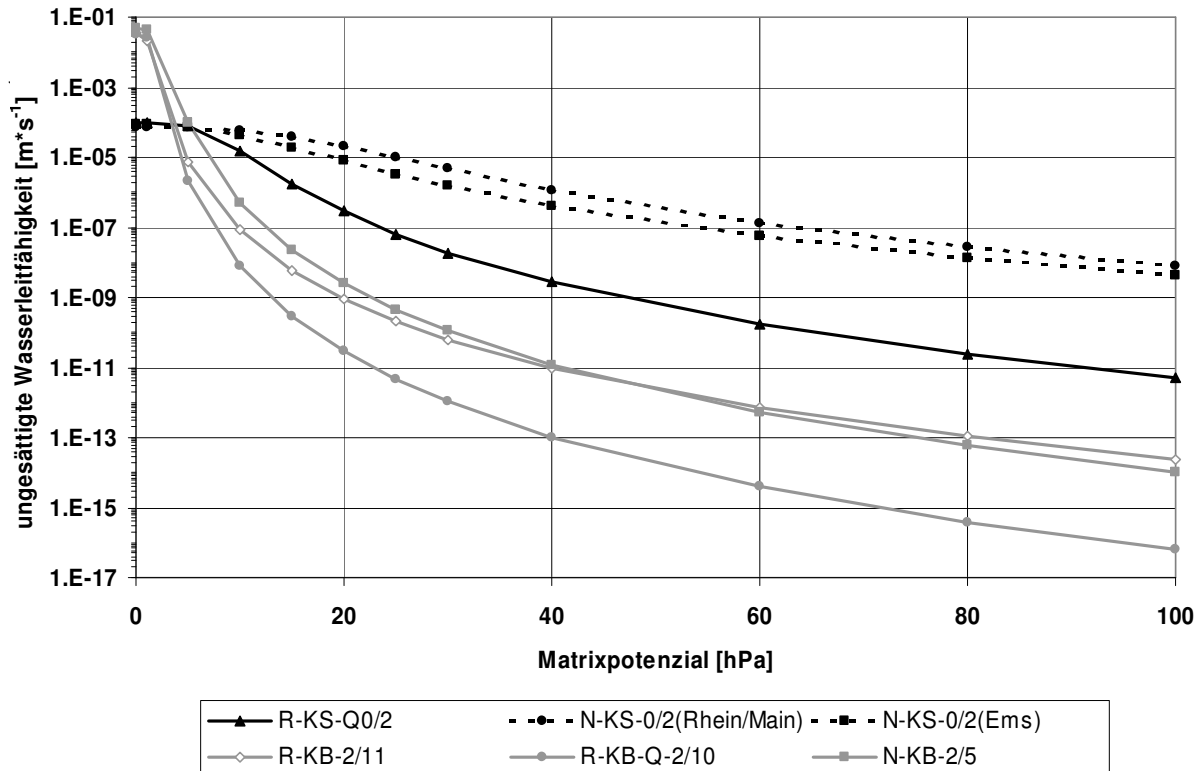


Abbildung 5.10: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für verschiedene Kapillarschicht und -blockmaterialien

Der Schnittpunkt der k_u -Funktionen der Natursande N-KS-0/2(Rhein/Main) bzw. N-KS-0/2(Ems) mit denen der Kapillarblockmaterialien liegen ebenfalls in dem Matrixpotenzialbereich von 3 bis 5 hPa. Bei 10 hPa zeigen die Natursande mit k_u -Werten von 4 bis $6 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ einen Unterschied von $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis $10.000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ im Vergleich zu den Kiesen. Bis 40 hPa hat sich die Differenz zwischen den Sanden N-KS-0/2(Ems) bzw. N-KS-0/2(Rhein/Main) und den Kiesen N-KB-2/5 sowie R-KB-2/11 auf ca. fünf Zehnerpotenzen ausgeweitet. Zwischen den Natursanden und R-KB-Q-2/10 herrscht bei 40 hPa ein Unterschied in den ungesättigten Leitfähigkeiten von etwa sieben Zehnerpotenzen. Diese beschriebenen Abstände zwischen den hydraulischen Leitfähigkeitsfunktionen der Materialien werden bis 100 hPa beibehalten, wo die Sande N-KS-0/2(Ems) bzw. N-KS-0/2(Rhein/Main) Leitfähigkeiten von 4 bis $8 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ aufweisen.

Ein wichtiger Parameter für die Funktion und die Leistungsfähigkeit der Kapillarsperre ist die Differenz zwischen den hydraulischen Leitfähigkeiten der beiden Kapillarsperrenmaterialien. BAUER (2001) empfiehlt, dass bei einem Matrixpotenzial von

100 hPa die ungesättigte Leitfähigkeit des Kapillarschichtmaterials einen k_u -Wert von $> 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ und die des Kapillarblocks einen k_u -Wert von $< 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ erreichen sollte. Entscheidender ist es jedoch, die Differenz der Leitfähigkeiten auch in dem Wasserspannungsbereich garantieren zu können, der überwiegend bei Belastung in einer Kapillarsperre herrscht. Nach STEINERT (1999) ist dies ein Bereich zwischen 10 und 40 hPa. VON DER HUDE (1999) registrierte bei hohen Belastungen stets Matrixpotenziale unter 20 hPa.

Die höchsten ungesättigten Wasserleitfähigkeiten bei Matrixpotenzialen bis 20 hPa sind bei den Natursanden zu beobachten. Sie zeigen bei 20 hPa k_u -Werte von $> 1 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, während bei R-KS-Q-0/2 eine ungesättigte Wasserleitfähigkeit von $2,9 \cdot 10^{-7}$ berechnet wurde. Diese deutlichen Unterschiede finden ihre Ursache in den Wasserretentionsbeziehungen der Materialien. Die höhere Kapillarität bzw. der größere Lufttrittswert der Natursande N-KS-0/2(Ems) und N-KS-0/2(Rhein/Main) bedingen, dass bei den Matrixpotenzialen, die in der Kapillarschicht - insbesondere an der Grenzschicht - herrschen, ein größerer Porenanteil für die Wasserbewegung zur Verfügung steht und somit mehr Wasser abgeleitet werden kann als bei dem Recyclingsand R-KS-Q-0/2. Dennoch zeigen sich zwischen den hydraulischen Wasserleitfähigkeiten von R-KS-Q-0/2 und den Kapillarblockmaterialien, in dem für Kapillarsperren relevanten Matrixpotenzialbereich, Differenzen von mehreren Zehnerpotenzen, was auf eine Eignung als Kapillarsperrenmaterial hindeutet.

Kornzertrümmerungsversuch

Die Recyclingsande zeigen im Rahmen des Kornzertrümmerungsversuchs Abhängigkeiten des Feinkornanteils $< 0,125 \text{ mm}$ von den Belastungsstufen (Abb 5.11). Der Feinkornanteil $< 0,125 \text{ mm}$ steigt verstärkt bei den Materialien R-KS-0/3 und R-KS-Q-0/3 mit 6,5 Massen-% bzw. ca. 4,5 Massen-% bereits nach 6 Belastungsschlägen an. R-KS-Q-0/2 zeigt nach 12 Schlägen eine Zunahme von nur 2,5 Massen-% im Vergleich zum Referenzwert ohne Belastung. Nach dieser anfänglichen größeren Steigerung der Fraktion $< 0,125 \text{ mm}$ kann bis zur Belastung von 48 Schlägen bei den drei Recyclingsanden kaum eine Veränderung dieses Fraktionsanteils registriert werden. Dennoch kann statistisch für R-KS-Q-0/2 und R-KS-Q-0/3 eine Abhängigkeit des Feinkornanteils von der Belastung nachgewiesen werden. Nach 96 Schlägen weisen die Materialien um weitere 2,5 Massen-% bzw. 3,5 Massen-% höhere Kornanteile $< 0,125 \text{ mm}$ auf, die signifikant unterschiedlich zu den entsprechenden Fraktionsanteilen der Referenzproben sind. In den Belastungsbereichen von 12 bis 48 Schlägen besteht allerdings nur ein signifikanter Unterschied zur Referenzprobe bzw. der höchsten Belastungsstufe.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich der Schluss ziehen, dass die Recyclingsande nach einem ersten Ablösen von Feinanteilen in Folge geringer Belastungen eine große Kornstabilität aufweisen.

Nach KÄMPF ET AL. (1999) sind 48 Schläge im Rahmen des Kornzertrümmerungsversuchs repräsentativ für die auf Kapillarsperrenmaterialien ausgeübten Belastungen während des Baustellenbetriebs. Sie weisen auf einen gewissen Einfluss der Feinkornfraktion $< 0,125$ mm auf die hydraulische Leistungsfähigkeit der Kapillarschicht hin. Aus diesem Grund legen sie fest, dass nach der Belastung von 48 Schlägen dieser Fraktionsanteil um maximal 3 Masse-% zunehmen darf. Diese Vorgabe wird nur von R-KS-Q-0/2 erfüllt. Bei den Materialien R-KS-Q-0/3 und R-KS-0/3 besteht die Gefahr, dass sich unter mechanischer Beanspruchung die Korngrößenverteilung verändert und somit weder der nötige Porensprung zwischen Kapillarschicht und -block noch die Filterstabilität der beiden Materialien zueinander gewährleistet werden kann. R-KS-Q-0/2 weist unter Belastungen, die einer Beanspruchung im Baustellenbetrieb gleichgesetzt wird (KÄMPF ET AL. 1999), eine ausreichende Stabilität auf, so dass das Material diesbezüglich für den Einsatz als Kapillarsperrenmaterial als geeignet angesehen werden kann.

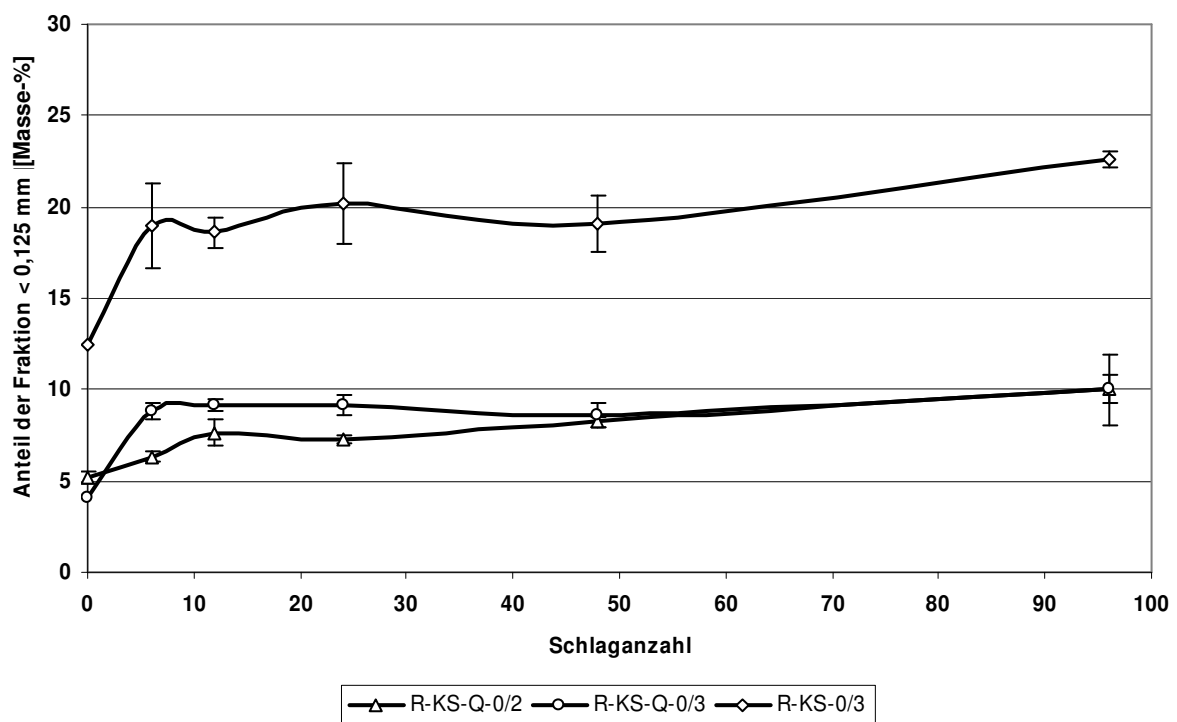


Abbildung 5.11: Abhängigkeit des Feinkornanteils $< 0,125$ mm der Materialien R-KS-0/3 ($\rho=2,55 \text{ g*cm}^{-3}$), R-KS-Q-0/3 ($\rho=2,6 \text{ g*cm}^{-3}$) und R-KS-Q-0/2 ($\rho=2,6 \text{ g*cm}^{-3}$) von der mechanischen Belastung im Kornzertrümmerungsversuch (Fehlerbalken stellen Standardabweichung dar)

In den Abbildungen 5.12 bis 5.14 sind die Kornsummenkurven der Kapillarsperrenmaterialien R-KB-2/11, R-KB-5/22 und R-KB-Q-2/10 ohne Belastung, nach 48 und nach 96 Belastungsschlägen dargestellt. Es kann beobachtet werden, dass das Material R-KB-2/11 bei mechanischer Beanspruchung stärker reagiert als die anderen beiden Materialien (Abb. 5.12). Insbesondere die Fraktion bis etwa 2 mm nimmt nach 48 Schlägen mit mehr als 11 Masse-% stark zu. 96 Schläge führen bezüglich der 48 Schläge zu einer weiteren Steigerung dieser Fraktion um weniger als 5 Masse-%.

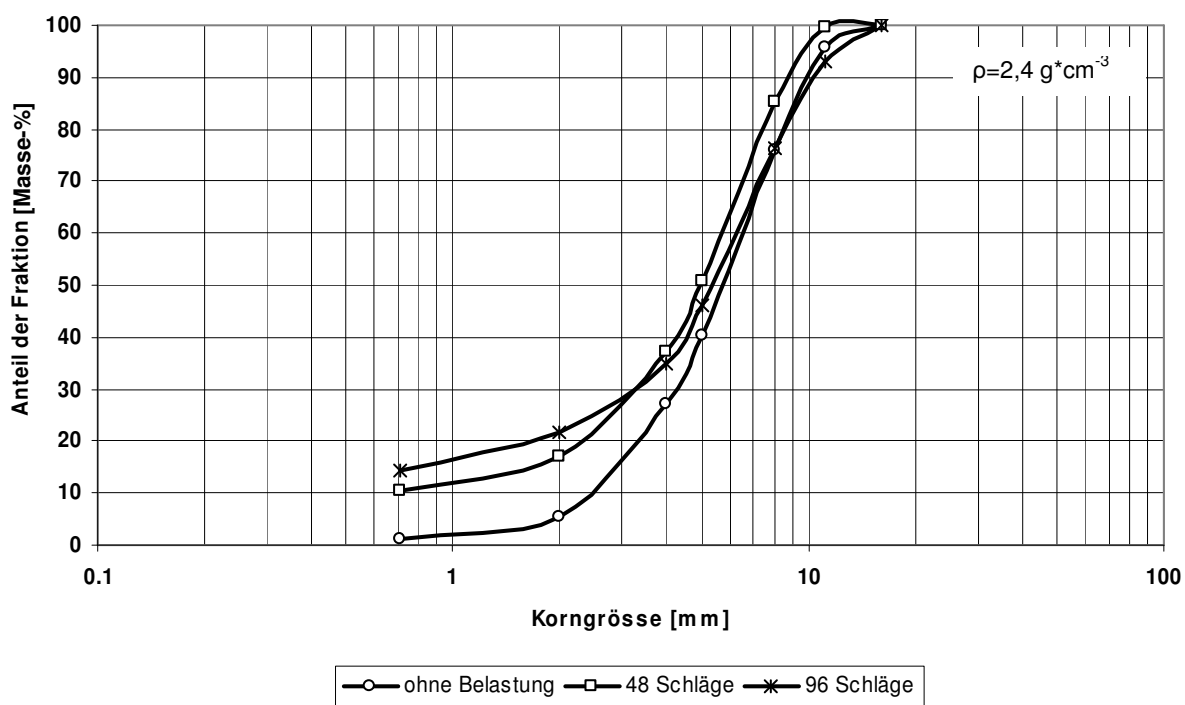


Abbildung 5.12: Korngrößenverteilungen von R-KB-2/11 vor und nach mechanischer Belastungen von 48 und 96 Schlägen

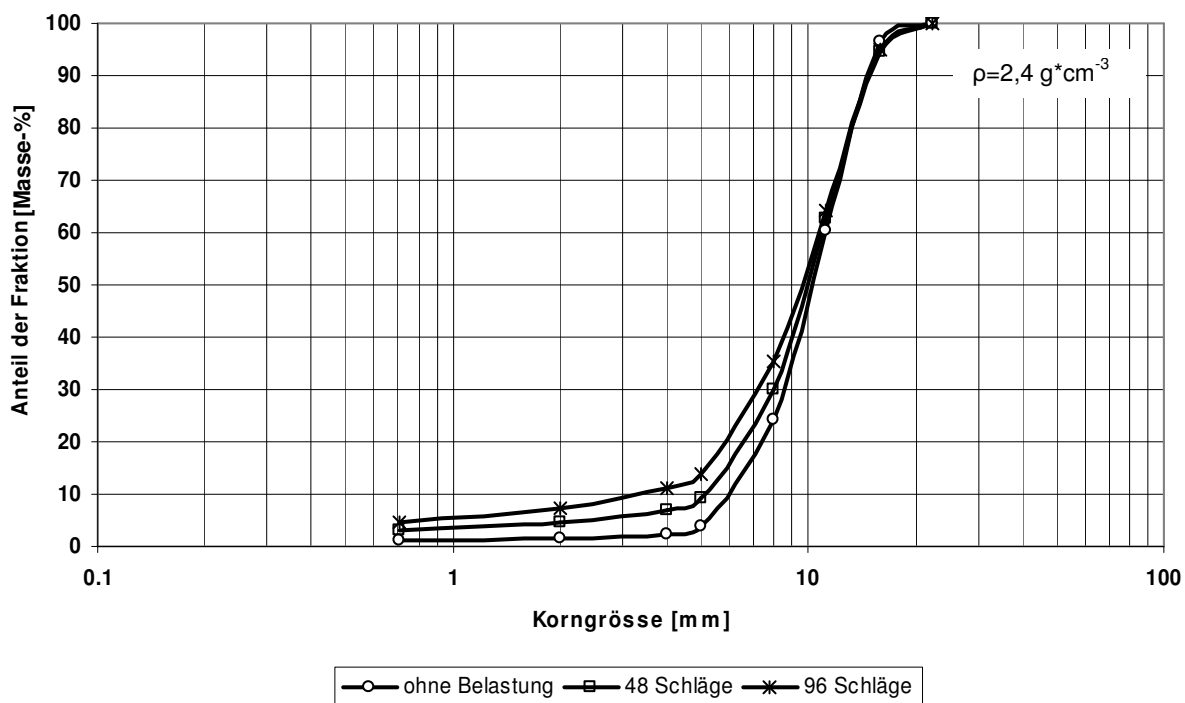


Abbildung 5.13: Korngrößenverteilungen von R-KB-5/22 vor und nach mechanischer Belastungen von 48 und 96 Schlägen

R-KB-5/22 zeigt hingegen eine nahezu gleichmäßige Steigerung der Fraktionen in

Abhängigkeit der Anzahl der Belastungsschläge (Abb. 5.13). Allerdings zeigt sich die Reaktion auf die mechanische Beanspruchung nicht wie bei R-KB-2/11 in den Fraktionen < 2 mm, sondern verstärkt in dem Bereich zwischen 2 mm und etwa 8 mm. Dabei handelt es sich um Veränderungen von etwa 5 Masse-%.

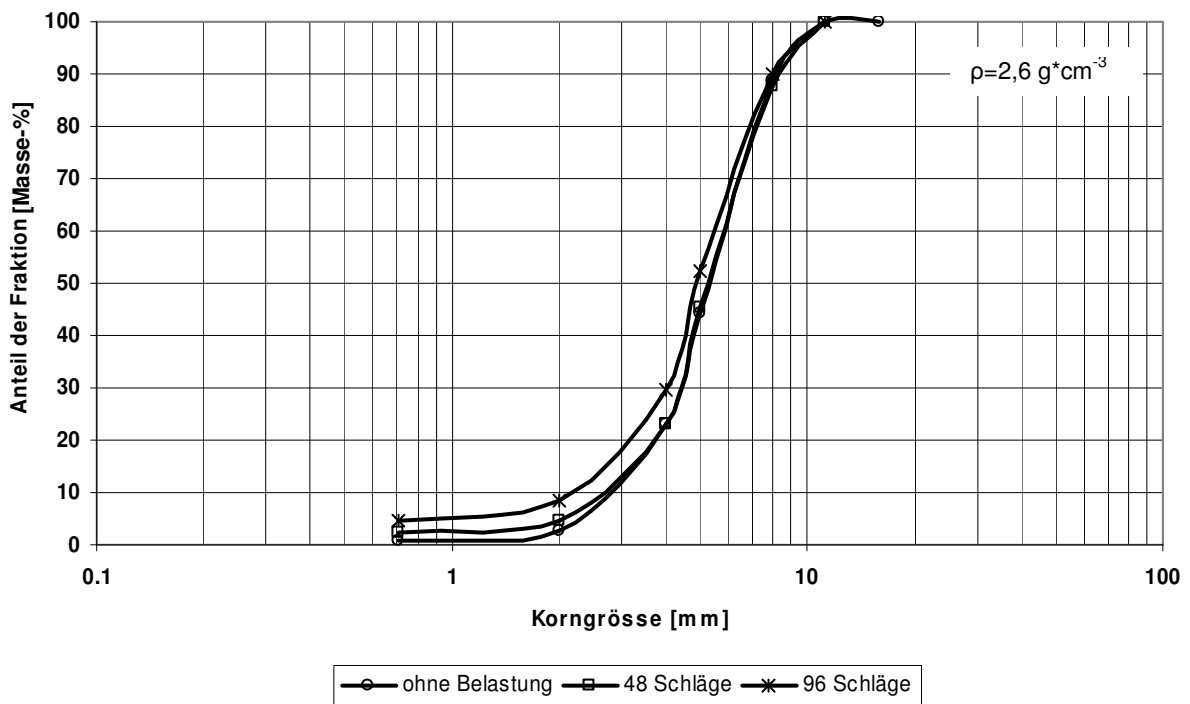


Abbildung 5.14: Korngrößenverteilungen von R-KB-Q-2/10 vor und nach mechanischer Belastungen von 48 und 96 Schlägen

R-KB-Q-2/10 weist im Vergleich dazu die geringsten Veränderungen in der Kornsummenkurve nach 48 Schlägen auf (Abb. 5.14). Die Fraktionen $< 0,71$ mm und < 2 mm nehmen weniger als 2 Masse-% zu. Nach 96 Schlägen wird vermehrt die Fraktion um 4 mm beeinflusst. Aber auch nach dieser Belastungsstufe sind die Veränderungen als unbedeutend einzustufen.

Die Abhängigkeit des Feinkornanteils $< 0,5$ mm des Materials R-KB-Q-2/10 von der mechanischen Belastung ist in der Abbildung 5.15 wiedergegeben. Dieser Versuch musste aus versuchstechnischen Gründen unabhängig von dem vorangestellten durchgeführt werden. Es wird deutlich, wie stark die Ergebnisse der Kornzertrümmerung von dem Anfangsgehalt der Feinfraktion jedes Einzelversuchs beeinflusst werden. Die Nullprobe von R-KB-Q-2/10 weist schon einen Anteil von etwa 8 Masse-% der Fraktion $< 0,5$ mm auf. Erst ab der Belastung von 12 Schlägen kann eine stetige Zunahme dieser Fraktion auf etwa 7 Masse-% nach 96 Schlägen beobachtet werden. Die Fraktionsanteile $< 0,5$ mm der verschiedenen Belastungsstufen zeigen untereinander keine signifikanten Unterschiede. Statistisch konnte keine Abhängigkeit des Feinkornanteils von der steigenden Belastung nachgewiesen werden.

KÄMPF (2000) konnte mit Hilfe von Kipprinnenversuchen nachweisen, dass der Anteil der Fraktion $< 0,5$ mm des Kapillarblocks einen erheblichen Einfluss auf die laterale Dränkapazität des Kapillarsperrensystems aufweist. Nach seinen Ergebnissen ist ein Kapillarblockmaterial mit einem Anteil von 4 Masse-% der Fraktion $< 0,5$ mm gut geeignet, wohingegen ein Anteil von 8 Masse-% dieser Fraktion nur noch als bedingt geeignet gilt.

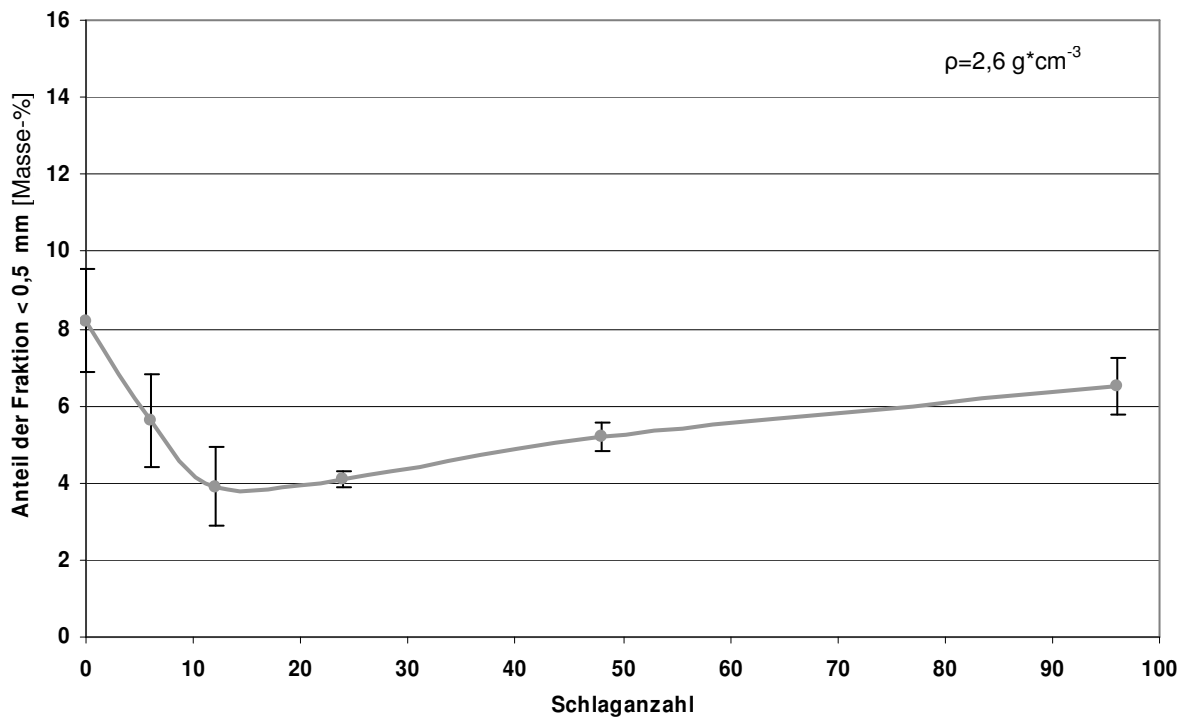


Abbildung 5.15: Abhängigkeit des Feinkornanteils $< 0,5$ mm des Materials R-KB-Q-2/10 von der mechanischen Belastung im Kornzertrümmerungsversuchs (Mittelwert mit Standardabweichung)

Die Materialien R-KB-5/22 und R-KB-Q-2/10 weisen in den Abbildungen 5.13 und 5.14 auch nach der Belastung von 48 Schlägen für die Fraktion $< 0,71$ mm weniger als 4 Masse-% auf, was auf einen noch geringeren Anteil der Fraktion $< 0,5$ mm schließen lässt. Die Überprüfung an dem Qualitätsmaterial zeigt, dass die Zunahme des Feinkornanteils nicht signifikant auf die mechanische Belastung zurückgeführt werden kann, sondern der unterschiedliche Feinkornanteil der Einzelproben vor Einwirken der Belastung von großer Bedeutung ist. Bei einzelner Betrachtung zeigt sich jedoch bei keiner der Belastungsstufen eine Überschreitung der Fraktion $< 0,5$ mm von 8 Masse-%. Aufgrund dieser Ergebnisse ist das Material R-KB-Q-2/10 für den Einsatz als Kapillarblockmaterial als geeignet anzusehen.

Das Material R-KB-2/11 muss in diesem Zusammenhang am kritischsten betrachtet werden, da es am anfälligsten auf mechanische Belastungen reagiert. Die stärkere Kornzertrümmerung von R-KB-2/11 kann auf den größeren Ziegel- und Mauerwerkanteil und der damit verbundenen geringeren Dichte zurückgeführt werden. Sowohl

HARDER & MARTIN (2001) beschreiben eine mangelhafte Kornstabilität für Kapillarschicht- und -blockmaterialien aus Ziegel als auch KÄMPF ET AL. (1999) für einen ziegelreichen RC-Sand als Blockmaterial. Weitere ihrer Kornzertrümmerungsuntersuchungen haben allerdings ergeben, dass Betonmaterialien als Kapillarschicht oder -block geeignet sein können.

Wasseraufnahmefähigkeit

Die Wasseraufnahmefähigkeit der Kapillarschichtsannde aus Bauschutt-Recyclingmaterial liegt über 10 Masse-%. Damit entspricht die Eigenporosität von R-KS-Q-0/2 in etwa dem Restwassergehalt, welcher der Wasserretentionsbeziehung bei 100 hPa entnommen werden kann (vgl. Abb. 5.7) bzw. dem Porenanteil $< 30 \mu\text{m}$ (vgl. Abb. 5.9). Dies erklärt die im Vergleich zu den Natursanden unerwartet geringe gesättigte Wasserleitfähigkeit von R-KS-Q-0/2, da die Porenanteile innerhalb der Recycling-sandkörner nur stark eingeschränkt an der Wasserbewegung teilhaben werden. Die Natursande weisen dagegen nur 1 Masse-% Wasseraufnahme auf (Tab. 5.11).

Tabelle 5.11: Wasseraufnahmefähigkeit der Kapillarschichtmaterialien

Kapillarschichtmaterial	Wasseraufnahmefähigkeit [Masse-%]
R-KS-0/3	12
R-KS-0,71/2	12
R-KS-Q-0/3	10,5
R-KS-Q-0/2	12,3
N-KS-0/1(Rhein/Main)	n. b.
N-KS-0/2(Rhein/Main)	1
N-KS-0/2(Ems)	1

n. b. = nicht bestimmt

Tabelle 5.12: Wasseraufnahmefähigkeit der Kapillarblockmaterialien

Kapillarblockmaterial	Wasseraufnahmefähigkeit [Masse-%]
R-KB-2/11	8,58
R-KB-5/22	9,2
R-KB-Q-2/10	3,7
N-KB-2/5	$< 1^1$

¹aus mineralogisch-petrographischen Untersuchungen

Für die Materialien R-KB-2/11 und R-KB-5/22 können Wasseraufnahmefähigkeiten von etwa 8 bis 9 Masse-% beschrieben werden, während das Kapillarblockmaterial R-KB-Q-2/10 mit 3,7 Masse-% die geringste Wasseraufnahmefähigkeit und damit auch die geringste Eigenporosität der Recyclingmaterialien zeigt (Tab 5.11).

Verglichen mit dem empfohlenen Wert der Wasseraufnahmefähigkeit von maximal 1 Masse-% von BAUER (2001) wären in erster Linie die Naturmaterialien als Kapillarschicht- und -blockmaterial geeignet. Von den Recyclingmaterialien erfüllt

R-KB-Q-2/10 als Kapillarsblockersatz am ehesten die Forderung von BAUER (2001). Die Recyclingmaterialien sind für den Einsatz in der Kapillarschicht aufgrund der physikalischen Laborarbeiten nur begrenzt einsatzfähig. Die hohen Eigenporositäten und die geringeren Festsubstanzdichten führen dazu, dass die hydraulischen Eigenschaften im Vergleich zu Natursanden deutlich schlechter bewertet werden müssen. Die weiteren Kipprinnenversuche sollen allerdings zeigen, inwieweit die beispielsweise von BAUER (2001) aufgestellten Anforderungen in der Praxis gelten oder vom jeweilig zur Verfügung stehenden Material abhängen und einzelfallbezogen untersucht und bewertet werden sollten.

5.1.2 Chemische Eigenschaften

Eluatuntersuchungen

Die Verwendung mineralischer Recyclingbaustoffe im Dichtungssystem setzt voraus, dass die Konzentration umweltrelevanter Stoffe den geltenden Regelwerken entspricht. In den Tabellen 5.13 und 5.14 sind die Analysenergebnisse der Eluate nach DEV-S4 vorrangig der Kapillarschicht- und Kapillarsperrenmaterialien aus Recyclingbaustoffen den Zuordnungswerten für Kapillarsperrenmaterialien nach LAGA M20 (1997) gegenübergestellt. Für die Kapillarschichtmaterialien sind die Zuordnungswerte Z1.1 und für die Kapillarsperrenmaterialien die Zuordnungswerte Z1.2 ausschlaggebend (LAGA 1997). Mit dem Inkrafttreten der DEPONIEVERWERTUNGSVERORDNUNG (DEPVERWV) am 01. September 2005 gelten für Kapillarsperrenmaterialien Grenzwerte, die sich nach den LAGA Zuordnungswerten Z1.1 für Boden richten. Aufgrund dieser Neuerung wurden die Ergebnisse der Eluatuntersuchungen auch dem Bewertungsrahmen der DEPVERWV (2005) gegenübergestellt. Der erweiterte Parameterkatalog konnte jedoch nicht vollständig berücksichtigt werden.

Tabelle 5.13 zeigt, dass die Recyclingsande, die einen höheren Anteil an Mauerwerk und Ziegelbruch beinhalten, im Vergleich zu den Qualitätsmaterialien höhere Sulfatwerte aufweisen. Der Sulfatwert des Recyclingsands R-KS-0/3 entspricht dem Zuordnungswert Z1.2, der des Materials R-KS-0,71/2 muss der Kategorie Z2 zugeordnet werden, obwohl diese beiden Materialien aus der gleichen Charge aber bei unterschiedlichen Absiebungen entstanden sind.

Die Eluatwerte des Naturmaterials N-KS-0/2(Ems) wurden für einen direkten Vergleich ebenfalls den Zuordnungswerten für Recyclingstoffe gegenübergestellt. Es weist überwiegend geringere Konzentrationen auf als die Werte der Recyclingsande.

Tabelle 5.13: Gegenüberstellung der Eluatuntersuchung nach DEV S-4 der Kapillarschichtmaterialien mit den LAGA-Zuordnungswerten Z 1.1 und Z 1.2 für Recyclingbaustoffe (1997) sowie den Zuordnungskriterien für Eluate nach DEPVERWV (2005)

chemische Parameter	Dep-VerwV (=LAGA Z-Werte Eluat für Boden)	LAGA Z-Werte Eluat für Recyclingbaustoffe		Material				
		Z 1.1	Z 1.2	R-KS-0/3	R-KS-0,71/2	R-KS-Q-0/3	R-KS-Q-0/2	N-KS-0/2(Ems)
Chlorid [mg*L ⁻¹]	10	20	40	15,0	20,0	6,6	15,7	n. b.
Cyanid [mg*L ⁻¹]	0,01	-	-	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Sulfat [mg*L ⁻¹]	50	150	300	298,9	485,2	45,2	127,4	n. b.
Wasserlöslicher Anteil [Masse-%]	1	-	-	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Arsen [mg*L ⁻¹]	0,01	0,01	0,04	< 0,003	0,0018	0,0024	n. n.	0,0018
Blei [mg*L ⁻¹]	0,04	0,04	0,1	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	0,0038
Cadmium [mg*L ⁻¹]	0,002	0,002	0,005	n. n.	0,000002	0,000007	n. n.	0,00002
Chrom [mg*L ⁻¹]	-	0,03	0,075	0,024	0,025	0,016	0,046	0,0088
Chrom VI [mg*L ⁻¹]	0,015	-	-	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Thallium [mg*L ⁻¹]	0,001	-	-	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Kupfer [mg*L ⁻¹]	0,05	0,05	0,15	0,016	0,02	0,002	0,005	0,0036
Nickel [mg*L ⁻¹]	0,04	0,05	0,1	0,0037	0,0069	0,0013	0,002	0,006
Quecksilber [mg*L ⁻¹]	0,0002	0,0002	0,001	0,0004	0,00018	0,00079	0,00023	0,00005
Zink [mg*L ⁻¹]	0,1	0,1	0,3	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	0,0075
Phenole [mg*L ⁻¹]	-	0,001	0,005	n. b.	n. b.	< 0,005	< 0,005	n. b.
pH-Wert	6,5-9,0 ¹	7,0-12,5	7,0-12,5	10,5	10,5	10,8	11,2	8
Leitfähigkeit [µS*cm ⁻¹]	500	1500	2500	840	1151	344	598	10

¹Abweichende pH-Werte stellen allein kein Ausschlusskriterium dar. Bei Über- oder Unterschreitungen ist die Ursache zu prüfen (DEPVERWV 2005)

n. n. = nicht nachweisbar; n. b. = nicht bestimmt

Tabelle 5.14: Gegenüberstellung der Eluatuntersuchung nach DEV S-4 der Kapillarblockmaterialien mit den LAGA-Zuordnungswerten Z 1.1 und Z 1.2 für Recyclingbaustoffe (1997) sowie den Zuordnungskriterien für Eluate nach DEPVERWV (2005)

chemische Parameter	Dep-VerwV (=LAGA Z-Werte Eluat für Boden)	LAGA Z-Werte Eluat für Recyclingbaustoffe		Material		
		Z 1.1	Z 1.2	R-KB-2/11	R-KB-5/22	R-KB-Q-2/10
Eluat nach DEV S-4	Z 1.1	Z 1.1	Z 1.2	R-KB-2/11	R-KB-5/22	R-KB-Q-2/10
Chlorid [mg*L ⁻¹]	10	20	40	9,7	10,1	7,7
Cyanid [mg*L ⁻¹]	0,01	-	-	n. b.	n. b.	n. b.
Sulfat [mg*L ⁻¹]	50	150	300	544,8	565,9	31,9
Wasserlöslicher Anteil [Masse-%]	1	-	-	n. b.	n. b.	n. b.
Arsen [mg*L ⁻¹]	0,01	0,01	0,04	0,0009	0,0005	0,0019
Blei [mg*L ⁻¹]	0,04	0,04	0,1	n. n.	n. n.	n. n.
Cadmium [mg*L ⁻¹]	0,002	0,002	0,005	0,000007	n. n.	0,000007
Chrom [mg*L ⁻¹]	-	0,03	0,075	0,029	0,047	0,029
Chrom VI [mg*L ⁻¹]	0,015	-	-	n. b.	n. b.	n. b.
Thallium [mg*L ⁻¹]	0,001	-	-	n. b.	n. b.	n. b.
Kupfer [mg*L ⁻¹]	0,05	0,05	0,15	0,009	0,0096	0,009
Nickel [mg*L ⁻¹]	0,04	0,05	0,1	0,006	0,0055	0,006
Quecksilber [mg*L ⁻¹]	0,0002	0,0002	0,001	0,0005	0,0006	0,0005
Zink [mg*L ⁻¹]	0,1	0,1	0,3	n. n.	n. n.	n. n.
Phenole [mg*L ⁻¹]	-	0,001	0,005	n. b.	n. b.	< 0,005
pH-Wert	6,5-9,0 ¹	7,0-12,5	7,0-12,5	11,0	11,5	11,5
Leitfähigkeit [µS*cm ⁻¹]	500	1500	2500	1277	1386	690

¹Abweichende pH-Werte stellen allein kein Ausschlusskriterium dar. Bei Über- oder Unterschreitungen ist die Ursache zu prüfen (DEPVERWV 2005)

n. n. = nicht nachweisbar; n. b. = nicht bestimmt

Auch bei den Kapillarblockmaterialien lässt sich bezüglich der Sulfatkonzentrationen ein großer Unterschied zwischen Qualitätsmaterial und dem Mineralgemisch mit Anteilen an Ziegel und Mauerwerk ausmachen. Während der Wert von R-KB-Q-2/10 in Z1.1 eingeordnet werden kann, überschreiten R-KB-2/11 und R-KB-5/22 den Zuordnungswert für Z1.2 um etwa $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Alle weiteren gemessenen Werte der Eluate von R-KB-2/11, R-KB-5/22 und R-KB-Q-2/10 zeigen so geringe Konzentrationen auf, dass sie die Vorgaben für Z1.2 bzw. Z1.1 sehr gut erfüllen.

Mit der DEPVERWV (2005) wurden für Kapillarschichtmaterialien die Grenzwerte für Chlorid, Sulfat, Nickel, pH-Wert und für die elektrische Leitfähigkeit verschärft. Während der Wert für Nickel von allen Recyclingsanden und auch von N-KS-0/2(Ems) eingehalten wird, müssen die Sulfatwerte nicht nur von R-KS-0/3 und R-KS-0,71/2 als kritisch betrachtet werden sondern auch der von R-KS-Q-0/2. Ebenfalls die Chloridkonzentrationen der zuletzt genannten Recyclingsande erfüllen den Grenzwert nach DEPVERWV (2005) nicht mehr. Da die Ionenkonzentration im direkten Zusammenhang mit der elektrischen Leitfähigkeit zu sehen ist, bei der nur noch ein Drittel des vorherigen Werts nach den LAGA-Zuordnungswerten für Recyclingbaustoffe zugelassen ist, wird auch diese von den gleichen Sanden überschritten. Eine alleinige Abweichung vom vorgegebenen pH-Wertebereich soll nach DEPVERWV (2005) nicht als Ausschlusskriterium gesehen werden.

Die Verschärfung der Zuordnungskriterien für die Kapillarblockmaterialien durch die DEPVERWV (2005) schränken die Eignung von R-KB-Q-2/10 nach der positiven Beurteilung durch LAGA Z1.2 für Recyclingbaustoffe lediglich durch den Parameter Leitfähigkeit ein. Beim Quecksilber lag die Bestimmungsgrenze nahe des Grenzwertes. Bei Langzeitschüttelversuchen konnte jedoch kein Quecksilber nachgewiesen werden (vgl. Tab. 5.15) Die Überschreitungen des pH-Wertes dürfen, wie schon bei den Recyclingsanden beschrieben, nicht als Ausschlusskriterium betrachtet werden. Alle anderen Grenzwerte werden weiterhin eingehalten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Materialien die geforderten Grenzwerte nach LAGA M20 überwiegend einhalten. Die teilweise erhöhten Sulfatkonzentrationen (R-KS-0/3, R-KS-0,71/2, R-KB-2/11 sowie R-KB-5/22) können auf den höheren Gipsanteil in diesen Mineralgemischen im Vergleich zu den Qualitätsmaterialien zurückgeführt werden (BAASCH & GOETZ 2004, BAUER 2001).

Für eine abschließende Beurteilung im Rahmen der DEPVERWV (2005) muss der erweiterte Parameterkatalog zu Grunde liegen. Die bereits vorliegenden Messwerte erfüllen mehrheitlich die vorgegebenen Grenzwerte – mit Ausnahme der bereits erwähnten teilweise erhöhten Sulfat- und Chloridkonzentrationen bzw. der erhöhten pH-Werte und Leitfähigkeiten. Allerdings erlaubt die DEPVERWV (2005) Ausnahmen von den genannten Grenzwerten, sofern nachgewiesen wird, dass Überschreitungen einzelner Zuordnungswerte die Schutzgüter Boden und Grundwasser nicht beein-

trächtigen. Die zuständige Behörde kann dann nach DEPVERWV (2005) den Einsatz dieser Deponieersatzbaustoffe dennoch zulassen.

Zur Ergänzung der Eluatuntersuchung nach DEV-S4 wurden von dem Material R-KS-Q-0/2 Eluate im Rahmen eines Langzeitschüttelversuches hergestellt. Mit Ausnahme des Kupfers (Abb. 5.16) zeigen alle Parameter, die sich an dem Parameterkatalog der LAGA-Zuordnungswerte Eluat für Recyclingbaustoffe (1997) anlehnen, keine Abhängigkeit des Auslaugverhaltens mit der Zeit (Tab. 5.15).

Tabelle 5.15: Gegenüberstellung der Eluatuntersuchung nach Langzeitelution (1 bis 7 Tage) von R-KS-Q-0/2 mit den LAGA-Zuordnungswerten für Recyclingbaustoffe (1997)

Geochemische Parameter	LAGA-Zuordnungswerte Eluat für Recyclingbaustoffe		Extraktionsdauer						
	Z 1.1	Z 1.2	1 Tag	2 Tage	3 Tage	4 Tage	5 Tage	6 Tage	7 Tage
Eluat nach DEV S-4									
Chlorid [mg*L ⁻¹]	20	40	15,7	15,8	16,0	15,9	16,0	16,1	15,9
Sulfat [mg*L ⁻¹]	150	300	127,4	143,2	147,7	128,8	137,1	140,2	146,4
Arsen [mg*L ⁻¹]	0,01	0,04	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Blei [mg*L ⁻¹]	0,04	0,1	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Cadmium [mg*L ⁻¹]	0,002	0,005	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Chrom [mg*L ⁻¹]	0,03	0,075	0,046	0,037	0,042	0,051	0,042	0,046	0,042
Kupfer [mg*L ⁻¹]	0,05	0,15	0,005	0,004	0,005	0,006	0,004	0,006	0,006
Nickel [mg*L ⁻¹]	0,05	0,1	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Quecksilber [mg*L ⁻¹]	0,0002	0,001	0,00023	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Zink [mg*L ⁻¹]	0,1	0,3	n. n.	0,003	n. n.	n. n.	0,001	0,002	n. n.
pH-Wert	7,0-12,5	7,0-12,5	11,2	11,0	11,1	11,3	11,3	11,3	11,4
Leitfähigkeit [µS*cm ⁻¹]	1500	2500	598	669	660	341	346	791	798

n. n. = nicht nachweisbar

Die Messwerte von Chlorid, Sulfat, Chrom, Nickel wie auch die pH-Werte und elektrischen Leitfähigkeiten bleiben auch bei längerer Schütteldauer auf dem gleichen Niveau. Bei dem Material R-KS-Q-0/2 reicht damit für diese Parameter eine Ver-

suchslaufzeit von 24 Stunden aus, während sich für Kupfer nach dieser Zeit noch kein Gleichgewicht einstellen konnte.

KARNUTH (2003) konnte ebenfalls für einige Stoffe (Cr, Mo, Ca, Na und K) mit Hilfe eines Langzeitversuches nachweisen, dass sich bei untersuchten Recyclingmaterialien nach der vorgeschriebenen Elutionsdauer von 24 Stunden noch kein Gleichgewicht einstellen konnte. Es kann vermutet werden, dass die erhöhte Stofffreisetzung, die mit der Schüttelzeit in Verbindung steht, auch die Folge von Materialabrieb aufgrund der stärkeren mechanischen Belastung sein kann. Für das Material R-KS-Q-0/2 müsste ein Materialabrieb Konzentrationserhöhungen weiterer Parameter bedeuten. Die signifikant steigende Kupferkonzentration mit der Zeit kann durch den hohen pH-Wert im Eluat erklärt werden, da dieser die Stofffreisetzung bei Schwermetallen mit amphoterem Verhalten verstärken (BAASCH & GOETZ 2004). Die schnelle Gleichgewichtseinstellung der nicht von der Schütteldauer abhängigen Stoffe kann nach OBERMANN & CREMER (1992) durch die hohe Lösungsgeschwindigkeit erklärt werden, die von der spezifischen Oberfläche bzw. der Korngröße abhängig ist. R-KS-Q-0/2 weist eine vergleichbar geringe Korngröße und somit eine entsprechend große spezifische Oberfläche auf.

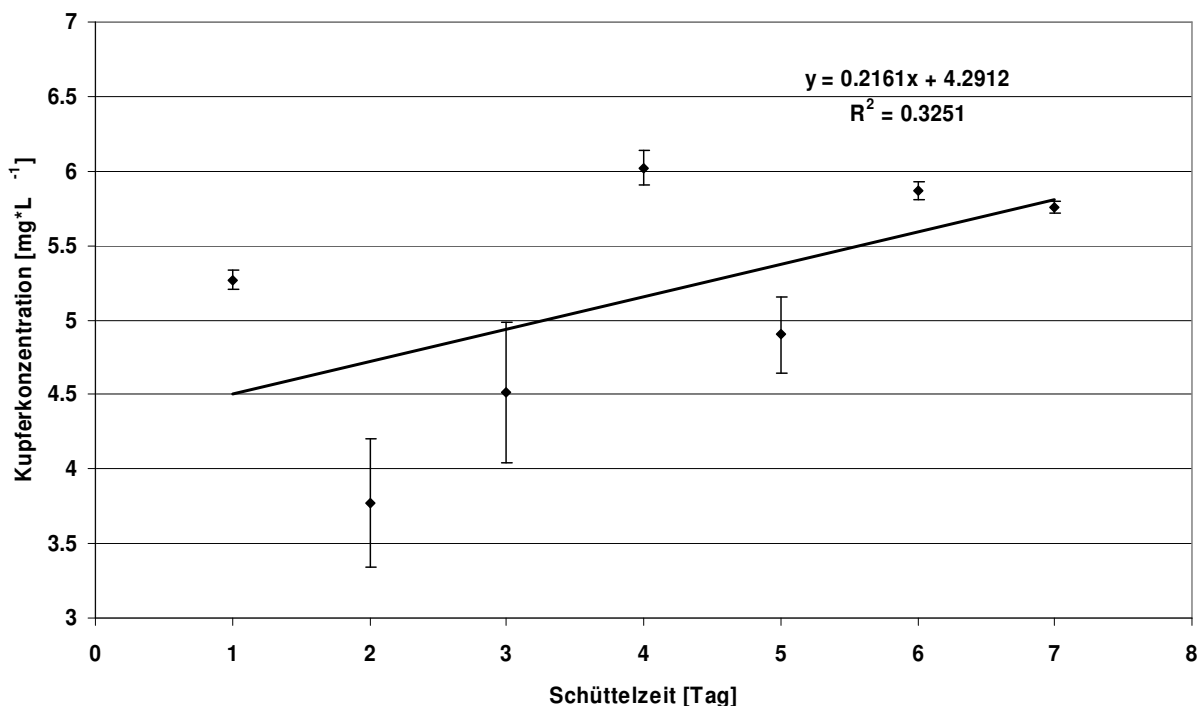


Abbildung 5.16: Kupferkonzentrationen des Eluats in Abhängigkeit der Schüttelzeit

Untersuchung der Festsubstanz

In den Klassen Z1.1 und Z1.2 für Feststoffuntersuchungen von Recyclingbaustoffen bzw. nichtaufbereitetem Bauschutt sowie in der DEPVERWV (2005) existieren keine

Zuordnungswerte für Arsen und Schwermetalle (vgl. Kapitel 4.2.1.2)⁴. In Tabelle 5.16 sind die relevanten Feststoffgehalte für die Materialien R-KS-Q-0/2 und R-KB-Q-2/10 dargestellt. Nach den physikalischen und chemischen Laboruntersuchungen zeigen diese Materialien für den Einsatz in einer Kapillarsperre die besten Eigenschaften unter den Recyclingbaustoffen. Der Bewertungsrahmen der DEPVERWV (2005) konnte nicht vollständig berücksichtigt werden.

Auffallend sind die sehr hohen Kohlenwasserstoffwerte von R-KS-Q-0/2 und R-KB-Q-2/10, die den Grenzwert nach der DEPVERWV (2005) weit überschreiten (Tab. 5.16). Nach LAGA M 20 (1997) sind Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, wie es bei den untersuchten Qualitätsmaterialien vorliegt, allerdings nicht als Ausschlusskriterium zu werten. Asphalt zeigt eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber aggressiven Wässern und eine Alterung durch Oxidation ist nahezu auszuschließen (KARNUTH 2003, LINDGREN 1996, ROGOSCH 2003). Aus diesen Gründen werden die Recyclingmaterialien R-KS-Q-0/2 und R-KB-Q-2/10 in die weiteren Betrachtungen eingeschlossen.

Tabelle 5.16: Gegenüberstellung der Feststoffuntersuchung von R-KS-Q-0/2 und R-KB-Q-2/10 mit den LAGA-Zuordnungswerten für Recyclingbaustoffe (1997) sowie den Zuordnungskriterien für Feststoffe nach DepVerwV (2005)

Chemische Parameter Feststoff	Dep- VerwV	LAGA Zuordnungswerte Feststoff für Recyclingbaustoffe				Material	
		Z0	Z1.1	Z1.2	Z2	R-KS-Q-0/2	R-KB-Q-2/10
Kohlenwasserstoffe [mg*kg ⁻¹]	300	100	300 ¹	500 ¹	1000 ¹	1250	1250
Summe BTEX	1	-	-	-	-	n. b.	n. b.
Summe LHKW	1	-	-	-	-	n. b.	n. b.
PAK nach EPA [mg*kg ⁻¹]	5	1	5 (20) ²	15 (50) ²	75 (100) ²	1,33	1,33
EOX [mg*kg ⁻¹]	3	1	3	5	10	< 0,5	< 0,5
PCB [mg*kg ⁻¹]	0,1	0,02	0,1	0,5	1	0,0005	0,003

¹Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar.

²Im Einzelfall kann bis zu dem in Klammern genannten Wert abgewichen werden.

n. b. = nicht bestimmt

Carbonatgehalt und Glühverlust

Die Vorgaben der LAGA (1997) bezüglich der chemischen Analysen wurden mit den Parametern Carbonatgehalt und Glühverlust nach TASI (1993) ergänzt. Nach DEPVERWV (2005) soll der organische Anteil der Materialien über den Glühverlust

⁴ Die Feststoffgehalte der Kapillarschicht- und -blockmaterialien von Arsen und den Schwermetallen kann dem Anhang entnommen werden.

und TOC charakterisiert werden. TOC wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Mit der Untersuchung des Carbonatgehalts sollte eine Beeinträchtigung der Kapillarsperre durch Calciumauslösung ausgeschlossen werden. Diese Auslösung wird durch Wasserdampf - in Verbindung mit einem erhöhten CO₂-Partialdruck - verursacht durch Deponiegas begünstigt (KAINZMAIER 2003). In der TASI (1993) ist aus diesem Grund ein Grenzwert für den Carbonatgehalt von 10 Masse-% vorgesehen. Dieser Wert wird von allen untersuchten Materialien weit unterschritten (Tab. 5.17 und 5.18).

Tabelle 5.17: Gegenüberstellung der Carbonatgehalte und Glühverluste der Kapillarschichtmaterialien mit den Grenzwerten nach DepVerwV (2005) und TASI (1993)

Geochemische Parameter	DepVerwV	Grenzwerte nach TASI	Material				
			R-KS-0/3	R-KS-0,71/2	R-KS-Q-0/3	R-KS-Q-0/2	N-KS-0/2(Ems)
Carbonatgehalt [Masse-%]	-	10	4,8	5,9	2,7	2,6	2,7
Glühverlust [Masse-%]	3	5	3,1	3,2	3,0	2,9	0,4
TOC [Masse-%]	1	-	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.

n. b. = nicht bestimmt

Tabelle 5.18: Gegenüberstellung der Carbonatgehalte und Glühverluste der Kapillarblockmaterialien mit den Grenzwerten nach DepVerwV (2005) und TASI (1993)

Geochemische Parameter	DepVerwV	Grenzwerte nach TASI	Material		
			R-KB-2/11	R-KB-5/22	R-KB-Q-2/10
Carbonatgehalt [Masse-%]	-	10	3,6	6,7	2,1
Glühverlust [Masse-%]	3	5	2,7	2,7	3,0
TOC [Masse-%]	1	-	n. b.	n. b.	n. b.

n. b. = nicht bestimmt

Die Vorgabe der TASI (1993) im Hinblick auf den Glühverlust von 5 Masse-% für die Deponieklasse II werden deutlich von den untersuchten Materialien eingehalten. Der

Grenzwert, der von der DEPVERWV (2005) für den Glühverlust gefordert ist, wird ebenfalls eingehalten. Bei mineralischen Bauabfällen sind geringfügige Überschreitungen, wie sie R-KS-0/3 und R-KS-0,71/2 zeigen, nach DEPVERWV (2005) kein Ausschlusskriterium.

5.1.3 Fazit der Materialuntersuchungen

Für eine abschließende Beurteilung der Materialeigenschaften im Rahmen der Voruntersuchungen sind die Ergebnisse der Untersuchungen in den Tabellen 5.19 und 5.20 zusammenfassend bewertet.

Tabelle 5.19: Bewertung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der untersuchten Kapillarschichtmaterialien

Kapillarschichtmaterial		R-KS-0/3	R-KS-Q-0/3	R-KS-0,71/2	R-KS-Q-0/2	N KS 0/1 (R/M)	N-KS-0/2(R/M)	N-KS-0/2(Ems)
Physikalische Parameter	Korndichte	-	+	-	+	+	+	+
	Kornform	+	+	+	+	+	+	+
	Kornverteilung	-	-	o	o	-	+	+
	Ungleichförmigkeitszahl	-	+	-	o	+	+	+
	Filterstabilität	+	+	+	+	-	+	+
	gesättigte Wasserleitfähigkeit	+	+	+	+	o	+	+
	ungesättigte Wasserleitfähigkeit	+	+	+	+	+	+	+
	Lufteintrittswert	-	-	o	o	+	+	+
	Kornzertrümmerungsversuch	-	o	n. b.	+	n. b.	n. b.	n. b.
	Wasseraufnahmefähigkeit	-	-	-	-	+	+	+
Chemische Parameter	Eluat nach DEV S-4	-	o	o	o	n. b.	n. b.	+
	Untersuchung der Festsubstanz	n. b.	n. b.	n. b.	+	n. b.	n. b.	n. b.
	Carbonatgehalt	+	+	+	+	n. b.	n. b.	+
	Glühverlust	+	+	+	+	n. b.	n. b.	+

+ = gut, o = eingeschränkt, - = schlecht, n. b. = nicht bestimmt

Tabelle 5.20: Bewertung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der untersuchten Kapillarsperreblockmaterialien

Kapillarsperreblockmaterial		R-KB-2/11	R-KB-Q-2/10	R-KB-5/22	N KB 2/5
Physikalische Parameter	Korndichte	-	+	-	+
	Kornform	+	+	+	+
	Kornverteilung	+	+	-	+
	Ungleichförmigkeitszahl	+	+	+	+
	Filterstabilität	+	+	o	+
	gesättigte Wasserleitfähigkeit	+	+	+	+
	ungesättigte Wasserleitfähigkeit	+	+	+	+
	Luft Eintrittswert	+	+	+	+
	Kornzertrümmerungsversuch	-	+	+	n. b.
	Wasseraufnahmefähigkeit	-	o	-	+
Chemische Parameter	Eluat nach DEV S-4	-	+	o	n. b.
	Untersuchung der Festsubstanz	+	+	+	n. b.
	Carbonatgehalt	+	+	+	n. b.
	Glühverlust	+	+	+	n. b.

+ = gut, o = eingeschränkt, - = schlecht, n. b. = nicht bestimmt

Die Ergebnisse zeigen, dass die Sande aus Recyclingmaterial nur bedingt für den Einsatz in einer Kapillarsperre geeignet sind. Die günstigsten chemischen und physikalischen Eigenschaften weist das Material R-KS-Q-0/2 auf, welches ausgewählt wurde, um in Kipprinnenversuchen weiterführend auf hydraulische Eignung getestet zu werden. Bessere Ergebnisse bezüglich der Eignung als Kapillarschichtmaterial erzielten erwartungsgemäß die Naturmaterialien N-KS-0/2(Rhein/Main) und N-KS-0/2(Ems).

Bei den Kapillarsperreblockmaterialien zeigte das Recyclingmaterial R-KB-Q-2/10 in Gegenüberstellung zu dem Naturmaterial N-KB-2/5, mit Ausnahme einer geringen Überschreitung der Wasseraufnahmefähigkeit, gleichermaßen gute Eigenschaften für den Einsatz als Kapillarsperreblock.

Basierend auf den Ergebnissen der chemischen und physikalischen Untersuchungen wurden vier Materialien ausgewählt, um in verschiedenen Kombinationen ihre Eignung als Kapillarsperre in Kipprinnenversuchen zu testen. Bei den ausgewählten

Materialien handelte es sich um R-KS-Q-0/2 und N-KS-0/2(Ems) als Kapillarschicht-sande sowie R-KB-Q-2/10 und N-KB-2/5 als Kapillarblock.

Daraus ergaben sich folgende Materialkombinationen, die in den Kipprinnenversuchen getestet wurden (Tab. 5.21):

Tabelle 5.21: Materialkombinationen für Kipprinnenversuche

Kombination	Kapillarschichtmaterial	Kapillarblockmaterial
Naturmaterial-Kombination	N-KS-0/2(Ems)	N-KB-2/5
Recyclingmaterial-Kombination	R-KS-Q-0/2	R-KB-Q-2/10
Natur-Recyclingmaterial-Kombination	N-KS-0/2(Ems)	R-KB-Q-2/10

5.2 Kipprinnenversuche

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Wasserflüsse und der Matrixpotenzial-sowie Wassergehaltsmessungen der drei Materialkombinationen dargestellt, die in den Kipprinnenversuchen getestet wurden.

5.2.1 Naturmaterial-Kombination

Laterale Dränkapazität

In Abbildung 5.17 sind die Zufluss- und Abflusskomponenten des Versuchverlaufs der Naturmaterialkombination in der Kiprinne dargestellt. Die Abflüsse der Kapillarschicht und des Kapillarblocks sind den Zuflüssen aus der Stirnwandbewässerung gegenübergestellt. Zufluss und Kapillarschichtabfluss sind an der linken und die Kapillarblockabflüsse an der rechten Ordinate abgetragen. Randumläufigkeiten wurden mit der Einrichtung von Kapillarblockseitenabflüssen überprüft und können als unbedeutend bezeichnet werden, so dass sie in der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt werden.

Die Zuflüsse wurden stufenweise gesteigert. Die ersten Kapillarblockabflüsse weit unter 1 % der Zuflussmenge wurden bei Zuflussraten zwischen ca. $200 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ und $240 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ beobachtet. Erste nennenswerte Durchbrüche in den Kapillarblock von etwa 14 % des Zuflusses wurden bei einer Zuflussmenge von $290 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ registriert. Weitere Kapillarblockabflüsse von 20 % ($38 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) und 14 % ($26 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) wurden bei Steigerungen des Zuflusses auf $310 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ bzw. $324 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ gemessen.

Mit der Reduzierung der Zuflussmenge nehmen auch die Durchbruchraten ab. Auf dem Niveau von etwa $270 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Zufluss entwässert der Kapillarblock bis auf unter 1 % der Zuflussrate.

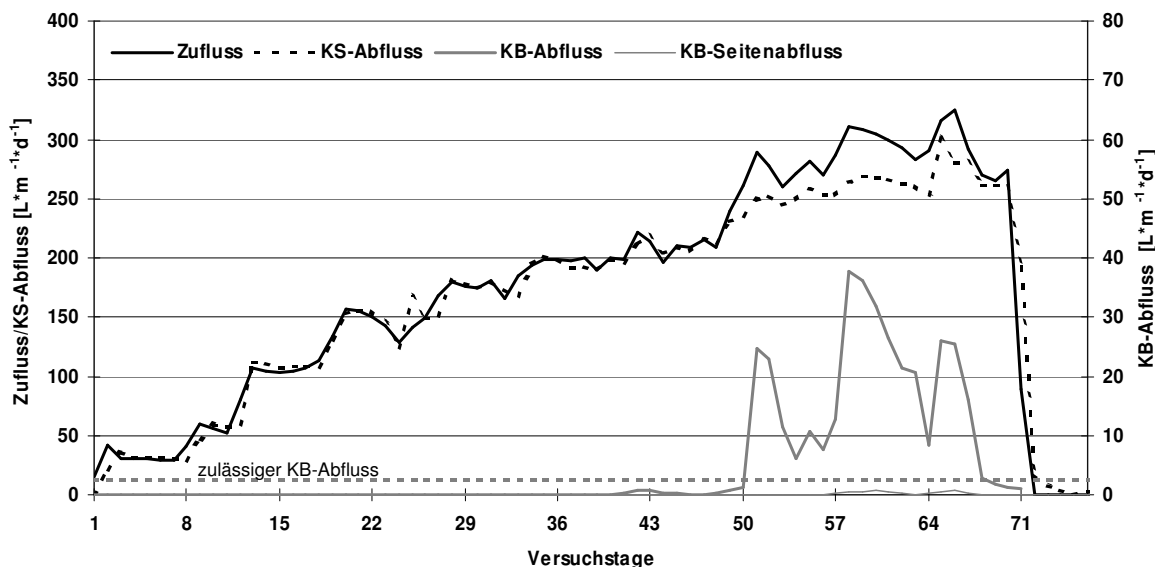


Abbildung 5.17: Abflussverhalten der Naturmaterialkombination N-KS-0/2(Ems) mit N-KB-2/5 bei 15° Neigung und steigender Zuflussrate

Eine andere Darstellungsweise ist die Gegenüberstellung der Kapillarschicht- bzw. Kapillarblockabflüsse in Abhängigkeit der Zuflussrate (Abb. 5.18). Es sind in der Abbildung 5.18 die Datenpunkte eingetragen, deren Zuflüsse eine Belastungssteigerung für das Kapillarsperrensystem bedeuten. Die Phasen, in denen das System aufgrund kurzfristig abnehmender Zuflüsse weniger Wasser führt, sind herausgefiltert.

Bis etwa zu einem Zufluss von $250 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ wird die Wassermenge nahezu vollständig in der Kapillarschicht abgeführt. Erst mit Zuflüssen $> 260 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ weichen die Datenpunkte von dem Kurvenverlauf mit der 1:1 Linie ab (Abbildung 5.18 oben).

Die Beziehung der Kapillarblockabflüsse zu den Wasserzuflussmengen zeigt ab diesen Zuflussraten einen Anstieg der Durchbrüche in den Kapillarblock und geht bei weiterer Zuflussratensteigerung bzw. mit dem Erreichen der lateralen Dränkapazität ebenfalls in die Steigung 1 über. Dies entspricht der Definition der „diversion capacity“ nach Ross (1990), die dann erreicht ist, wenn zusätzliche Zuflussmengen nicht mehr in der Kapillarschicht abgeführt werden können, sondern als Durchbrüche im Kapillarblock registriert werden. In diesem Zustand entspricht die Zuflussratensteigerung den Kapillarblockabflüssen, da die Kapillarschicht ihr maximales Ableitvermögen erreicht hat. Auf Basis dieser Annahmen wurde mit einer Regressionsgeraden mit der Steigung 1 ($R^2=0,76$) eine potenzielle laterale Dränkapazität von

273 $\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ermittelt (Abb.5.18). Mit einem festgelegten Sicherheitsbereich von 10 % liegt die praxisorientierte laterale Dränkapazität bei 245 $\text{L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$. Der Abbildung 5.18 ist zu entnehmen, dass zwar bereits vor Erreichen der potenziellen lateralen Dränkapazität hohe Kapillarblockabflüsse zu verzeichnen sind, der Sicherheitsbereich diese Durchbruchraten jedoch einschließt.

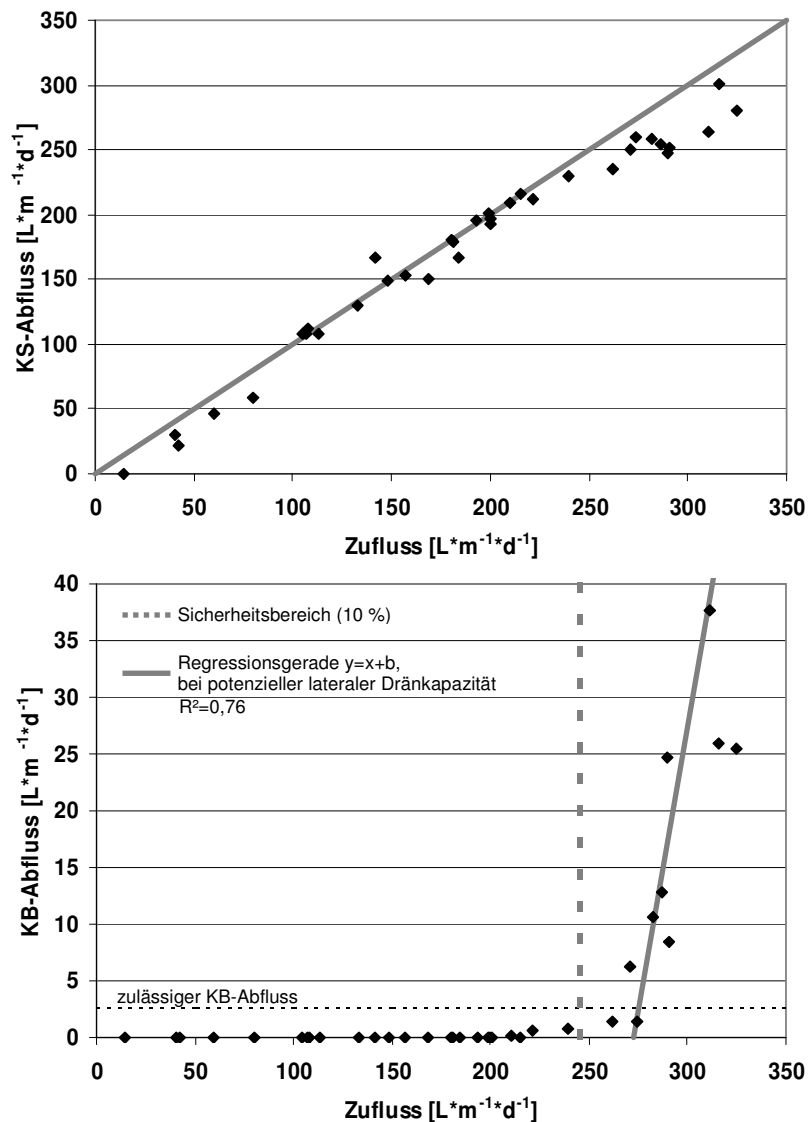


Abbildung 5.18: Zusammenhang zwischen Zuflussrate und Kapillarschichtabfluss (oben) und Kapillarblockabfluss (unten) für die Naturmaterialkombination (N-KS-0/2(Ems) mit N-KB-2/5) im Kipprinnenversuch bei 15° Neigung

Auf Basis der praxisnahen Definition der lateralen Dränkapazität nach STEINERT (1999) ist im Vorfeld festzulegen, welche Kapillarblockabflussmengen zu tolerieren sind. Ein Bezug auf die Vorgaben für mineralische Dichtungen nach DEP V (2002) ist in diesem Zusammenhang hilfreich und wird in Abb. 5.17 als zulässiger KB-Abfluss dargestellt. Daraus folgend wäre die laterale Dränkapazität der Naturmaterialkombination aufgrund des ersten nennenswerten Durchbruchereignisses zwischen

240 L*m⁻¹*d⁻¹ und 290 L*m⁻¹*d⁻¹ einzuordnen. Gegenüber der Methodik zur Berechnung der potenziellen lateralen Dränkapazität zeigt sich allerdings eine Ungenauigkeit von 50 L*m⁻¹*d⁻¹, die davon abhängt, wie nah die gewählte Zuflussmenge an der lateralen Dränkapazität liegt.

Matrixpotenziale und Wassergehalte

Die Tensiometer in 52 cm Höhe (32 cm über Schichtgrenze) zeigen mit der Steigerung der Zuflussmenge eine Zunahme der Matrixpotenziale (Abb. 5.19). Erst die Zuflussraten ab 260 L*m⁻¹*d⁻¹ scheinen diese Schichthöhe in der Kapillarschicht zu beeinflussen. Eine ähnliche Entwicklung ist 15 cm über der Schichtgrenze zu beobachten. Ab etwa einer Zuflussmenge von 190 l in den oberen Segmenten 1, 2 und 3 bzw. bis 210 L*m⁻¹*d⁻¹ im Segment 6 am Rinnenende sinken die Tensionen der Tens 35 cm sichtlich bis unter 10 hPa. Mit abnehmenden Matrixpotenzialen bei steigendem Zufluss zeigen die Matrixpotenziale der Tens 25 cm eine grundsätzliche Abhängigkeit von der Zuflussmenge. Bei Werten von etwa 5 bis 8 hPa, die bei einem Zufluss von ca. 260 L*m⁻¹*d⁻¹ erreicht werden, sinken die Matrixpotenziale im Kapillarblock ebenfalls extrem bis auf unter 10 hPa – in den Segmenten 2, 3 und 5 sogar unter 1 hPa – ab. In Segment 4 liegen die geringsten Werte des Kapillarblock-Tensiometers (Tens 11 cm) bei etwa 20 hPa. Das kann entweder auf ungleichen Wasserfluss im groben Kies zurückzuführen sein, oder an den Schwierigkeiten liegen, die sich bei Matrixpotenzialmessungen in grobem Material ergeben können. Die Entwicklung der Matrixpotenziale im Kapillarblock im Verlauf der Zuflusssteigerung gibt allerdings deutliche Hinweise darauf, dass es ab Zuflussraten > 260 L*m⁻¹*d⁻¹ zu Durchbrüchen kommt, was innerhalb des Sicherheitsbereichs der potenziellen lateralen Dränkapazität von 273 L*m⁻¹*d⁻¹ liegt.

Die Wassergehalte in den vier Höhen und den sechs Segmenten zeigen eine gleichermaßen deutliche Abhängigkeit von der Zuflussmenge wie die Tensionen (Abb. 5.20). Nahezu keine Reaktion auf die Wasserzufuhr weisen die FDR-Sonden in 52 cm Höhe in den beiden oberen Segmenten auf. In den weiteren vier Segmenten hangabwärts trocknet der Sand in dieser Schichthöhe bis zu einer Zuflussmenge von etwa 200 L*m⁻¹*d⁻¹ auf 2 bis 3 Vol.-% aus, um bei weiterer Zuflusssteigerung wieder geringfügig an Wassergehalt zuzunehmen.

Die Wassergehalte in 15 cm über Schichtgrenze (FDR 35 cm) weisen in den oberen drei Segmenten bis etwa einem Zufluss von 150 L*m⁻¹*d⁻¹ einen leichten Anstieg um ca. 3 Vol.-% auf. In den Segmenten 4 bis 6 wird das Maximum nach einer Veränderung von 4 bis 5 Vol.-% bei etwa 190 L*m⁻¹*d⁻¹ erreicht. Danach wird das jeweilig erreichte Niveau in den Segmenten - zwischen 8 bis 11 Vol.-% - auch bei weiterer Zuflusssteigerung beibehalten. Die Matrixpotenziale zeigen hingegen bei den Zuflussmengen, bei denen sich der Wassergehalt auf einem Niveau einpendelt, große abnehmende Veränderungen.

Die Werte der FDR-Sonden direkt oberhalb der Schichtgrenze deuten eine deutliche, positive Korrelation mit den Zuflussmengen an. Die Steigung nimmt jedoch bei etwa $260 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ab, da die Wassergehalte trotz weiterer Zuflussteigerung nur noch in geringem Maß zunehmen.

Mit Hilfe der Messungen des Wassergehalts im Kapillarblock kann sehr gut nachvollzogen werden, ab welcher Zuflussmenge verstärkt Durchbrüche auftreten. Während die Segmente 3 und 4 im Laufe des Kipprinnenversuchs mit den Naturmaterialien nur sehr geringe Reaktionen von 1 bis 2 Vol.-% bei steigendem Zufluss zeigen, ist in den übrigen Segmenten ein nahezu sprunghafter Anstieg des Wassergehalts bei etwa $260 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ zu beobachten. Nur im Segment 6 ist bereits bei $200 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ eine Zunahme der FDR-Sonden-Werte zu verzeichnen. Das Maximum der Wassergehalte im Kapillarblock des untersten Segments am Hang ist allerdings auch erst bei $260 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ erreicht.

Mit dem Überschreiten der potenziellen lateralen Dränkapazität von $273 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ steigen die Wassergehalte des Kapillarblocks in den Segmenten 1, 2, 5 und 6 noch etwas an. Eine eindeutige Reaktion auf das Erreichen der potenziellen lateralen Dränkapazität ist aufgrund der unregelmäßigen Fließwege im Kapillarblock und den bereits bei niedrigeren Zuflussraten gemessenen Durchbrüchen erwartungsgemäß nicht zu beobachten.

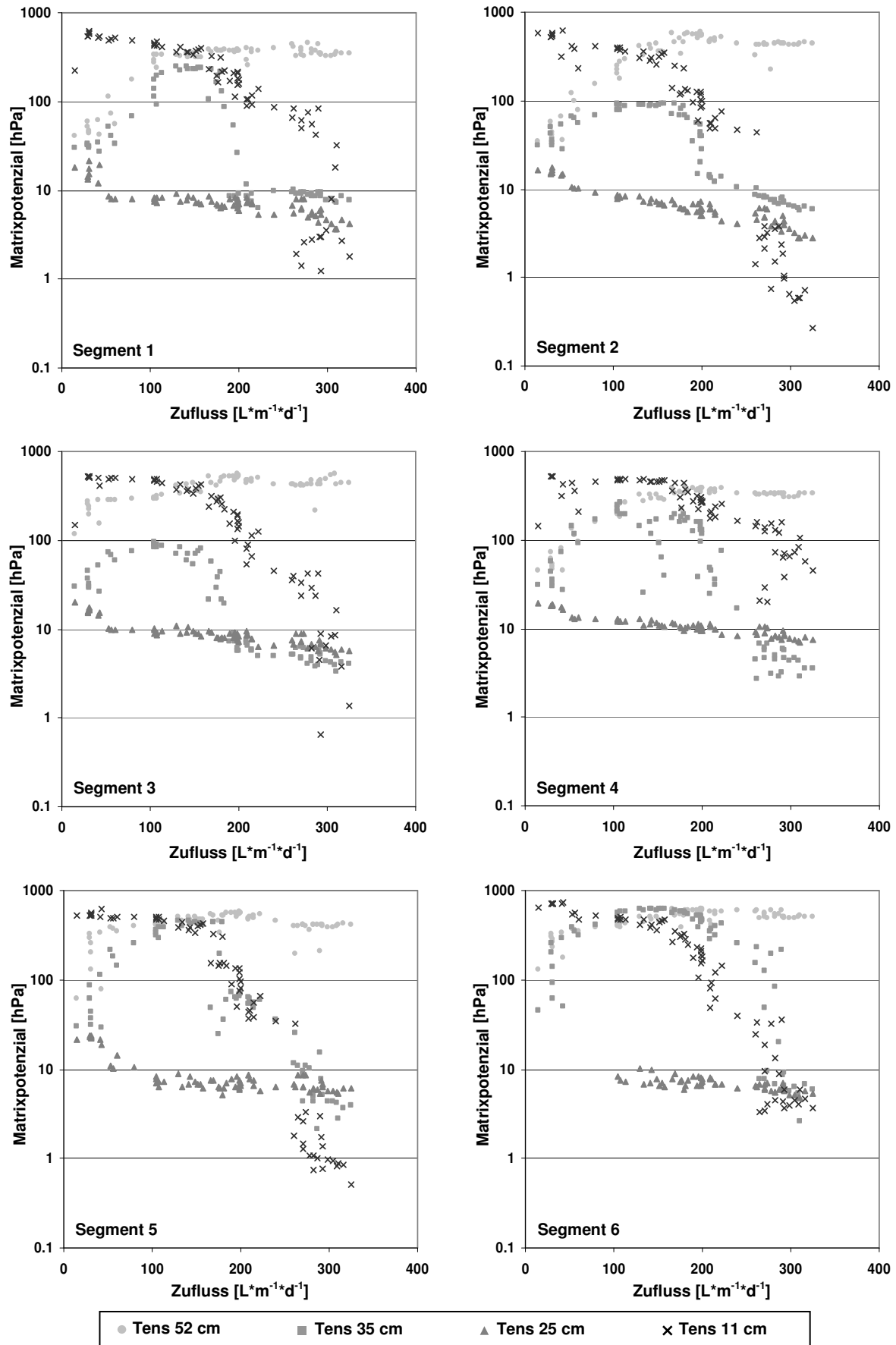


Abbildung 5.19: Matrixpotenziale [hPa] in Abhängigkeit der Zuflussrate [L*m⁻¹*d⁻¹] während des Kipprinnenversuchs der Naturmaterialkombination N-KS-0/2(Ems) mit N-KB-2/5; Segment 1 (Rinnenkopf) bis Segment 6 (Rinnenfuß) jeweils in den Höhen 52 cm, 35 cm, 25 cm in der Kapillarschicht und 11 cm im Kapillarblock (gemessen von Rinnenboden)

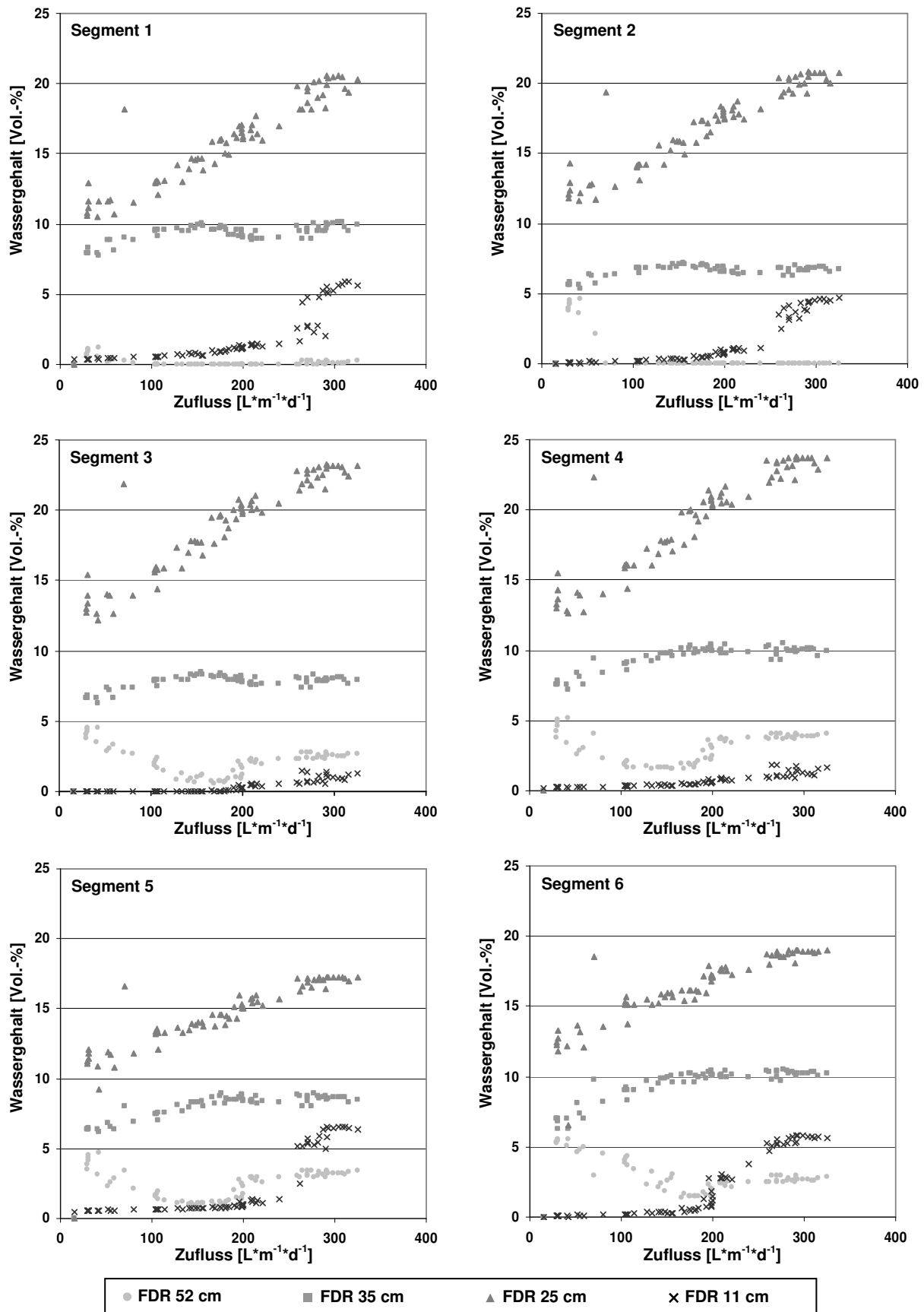


Abbildung 5.20: Wassergehalte [Vol.-%] in Abhängigkeit der Zuflussmenge [L*m⁻¹*d⁻¹] während des Kipprinnenversuchs der Naturmaterialkombination N-KS-0/2(Ems) mit N-KB-2/5; Segment 1 (Rinnenkopf) bis Segment 6 (Rinnenfuß) jeweils in den Höhen 52 cm, 35 cm, 25 cm in der Kapillarschicht und 11 cm im Kapillarblock (gemessen von Rinnenboden)

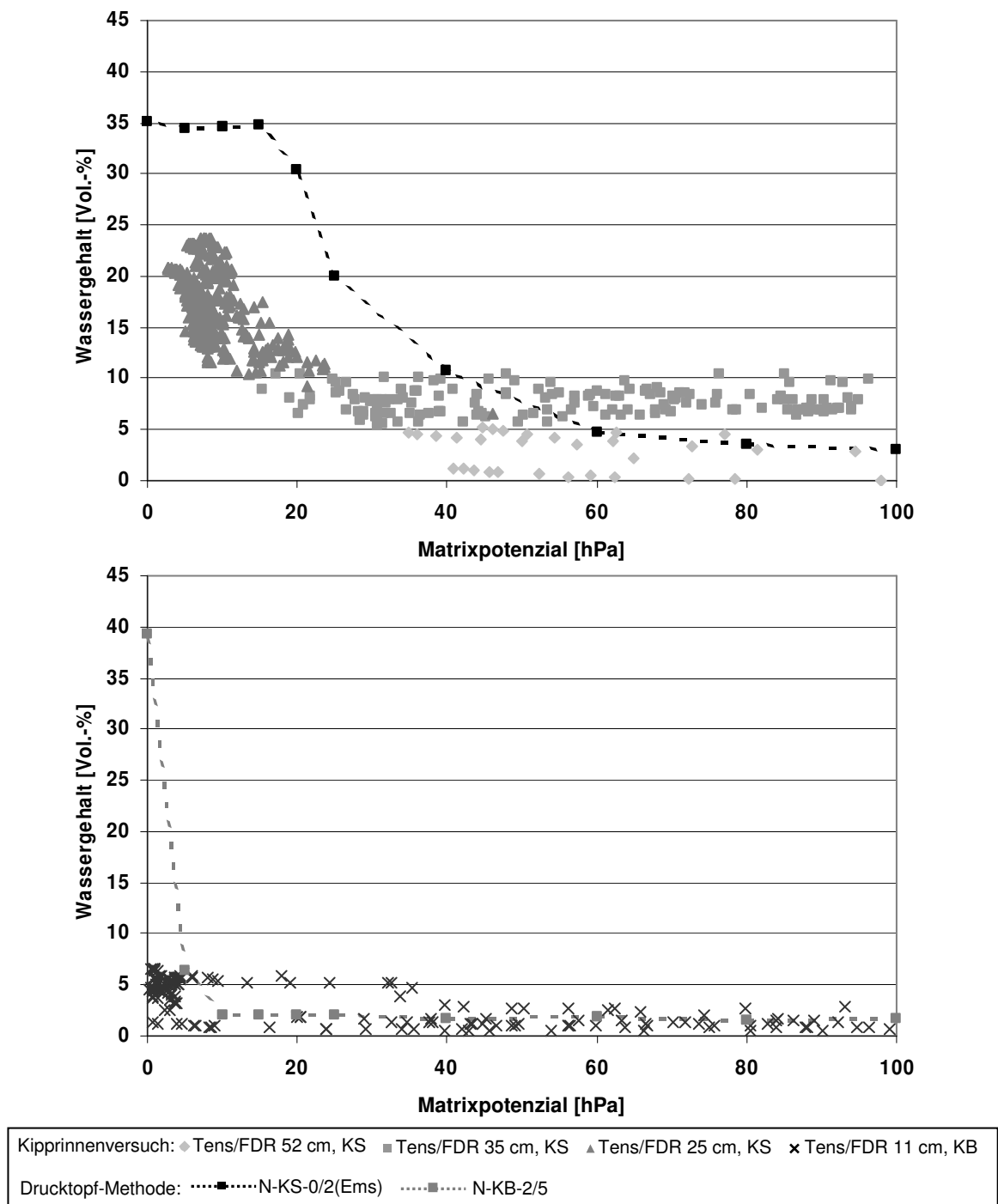


Abbildung 5.21: Vergleich der Retentionsbeziehungen für das Material der Kapillarschicht N-KS-0/2(Ems) (oben) und des Kapillarblocks N-KB-2/5 (unten) ermittelt aus Messwerten des Kipprinnenversuchs der Naturmaterialkombination bzw. mittels Drucktopf-Methode

Im Bereich der ermittelten potenziellen lateralen Dränkapazität herrschen an der Schichtgrenze 6 bis 8 hPa bzw. 17 bis 24 Vol.-% Wassergehalt. In Abbildung 5.21 sind die Messwerte der Tensiometer und FDR-Sonden aller Segmente des Kipprinnenversuchs der Naturmaterialkombination in einer Wasserspannungs-Wassergehalts-beziehung im Vergleich zu den in den Drucktöpfen ermittelten Kur-

ven (gestrichelte Linien) dargestellt. Nur wenige Daten, und zwar diese, die durch die Geräte in den Höhen 52 cm, 35 cm und 11 cm im Wasserspannungsbereich von 40 bis 100 hPa gemessen wurden, stimmen mit dem Verlauf der in den Voruntersuchungen ermittelten Retentionsbeziehungen relativ gut überein.

Es wird deutlich, dass sowohl die Kapillarschicht N-KS-0/2(Ems) als auch der Kapillarblock N-KB-2/5 im Verlauf des Kipprinnenversuchs bei gleichem Matrixpotenzial geringere Wassergehalte aufweisen als den Drucktopfuntersuchungen entnommen werden kann. Die Unterschiede in den Retentionsbeziehungen geben mit großer Wahrscheinlichkeit den Hystereseeffekt wieder. Die in den Drucktöpfen ermittelten Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehungen stellen die primären Entwässerungs- oder Desorptionskurven dar, während die im Kipprinnenversuch gemessenen Werte für unvollständige Be- aber auch für sekundäre Entwässerungsvorgänge (vgl. Abb. 5.17) stehen und dadurch vielfältige Hystereseschleifen bilden (HILLEL 2004, KUTILEK & NIELSEN 1994). Ist die laterale Dränkapazität erreicht, ist davon auszugehen, dass sich eine den Sandeigenschaften entsprechende, kapillarschichtspezifische Hauptbewässerungskurve darstellt (KÄMPF 2000). Im Gegensatz dazu ist es schwierig, in den Rinnenversuchen die Hauptbewässerungskurve des Kapillarblocks zu ermitteln. Gründe dafür liegen zum einen in Messungenauigkeiten aufgrund der Grobheit des Materials und zum anderen in den Unregelmäßigkeiten der Block-Zuflüsse in Form von präferentiellen Flüssen eventuell an Stellen, die nicht von den Messgeräten erfasst werden.

Die Hysterese hat einen entsprechenden Einfluss auf die Wasserleitfähigkeitsfunktionen und somit auf die Funktionalität der Kapillarsperrenmaterialkombination. Aus den Matrixpotenzialen und Wassergehalten, die während des Kipprinnenversuchs mit der Naturmaterialkombination gemessen wurden, wurde eine Wasserleitfähigkeitsfunktion errechnet, welche die Verhältnisse in der Kapillarschicht bei Bewässerung wiedergibt (Abb. 5.22). Im Vergleich zu der k_u -Funktion von N-KS-0/2(Ems), die aus den Daten der Entwässerungskurve der Retentionsbeziehung im Drucktopfverfahren ermittelt wurde, zeigt sie bei Anstieg des Matrixpotenzials ab ca. 8 hPa eine schnellere Abnahme der ungesättigten Wasserleitfähigkeit. Der Schnittpunkt der k_u -Funktionen von N-KS-0/2(Ems) und N-KB-2/5 bleibt allerdings nahezu unverändert. Der Abbildung 5.22 zufolge kreuzen sich die hydraulischen Leitfähigkeiten der beiden Kapillarsperrenmaterialien bei etwa 6 hPa. Dabei ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der geringen Wertebereiche von Matrixpotenzial und Wassergehalt, die während des Kipprinnenversuchs im Kapillarblock herrschten, keine Berechnung einer k_u -Funktion in der Bewässerungsphase möglich ist. Es ist also davon auszugehen, dass auch die Wasserleitfähigkeitsfunktion von N-KB-2/5 aufgrund des Hystereseverhaltens während der Bewässerung einen steileren Verlauf aufzeigt, womit sich die Annäherung der hydraulischen Eigenschaften der beiden Materialien in einen niedrigen Wasserspannungsbereich verschiebt.

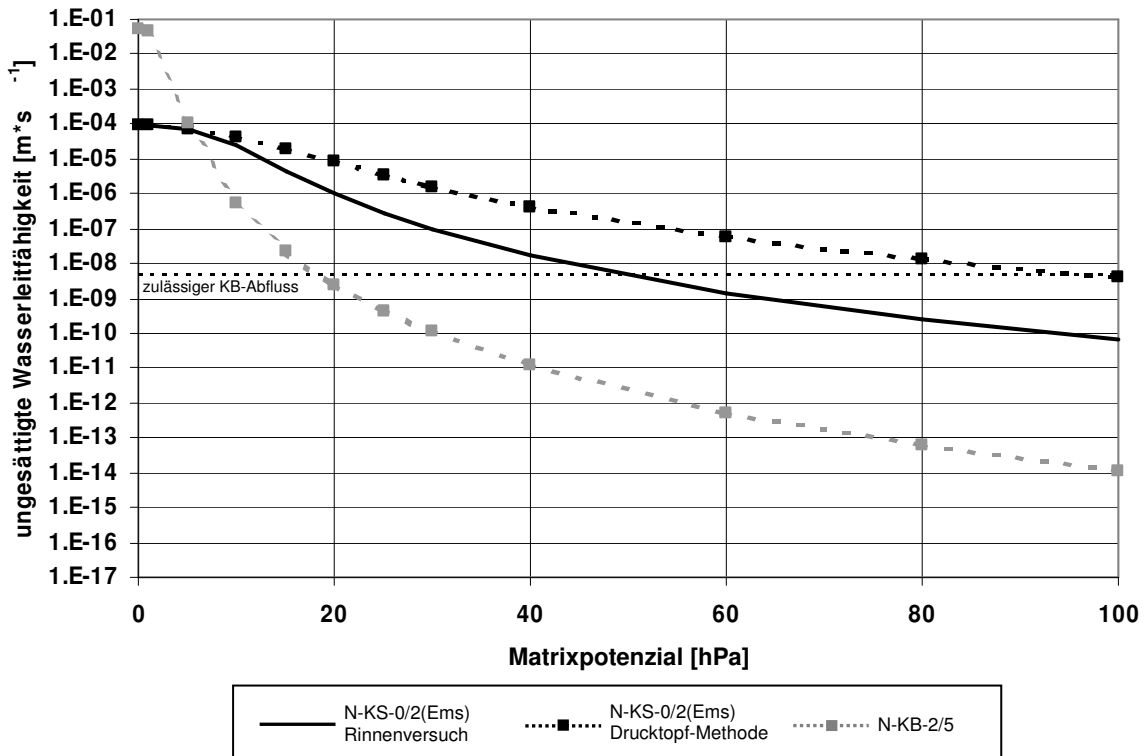


Abbildung 5.22: Wasserleitfähigkeitsfunktionen von N-KS-0/2(Ems) und N-KB-2/5 basierend auf den Retentionsbeziehungen der Drucktopf-Methode im Vergleich zu der Wasserleitfähigkeitsfunktion von N-KS-0/2(Ems) ermittelt aus den während des Kipprinnenversuchs der Naturmaterialkombination herrschenden Matrixpotenzialen und Wassergehalten

Daraus wird deutlich, wie entscheidend die exakte Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften unter Berücksichtigung der Hysterese bei der Betrachtung der Funktionalität und Eignung von Kapillarsperrenmaterialkombinationen ist. Die genauen Verhältnisse, die bei einem Durchbruch bzw. bei Erreichen der lateralen Dränkapazität an der Schichtgrenze herrschen, können mit den vorliegenden Daten somit nicht eindeutig wiedergegeben werden.

5.2.2 Recyclingmaterial-Kombination

Laterale Dränkapazität

Bei der Bilanzierung der Zu- und Abflüsse der Recyclingmaterialkombination im Kipprinnenversuch sind bereits bei einer Zuflussrate von etwas mehr als $30 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Kapillarblockabflusssteigerungen bis ca. $1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ zu beobachten (Abb. 5.23). Nach einer Zuflussmengen Zunahme auf $40 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ werden Kapillarblockabflüsse von $2,2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ registriert. Dies entspricht 5,4 % der Bewässerungsmenge. Mit einer weiteren Zuflusssteigerung sinkt die Blockabflussrate auf 2,3 % ($1,2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), um bei einem Zufluss von etwas über $60 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ bis auf 12,3 % ($7 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) anzusteigen. Die Daten der Versuchstage 18 und 19 konnten aufgrund eines technischen Problems mit dem Datenlogger nicht aufgezeichnet werden.

Bemerkenswert ist, dass mit den Steigerungen der Zuflussraten zunächst Abnahmen in den Kapillarschichtabflüssen beobachtet werden, bevor sie sich auf die erhöhten Bewässerungsraten einstellen und ebenfalls höhere Durchbruchmengen aufweisen. Dieses Verhalten ähnelt dem wellenartigen Durchgang einer Wasserfront bei präferentieller Sickerung in den groben Poren des Kapillarblocks, die sehr schnell wieder entwässern (GERMAN 1999).

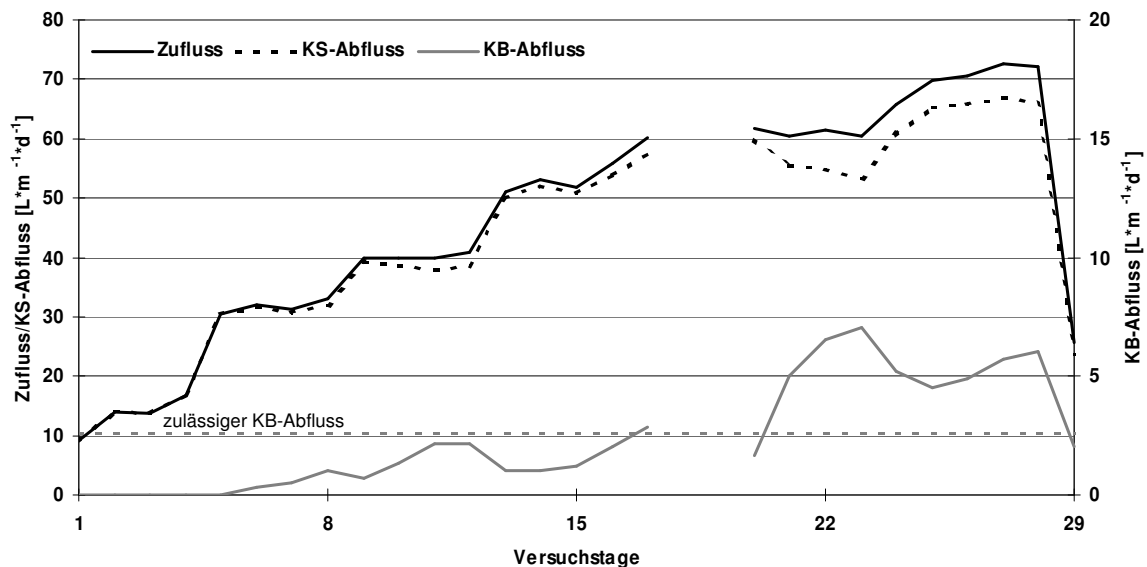


Abbildung 5.23: Abflussverhalten der Recyclingmaterialkombination R-KS-Q-0/2 mit R-KB-Q-2/10 bei 15° Neigung und steigender Zuflussrate

Die Abbildung 5.24 (oben) zeigt in der Gegenüberstellung der Kapillarschichtabflüsse zu den Zuflüssen verstärkte Abweichungen von der sich aus den Datenpunkten bildenden 1:1 Gerade bei etwa $60 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Zuflussmenge. Aus der Zufluss-/Kapillarblock-abflussbeziehung ist zu beobachten, dass bei nahezu identischen Zuflussraten von ca. $60 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ unterschiedliche Kapillarblockabflussmengen ($< 2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ bis $> 7 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) registriert wurden. Dies macht die Schwierigkeit deutlich, die laterale Dränkapazität bei der Zuflussmenge festzusetzen, bei der nennenswerte Kapillarblockabflüsse eintreten, da bei geringen Zuflussraten ebenfalls Durchbrüche beobachtet wurden, die als unbedeutend eingestuft werden können. Die potenzielle laterale Dränkapazität, die auf physikalischer Basis die absolute Grenze des Abfuhrvermögens der Kapillarschicht definiert, ist bei etwa $64 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ festzulegen. Der Sicherheitsbereich von 10 % deckt gut den Zuflussbereich ab, in dem bereits Kapillarblockabflüsse gemessen wurden, welche die Vorgaben einer mineralischen Dichtung überschreiten.

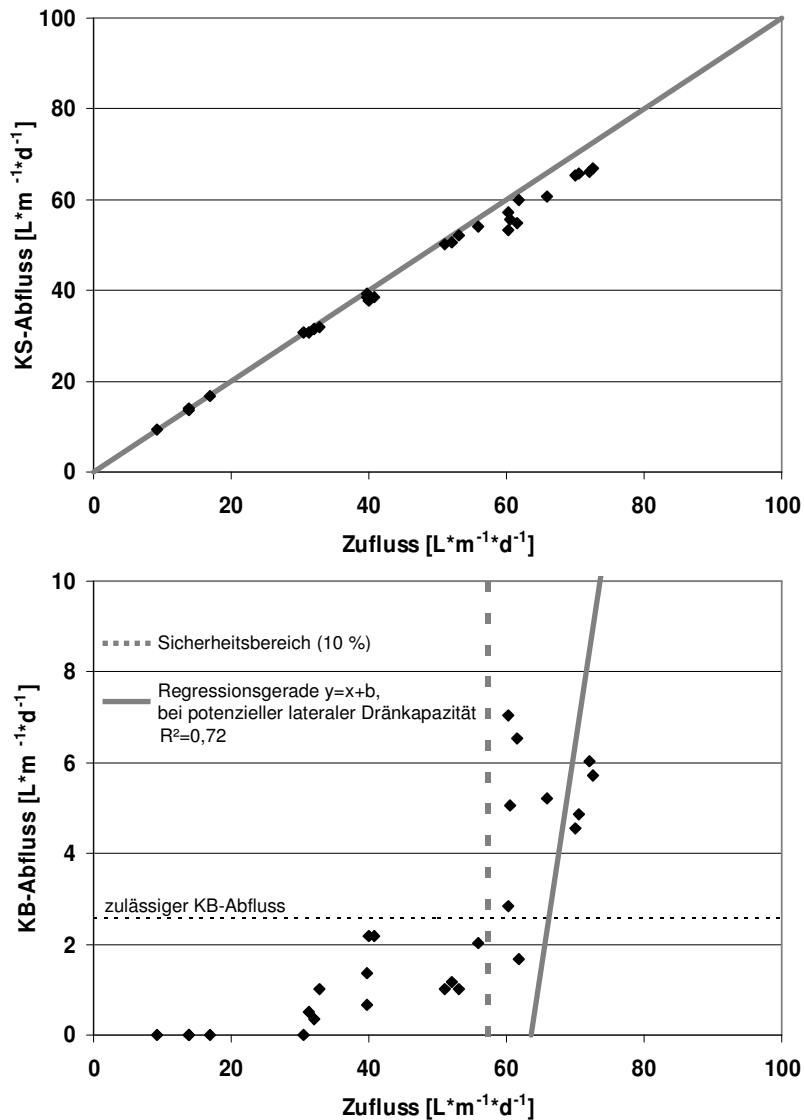


Abbildung 5.24: Zusammenhang zwischen Zuflussrate und Kapillarschichtabfluss (oben) und Kapillarblockabfluss (unten) für die Recyclingmaterialkombination (R-KS-Q-0/2 mit R-KB-Q-2/10) im Kipprinnenversuch bei 15° Neigung

Matrixpotenziale und Wassergehalte

Die Matrixpotenziale in den drei Messhöhen (52 cm, 35 cm und 25 cm) der Kapillarschicht aus Recyclingmaterial weisen während des Kipprinnenversuchs Werte in einem engen Bereich um 5 hPa auf (Abb. 5.25). Die sinkenden Wasserspannungen zeigen bis etwa 60 $L \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$ Bewässerung eine signifikante Abhängigkeit von der Zuflussmenge. Der Anstieg der Wasserspannungen über 60 $L \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$ Zufluss muss auf den phasenweisen Ausfall des Datenloggers zurückgeführt werden und wird in der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt.

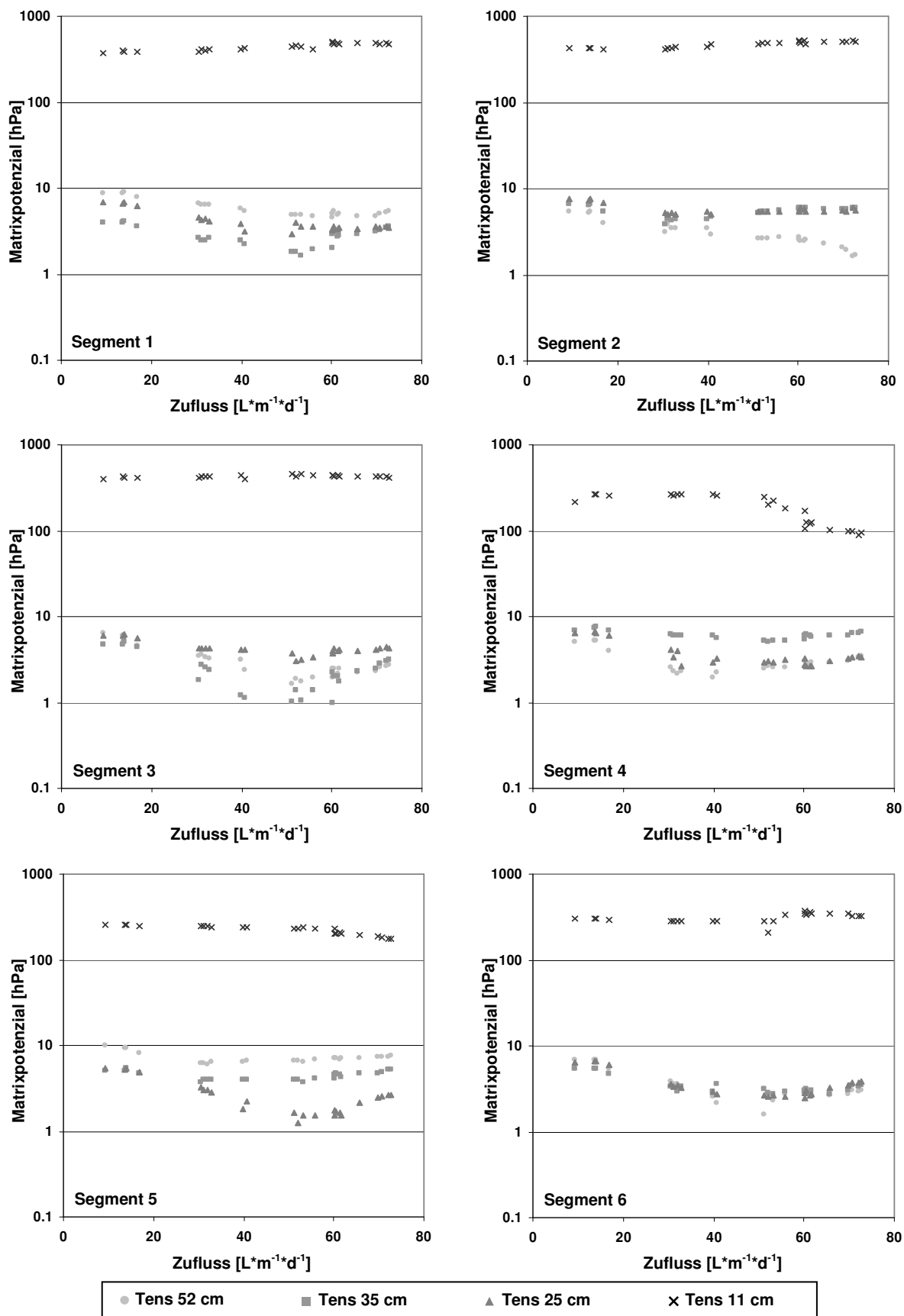


Abbildung 5.25: Matrixpotenziale [hPa] in Abhängigkeit der Zuflussrate [L*m⁻¹*d⁻¹] während des Kipp-rinnenversuchs der Recyclingmaterialkombination R-KS-Q-0/2 mit R-KB-Q-2/10; Segment 1 (Rinnenkopf) bis Segment 6 (Rinnenfuß) jeweils in den Höhen 52 cm, 35 cm, 25 cm in der Kapillarschicht und 11 cm im Kapillarblock (gemessen von Rinnenboden)

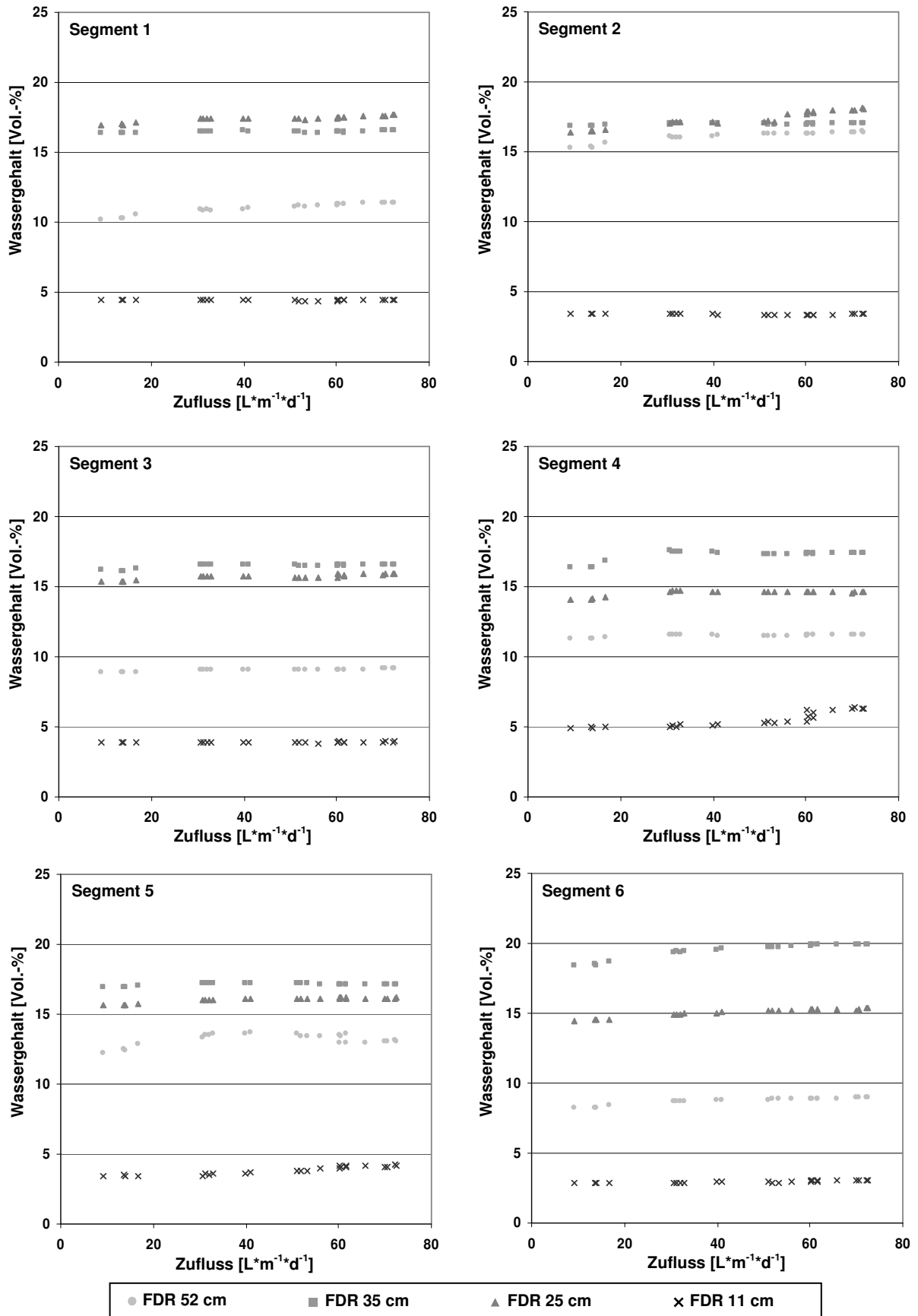


Abbildung 5.26: Wassergehalte [Vol.-%] in Abhängigkeit der Zuflussrate [$L \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$] während des Kipp-rinnenversuchs der Recyclingmaterialkombination R-KS-Q-0/2 mit R-KB-Q-2/10; Segment 1 (Rinnenkopf) bis Segment 6 (Rinnenfuß) jeweils in den Höhen 52 cm, 35 cm, 25 cm in der Kapillarschicht und 11 cm im Kapillarblock (gemessen von Rinnenboden)

Die Werte der verschiedenen Messhöhen liegen aufgrund der eingesetzten Oberflächenbewässerung auf ähnlichen Niveaus. Es können keine eindeutig geringeren Wasserspannungen in direkter Nähe zur Schichtgrenze im Vergleich zu den in anderen Höhen eingebrachten Tensiometern festgestellt werden. Dies hätte auf eine bevorzugte Wasserbewegung an der Schichtgrenze, wie bei der Naturmaterialkombination nachgewiesen, hingedeutet.

Die Matrixpotenziale im Kapillarblock liegen auf einem sehr konstanten Niveau. Lediglich die Entwicklung der Wasserspannung im Kapillarblock des 4. Segments von über 260 hPa auf unter 100 hPa ab $60 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ deutet auf einen Wasserfluss hin, was ein Hinweis für die verstärkten Durchbrüche ab dieser Zuflussmenge sein könnte.

Die Wassergehalte in 25 cm und 35 cm Höhe bewegen sich in einem Bereich zwischen 15 und 20 Vol.-% (Abb.5.26). In 52 cm Höhe herrschen trotz der vergleichbaren Tensionen zu den anderen Messhöhen etwas geringere Wassergehalte. Daraus folgt, dass Veränderungen in einem Bereich von etwa 10 bis 20 Vol.-% Wassergehalt nur geringe Veränderungen in den Matrixpotenzialen zur Folge haben.

Der Wassergehalt im Kapillarblock ist im Laufe des Kipprinnenversuchs in allen Segmenten, mit Ausnahme des Segments 4, gleichbleibend gering ($< 5 \text{ Vol.-%}$). Die Wassergehalte in Segment 4 zeichnen die Entwicklung der bereits beschriebenen Tensionen, die auf einen Durchbruch hindeuten, nach. Die Aussage, dass es ausschließlich und exakt an dieser Stelle des 4. Segments zum Durchbruch gekommen ist, kann nicht getroffen werden. Weitere Durchbrüche können auf präferenziellen Fliessbahnen abgeleitet werden, ohne von den Messgeräten des Kapillarblocks, registriert zu werden.

Bei Erreichen der potenziellen lateralen Dränkapazität herrschen 5 cm über der Schichtgrenze somit Wasserspannungen um 5 hPa, was Verhältnisse nahe Sättigung widerspiegelt, mit Wassergehalten von 15 bis 18 Vol.-%.

Bei der Gegenüberstellung der Retentionsbeziehung ermittelt aus den Tensionen und Wassergehalten während des Rinnenversuchs mit denen der physikalischen Voruntersuchungen wird - wie auch bei der Naturmaterialkombination - der Unterschied zwischen Be- und Entwässerungsvorgängen deutlich (Abb. 5.27). Die Messwerte des Recyclingmaterialkombinationsversuchs bilden nur einen kleinen Wertebereich der Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehungen ab. Die Hystereseschleifen des Kapillarschichtmaterials R-KS-Q-0/2 bewegen sich während des Kipprinnenversuchs zwischen Wassergehalten von 8 bis 20 Vol.-%, die Wasserspannungen von 1 bis 9 hPa entsprechen. Im Kapillarblock R-KB-Q-2/10 liegen die Wassergehalte des Kipprinnenversuchs über denen, die für den Wasserspannungsbereich von 80 bis 100 hPa im Drucktopf ermittelt wurden. Dies kann auf den leicht feuchten Einbau

in Kombination mit der Wasseraufnahmefähigkeit des Materials R-KB-Q-2/10 zurückgeführt werden. Die Differenz zwischen den Wassergehalten der unterschiedlich ermittelten Retentionsbeziehungen liegt bei etwa 3,6 Vol.-%, was vergleichbar ist mit der Wasseraufnahmefähigkeit, die für dieses Material festgestellt wurde (vgl. Tab. 5.12).

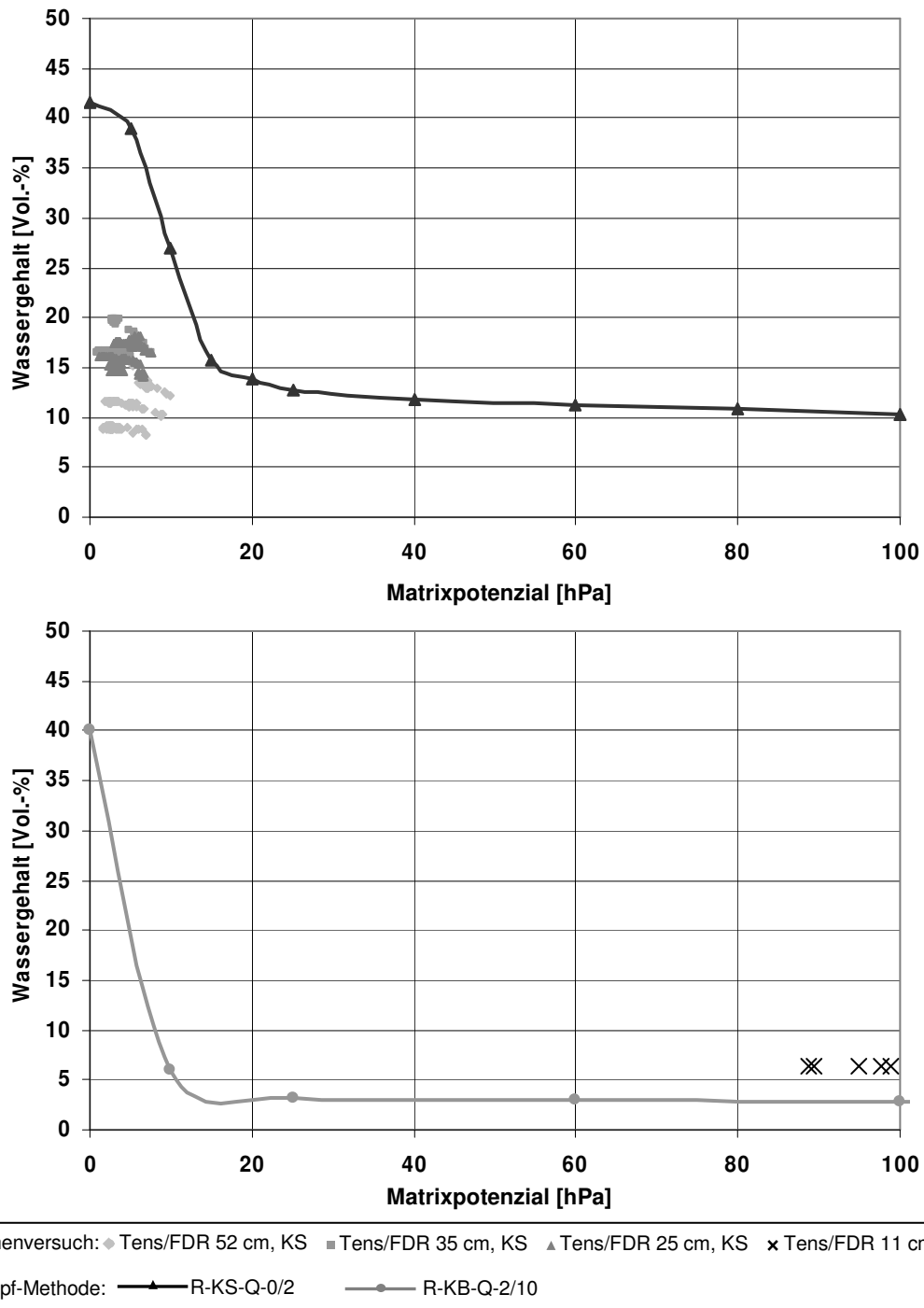


Abbildung 5.27: Vergleich der Retentionsbeziehungen für das Material der Kapillarschicht R-KS-Q-0/2 (oben) und des Kapillarblocks R-KB-Q-2/10 (unten) ermittelt aus Messwerten des Kippinnenversuchs der Recyclingmaterialkombination bzw. mittels Drucktopf-Methode

Aus dem Grund, dass nur ein geringer Wasserspannungs- und Wassergehaltsbereich der Retentionsbeziehungen von R-KS-Q-0/2 und R-KB-Q-2/10 während des Kipprinnenversuchs gemessen wurde, können weder für das Kapillarschicht- noch für das Kapillarblockmaterial Wasserleitfähigkeitsfunktionen ermittelt werden, die in der Phase der Bewässerung gemessen wurden. Da für die Darstellung der Funktion der Kapillarsperre im Bereich der lateralen Dränkapazität die Bewässerungsstände maßgebend sind, wurde daher auf eine Auswertung verzichtet.

5.2.3 Natur-Recyclingmaterial-Kombination

Laterale Dränkapazität

Der Kipprinnenversuch der Natur-/Recyclingmaterialkombination wurde über einen Zeitraum von 361 Tagen durchgeführt (Abb. 5.28). Nach anfänglich unregelmäßigen Durchbrüchen können ab dem 73. Tag stetige Blockabflüsse auf niedrigem, nahezu gleichbleibendem Niveau registriert werden. Auf eine Zuflussratensteigerung um etwa $30 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ von $210 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ auf $240 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ binnen zweier Tage (Tage 96 und 97) reagiert der Kapillarblock zunächst mit Abflüssen von $3,4 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Im Verlauf des Versuchs nehmen die Durchbruchraten leicht ab, trotz weiterer Zunahmen der Bewässerungsmengen. Erst eine Bewässerungsrate von ca. $287 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ verursacht einen Durchbruch von über $20 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (Tag 165). Der darauf folgende Verlauf der Zuflusskurve in Abbildung 5.28 und die dadurch bedingten Abflusskurven zeigen, dass die Kapillarsperre bestehend aus der Natur-/Recyclingkombination in diesem Belastungsbereich sehr sensibel reagiert.

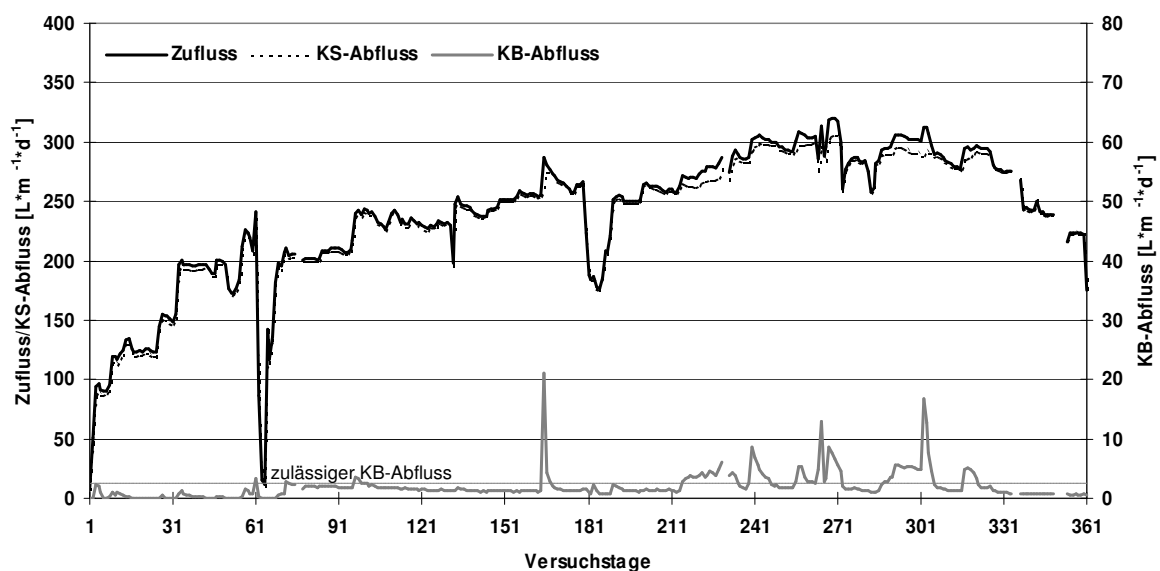


Abbildung 5.28: Abflussverhalten der Natur-/Recyclingmaterialkombination N-KS-0/2(Ems) mit R-KB-Q-2/10 bei 15° Neigung

In der Abbildung 5.29 werden Abweichungen der Datenpunkte von der Diagonalen der Zufluss-/Kapillarschichtabfluss-Beziehung ab einer Bewässerungsrate von etwa $270 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ offensichtlich. Bei den Gegenüberstellungen der Zusammenhänge zwischen den Zuflussmengen und der Kapillarschicht- bzw. Kapillarblockabflüsse wurden lediglich die Datensätze berücksichtigt, die auf einer Zuflussteigerung beruhen. Aufgrund der langen Versuchszeit liegen viele Datenpunkte vor. Eine Abhängigkeit der Kapillarblockabflüsse von der zuvor stattgefundenen Zuflusssituation ist allerdings nicht auszuschließen. Dadurch sind bei gleichen Zuflussmengen häufig unterschiedliche Durchbruchraten zu beobachten. Dies spiegelt die Unsicherheit wider, auf der Grundlage einer Begrenzung der Kapillarblockabflüsse die Leistungsfähigkeit einer Kapillarsperrenkombination festzusetzen.

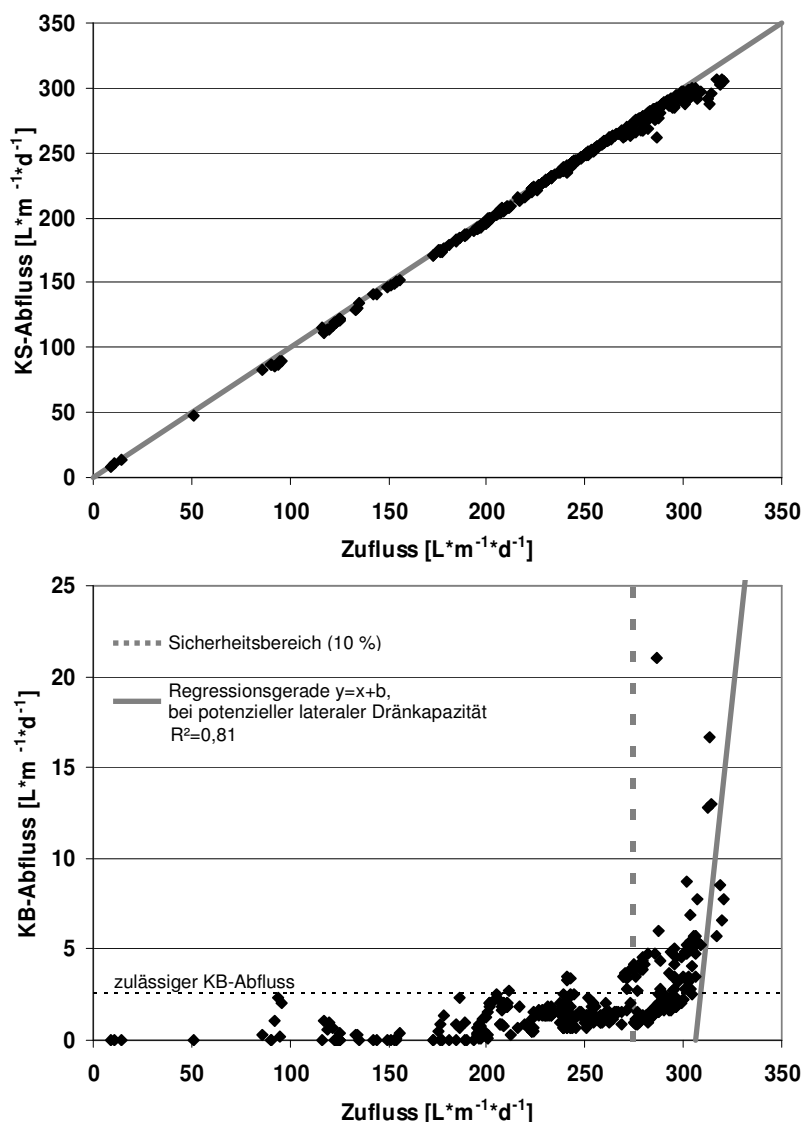


Abbildung 5.29: Zusammenhang zwischen Zuflussrate und Kapillarschichtabfluss (oben) und Kapillarblockabfluss (unten) für die Natur-/Recyclingmaterialkombination (N-KS-0/2(Ems) mit R-KB-Q-2/10) im Kippinnenversuch bei 15° Neigung

Deutlich wird dies bei der Betrachtung der Kapillarblockabflüsse in Abhängigkeit von der Zuflussrate bei einer Bewässerungsrate von $240 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Bei diesen Zuflüssen übersteigen die Durchbruchmengen die festgelegte und projektspezifisch zu definierende Vorgabe für den maximal zulässigen Kapillarblockabfluss. Die Überschreitungen sind jedoch nur kurzzeitig zu beobachten, bei höheren Zuflussmengen wird der Grenzwert, der sich in den vorliegenden Untersuchungen an der Anforderung für mineralische Dichtungen nach DEP V (2002) orientiert, gut eingehalten.

Auf Basis der physikalisch begründeten Annahme, dass ab einer bestimmten Zuflussmenge der Kapillarblockabfluss der Zuflussratensteigerung entspricht, konnte aus der Zufluss-/Kapillarblockabfluss-Beziehung der Natur-/Recyclingmaterialkombination eine potenzielle laterale Dränkapazität von $306 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ermittelt werden. Bei dieser Zuflussmenge zeigt die Regressionsgerade der maximal eingebundenen Datensätze eine Steigung von $a=1$ mit einem Bestimmtheitsmaß von $> 0,8$. Der Sicherheitsbereich von 10 % ist ab einer Zuflussrate von $275 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ festzulegen. Zwar sind bereits ab einer Zuflussmenge von $270 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Kapillarblockabflüsse zu beobachten, welche die Vorgaben für mineralische Dichtungen nach DEP V (2002) überschreiten, allerdings werden gleichsam bei diesen Zuflüssen weiterhin Durchbrüche registriert, die den Grenzwert einhalten.

Die Ursache der starken Streuung der Durchbruchereignisse in dem Kippinnenversuch mit der Natur-/Recyclingmaterialkombination ist primär auf die lange Versuchsdauer zurückzuführen. Die Beeinflussung eines bereits vorher stattgefundenen Durchbruchereignisses auf die Kapillarblockabflüsse kann bei einer Versuchsdauer von 361 Tagen nicht gänzlich ausgeschlossen werden. So zeigen z. B. die ersten Zuflüsse von etwa $270 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ nur geringe Kapillarblockabflüsse (vgl. Abb. 5.28 Tag 179 und 203). Aber auch andere Einflüsse, welche die Streuung der Kapillarblockabflüsse verursacht haben könnten, wie technische Probleme mit Kippzählern oder nicht vollständig zu vermeidende Temperaturveränderungen, sind denkbar.

Die mit dem Sicherheitsbereich ermittelte praxisorientierte laterale Dränkapazität liegt im Bereich der Dränkapazität, der über erste nennenswerte Durchbrüche festgelegt werden würde. Ohne Berücksichtigung der Überschreitungen bei $240 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Zufluss läge dieser zwischen $260 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ und $287 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Zufluss.

Auch während der langen Versuchsdauer von knapp einem Jahr weist die Kapillarsperrenkombination aus Natursand als Kapillarschicht und Kapillarblock aus Bau-schutt-Recyclingmaterial ihre nachhaltige Funktion auf einem hohen Belastungsniveau nach.

Matrixpotenziale und Wassergehalte

Die Matrixpotenziale nehmen im Verlauf des Versuchs mit zunehmender Zuflusssteigerung ab (Abb. 5.30). Dabei zeigen die Tensiometer in 52 cm Höhe die höchst-

ten Werte beginnend bei 40 bis 70 hPa in den Segmenten 1, 2, 5 und 6 bei $100 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Zufluss. Die Segmente 3 und 4 weisen bei dieser Zuflussmenge 260 und 300 hPa auf. Bei Abschluss des Versuchs nach Zuflussraten von über $300 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ liegen die Werte der Tens 52 cm zwischen 15 und 30 hPa.

Bei den Matrixpotenzialen der 35 cm-Meßgeräte ist in den Segmenten 1, 2, 4 und 6 ein gleichmäßiges Absinken der Werte in einem Bereich von etwa 30 hPa bis etwa 10 hPa zu beobachten. In den Segmenten 3 und 5 beginnen die Werte ab etwa $250 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Zufluss bis auf unter 1 hPa zu sinken.

Die Messgeräte in 25 cm Höhe in den beiden letztgenannten Segmenten zeigen ab der gleichen Zuflussmenge eine ähnliche Entwicklung der Wasserspannungen. Segment 5 weist jedoch erst ab etwa $300 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Wasserspannungen von unter 1 hPa auf. In den Segmenten 1, 2 und 4 sinken die Werte von anfangs ca. 10 hPa bis auf etwa 2 hPa. Eine leicht verstärkte Abnahme der Werte kann ebenfalls bei etwa $250 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Zufluss registriert werden. Dies geht konform mit der ermittelten potentiellen lateralen Dränkapazität unter Berücksichtigung des Sicherheitsbereichs der Natur-/Recyclingmaterial-kombination. Die Messwerte des Tensiometers in Segment 6 in 25 cm Höhe sowie die Wasserspannungen der Tensiometer des Kapillarblocks in den Segmenten 2, 3 und 6 können aufgrund von technischen Defekten in Abbildung 5.30 nicht berücksichtigt werden. Die Tensionen im Kapillarblock befinden sich schon zu Beginn des Versuchs auf einem vergleichsweise geringen Niveau, da das Recyclingmaterial in einem feuchteren Zustand eingebaut wurde als in dem Recyclingmaterialkombinationsversuch. Ab einer Zuflussmenge von etwa $220 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ sinken die Wasserspannungen in Segment 5 auf unter 1 hPa, was als ein Hinweis für eine entsprechende Wasserbewegung in diesem Bereich verstanden werden kann.

Diese Beobachtung wird durch den Verlauf der Wassergehalte des Kapillarblocks in Segment 5 in Abhängigkeit von der Zuflussrate weiter unterstützt (Abb. 5.31). In dem Bereich, in dem die laterale Dränkapazität festgelegt wurde, sind in Segment 5 im Vergleich zu den anderen Segmenten die stärksten Veränderungen im Wassergehalt zu vermerken. 5 cm oberhalb der Schichtgrenze zeigt sich eine deutliche Wassergehaltssteigerung mit zunehmenden Bewässerungsmengen. Während sich die Wassergehaltsveränderungen des ersten Segments zwischen 6 und 9 Vol.-% bewegen, steigen die Wassergehalte der FDR 25 cm der anderen Segmente von etwa 15 Vol.-% auf über 20 Vol.-% bzw. über 25 Vol.-% in Segment 4. Eine vergleichbare Wassergehaltssteigerung weist das Segment 1 in 35 cm Höhe auf. Da die Werte der anderen Segmente in dieser Höhe eine deutlich geringere Reaktion auf die Zuflusssteigerung aufzeigen (etwa zwischen 4 und 8 Vol.-%), ist zu vermuten, dass die Stirnwandbewässerung die Messgeräte im ersten Segment in 35 cm Höhe noch verstärkt beeinflusst haben. Die FDR-Sonden in 52 cm Höhe zeigen während des gesamten Versuchs in allen Segmenten nahezu gleichbleibende Werte.

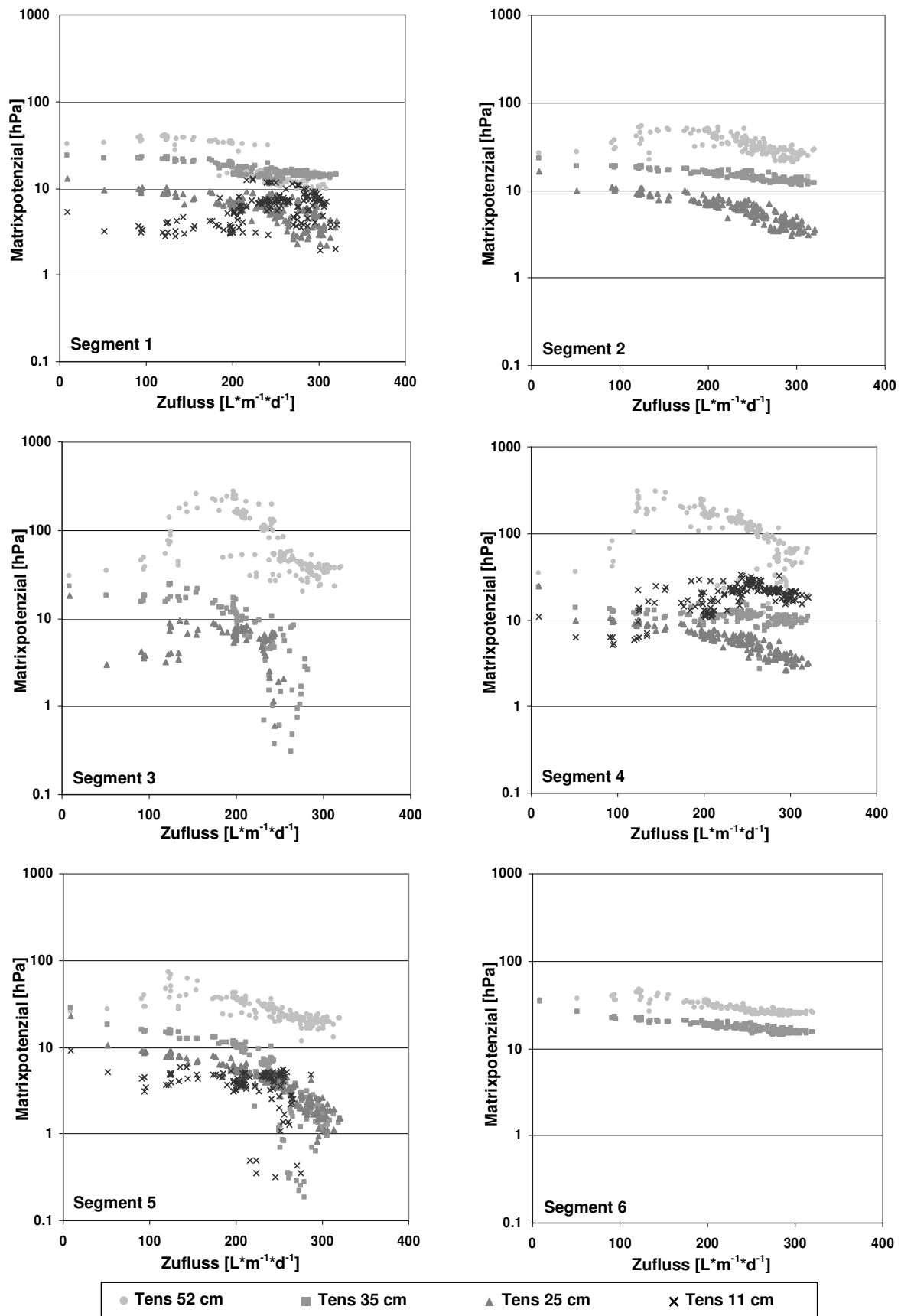


Abbildung 5.30: Matrixpotenziale [hPa] in Abhängigkeit der Zuflussrate [$L \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$] während des Kipprinnenversuchs der Natur-/Recyclingmaterialkombination N-KS-0/2(Ems) mit R-KB-Q-2/10; Segment 1 (Rinnenkopf) bis Segment 6 (Rinnenfuß) jeweils in den Höhen 52 cm, 35 cm, 25 cm in der Kapillarschicht und 11 cm im Kapillarblock (gemessen von Rinnenboden)

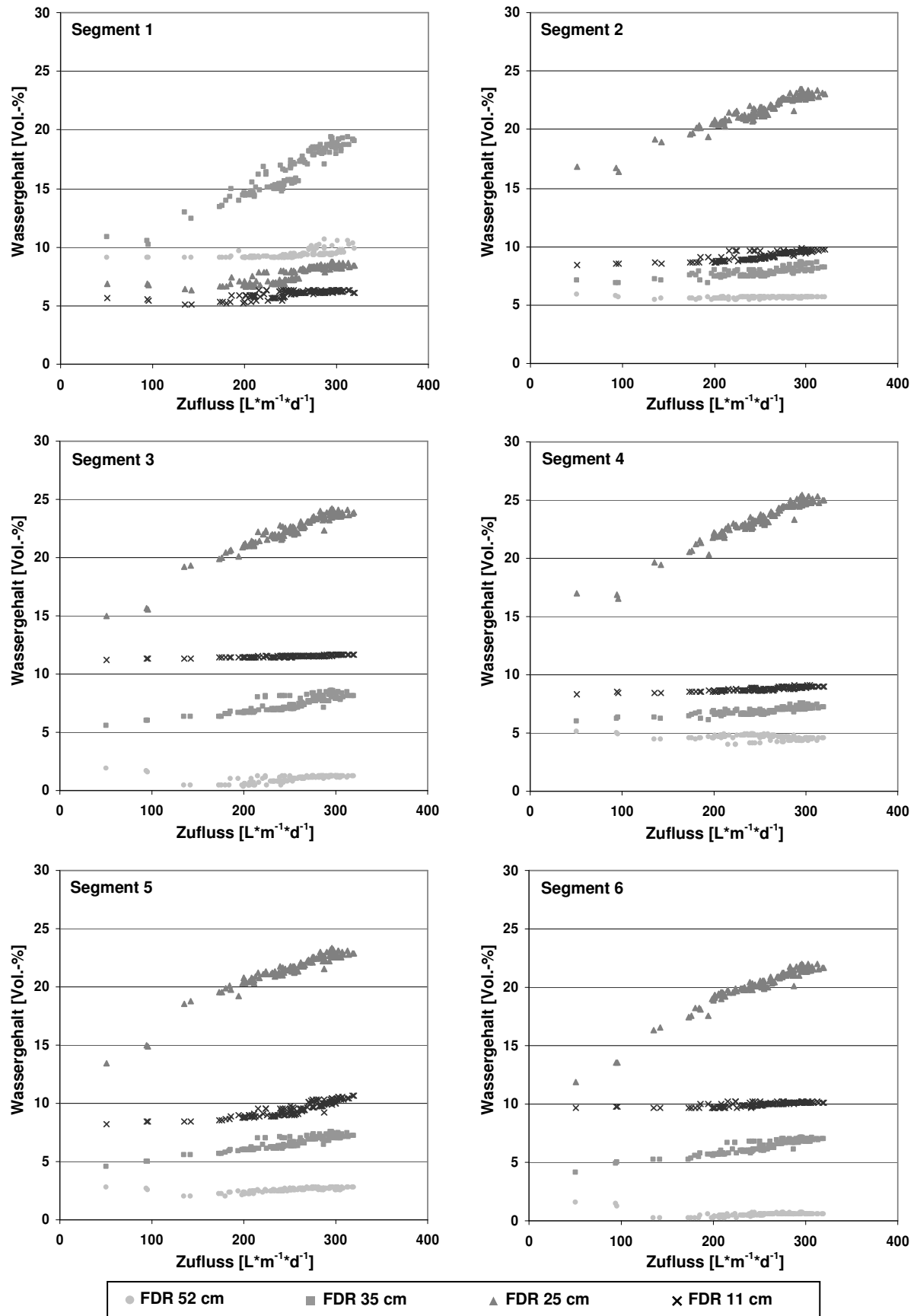


Abbildung 5.31: Wassergehalte [Vol.-%] in Abhängigkeit der Zuflussrate [$L \cdot m^{-1} \cdot d^{-1}$] während des Kipprinnenversuchs der Natur-/Recyclingmaterialkombination N-KS-0/2(Ems) mit R-KB-Q-2/10; Segment 1 (Rinnenkopf) bis Segment 6 (Rinnenfuß) jeweils in den Höhen 52 cm, 35 cm, 25 cm in der Kapillarschicht und 11 cm im Kapillarblock (gemessen von Rinnenboden)

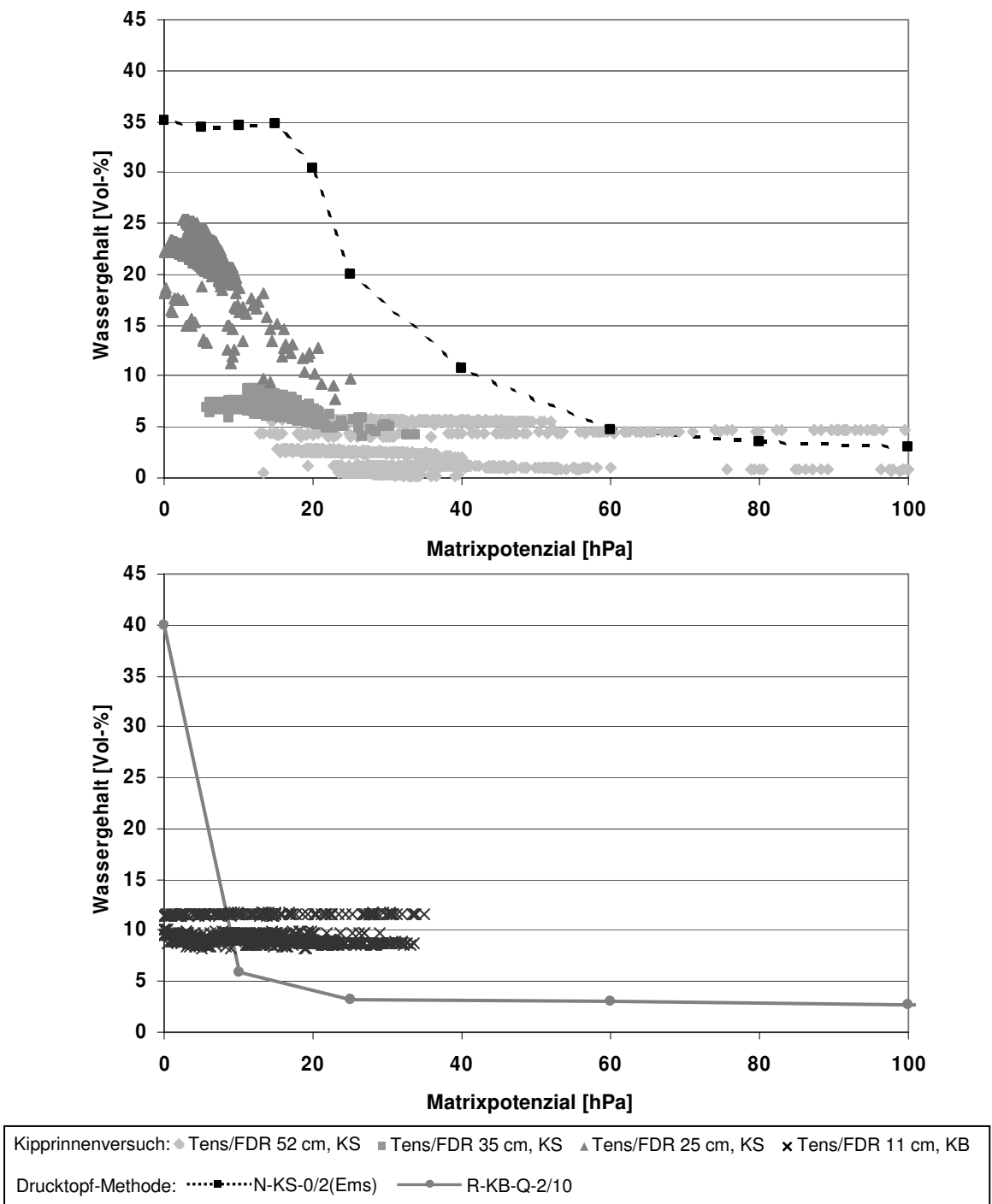


Abbildung 5.32: Vergleich der Retentionsbeziehungen für das Material der Kapillarschicht N-KS-0/2(Ems) (oben) und des Kapillarblocks R-KB-Q-2/10 (unten) ermittelt aus Messwerten des Kipprinnenversuchs der Natur-/Recyclingmaterialkombination bzw. mittels Drucktopf-Methode

In Abbildung 5.32 sind die Messwerte der Tensiometer und FDR-Sonden des Kipprinnenversuchs der Natur-/Recyclingmaterialkombination den nach der Drucktopf-Methode ermittelten Retentionsbeziehungen der Materialien N-KS-0/2(Ems) und R-KB-Q-2/10 zugeordnet.

Zwischen der Hauptentwässerungskurve des Kapillarschichtsand und den Wassergehalten sowie Wasserspannungen, die sich bei den maximalen Bewässerungsraten ergaben und somit der materialspezifischen Hauptbewässerungskurve in einer Kapillarsperre entsprechen, werden viele sekundäre Retentionskurven deutlich. Aufgrund des gleichen Kapillarschichtmaterials ist der Bereich, in dem sich die Hystereseschleifen von N-KS-0/2(Ems) während des Kipprinnenversuche mit der Natur-/Recyclingmaterialkombination bewegen, vergleichbar mit dem der Naturmaterialkombination (vgl. Abb. 5.21). Die Hauptbewässerungskurve hat sich bei diesem Versuch jedoch weiter nach links verschoben und der Wasserspannungsbereich von 60 bis 100 hPa zeigt geringere Abweichungen von den mit der Drucktopf-Methode ermittelten Werten. Ein Grund, dass die Hauptbewässerungskurve des Kapillarschichtsands N-KS-0/2(Ems) in einem niedrigerem Wasserspannungsbereich liegt, kann darin gesehen werden, dass die Kapillarschicht der Natur-Recyclingmaterialkombination aufgrund der höheren lateralen Dränkapazität mehr Wasser führt als in der Naturmaterialkombination.

Diesbezüglich stellt sich eine andere materialspezifische Hauptbewässerungskurve ein, die somit entsprechend vom Kapillarblockmaterial beeinflusst wird. Aufgrund der größeren Körnung des Kapillarblocks aus Recyclingmaterial gegenüber der Körnung des Naturmaterials N-KB-2/5 erhöht sich zum einen die Differenz zwischen den hydraulischen Leitfähigkeitsfunktionen. Dies hat zur Folge, dass das Kapillarblockmaterial R-KB-Q-2/10 in Kombination mit N-KS-0/2(Ems) bei gleichen Matrixpotenzialen an der Grenzschicht weniger Wasser abführt als N-KB-2/5 in der Naturmaterialkombination, da die Poren, die bei N-KB-2/5 bereits gefüllt sind in R-KB-Q-2/10 noch nicht für die Wasserbewegung zur Verfügung stehen. Zum anderen ergibt sich mit dem ausgeprägteren Porensprung bei der Natur-/Recyclingmaterialkombination eine höhere Grenzflächenspannung der Menisken, die sich im Kapillarschichtmaterial an der Schichtgrenze zum Kapillarblock ausbilden, wodurch N-KS-0/2(Ems) in der Kombination mit R-KB-Q-2/10 mehr Wasser führen kann als in Kombination mit N-KB-2/5 als Kapillarblock.

Der Kapillarblock wurde nicht nur feucht eingebaut, sondern vor dem Einbau des Kapillarschichtsand zusätzlich gewässert. Daraus resultieren die Wassergehalte von 9 bis 11,5 Vol.-%, die bis zu der Wasserspannung von 35 hPa auf gleichem Niveau verbleiben. Dieser Effekt ist durch die höhere Wasseraufnahmefähigkeit von R-KB-Q-2/10 im Vergleich zum Naturkies zu erklären.

Während des Nachweises der lateralen Dränkapazität durch Kipprinnenversuche befinden sich die Kapillarsperrenmaterialien in der Bewässerungsphase. Abbildung 5.33 gibt die hydraulische Leitfähigkeit des Sandes N-KS-0/2(Ems) bei Be- und bei Entwässerung wieder. Diesen k_u -Kurven steht der Verlauf der ungesättigten Leitfähigkeit des Kapillarblocks R-KB-Q-2/10 gegenüber, der aus der Retentionsbeziehung der physikalischen Voruntersuchungen ermittelt wurde. Auch bei diesem Ver-

sich war es nicht möglich, eine Wasserleitfähigkeitsfunktion auf Basis der Matrixpotenziale und Wassergehalte, die während des Versuchs in der Kipprinne herrschten, einen der Bewässerung entsprechenden Verlauf zu berechnen.

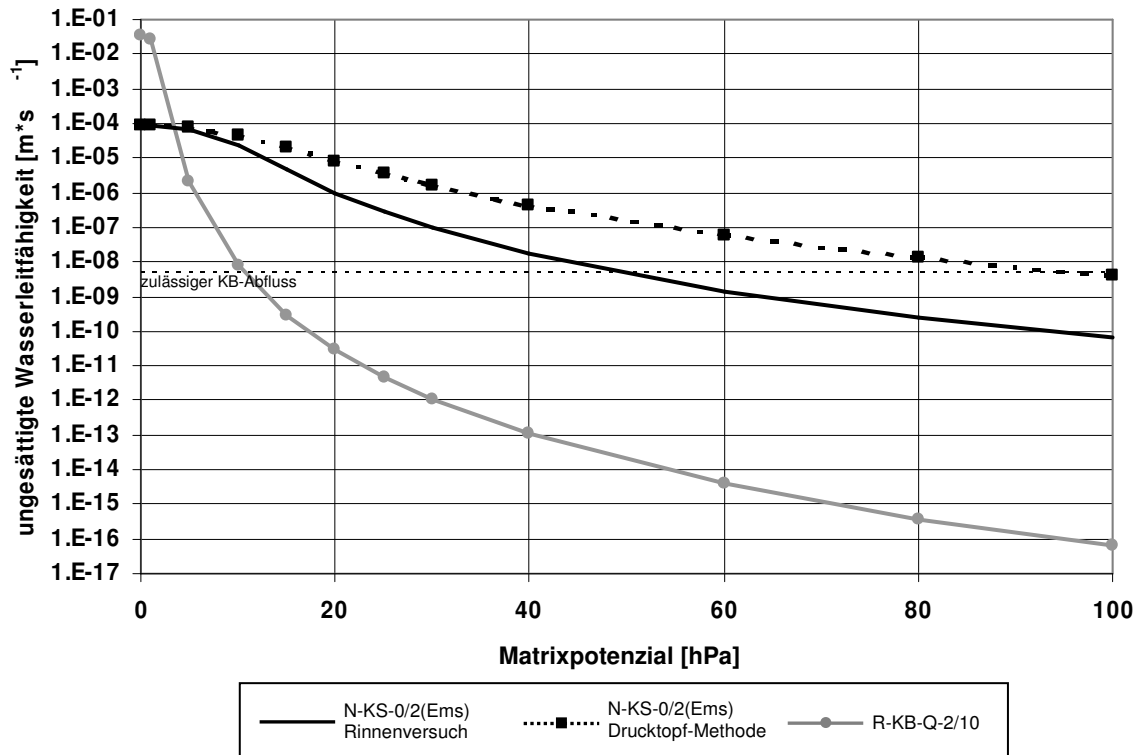


Abbildung 5.33: Wasserleitfähigkeitsfunktionen von N-KS-0/2(Ems) und R-KB-Q-2/10 basierend auf den Retentionsbeziehungen der Drucktopf-Methode im Vergleich zu der Wasserleitfähigkeitsfunktion von N-KS-0/2(Ems) ermittelt aus den, während des Kipprinnenversuchs der Natur-/Recyclingmaterialkombination herrschenden Wasserspannungen und Wassergehalten

Bis 6 hPa zeigt sich eine nahezu gleichbleibende Wasserleitfähigkeit von N-KS-0/2(Ems). Erst ab ca. 10 hPa sinkt die ungesättigte Wasserleitfähigkeit deutlich schneller mit ansteigenden Matrixpotenzialen im Vergleich zu der Kurve des Hauptentwässerungsastes. Der Schnittpunkt zwischen den k_u -Funktionen von Kapillarschicht- und Blockmaterial erfährt dadurch kaum eine Veränderung.

Auch die Gegenüberstellung der dargestellten k_u -Funktion des Kapillarblockmaterials R-KB-Q-2/10 mit dem Kurvenverlauf der ungesättigten Wasserleitfähigkeit des Kapillarschichtssands N-KS-0/2(Ems) weist bei 8 hPa noch einen Unterschied von etwa 3 Zehnerpotenzen auf. Bis etwa zu einer Zuflussrate von $200 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ herrscht diese Wasserspannung 5 cm oberhalb der Schichtgrenze in dem Kipprinnenversuch vor. D. h., aufgrund der immer noch wesentlich höheren Wasserleitfähigkeit der Kapillarschicht bleibt die Wirkung der Kapillarsperre in diesem Wasserspannungsbereich noch bestehen. Nimmt die Wasserspannung an der Grenzschicht immer weiter ab, steigt auch die Wasserleitfähigkeit des Kapillarblocks und damit seine Durchlässigkeit (KÄMPF 2000, STEINERT 1999, VON DER HUDE 2000).

Auf der Grundlage der eingesetzten Methodik zur Erfassung der Matrixpotenziale und Wassergehalte während des Kipprinnenversuchs kann jedoch keine genaue Angabe über die Verhältnisse an der Grenzschicht bei Erreichen der lateralen Dränkapazität gemacht werden. Das war allerdings auch nicht das Ziel der vorliegenden Untersuchungen.

Für die Abschätzung der lateralen Dränkapazität wird u.a. von Ross (1990) ein einfaches Verfahren vorgeschlagen, das in Kapitel 3.3.3, Formel 3.9 beschrieben ist. Die Gleichung berücksichtigt neben den versuchstechnischen Randbedingungen (Rinnenneigung: 15°), die hydraulische Leitfähigkeit des Kapillarschichtmaterials bei Sättigung ($8,8 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) und beim Schnittpunkt der Funktion des Kapillarblocks ($\psi_m = 3 \text{ hPa}$) sowie die Infiltrationsrate, die in diesem Fall der potenziellen lateralen Dränkapazität ($6,1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) gleichgesetzt wurde. Unter der Annahme, dass der Parameter b wie bei Ross (1990) 4 m^{-1} beträgt, wurde für die so genannte Abschlagslänge L ein Wert von $< 9 \text{ m}$ für die Natur-/Recyclingmaterialkombination ermittelt, wobei im Vergleich zur Naturmaterialkombination erwartungsgemäß nur geringe Unterschiede im Ergebnis vorliegen.

Unter Berücksichtigung der Einfachheit des Modellansatzes und der von Ross (1990) getroffenen Annahmen, dass zum Beispiel keine präferenziellen Fließwege auftreten, ist das Ergebnis durchaus vergleichbar mit der realen Kipprinnenlänge von 6 m . Insofern bietet das von Ross (1990) aufgestellte Modell die Möglichkeit einer Plausibilitätsprüfung von Kipprinnenversuchen.

5.2.4 Fazit der Kipprinnenversuche

Aus den Ergebnissen der Kipprinnenversuche können folgende Punkte bezüglich der Leistungsfähigkeit der Materialkombinationen bzw. der Abhängigkeit der Matrixpotenziale und der Wassergehalte von den Zuflussmengen zusammengefasst werden:

- **Leistungsfähigkeit der Materialkombinationen**

Die **Naturmaterialkombination**, die als Referenz für die Untersuchungen für die Eignung des Einsatzes von Bauschutt-Recyclingmaterial in Kapillarsperren herangezogen wird, weist eine potenzielle laterale Dränkapazität von $273 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ auf. Bei der **Recyclingmaterialkombination** kann lediglich eine potenzielle laterale Dränkapazität von $64 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ festgestellt werden. Diese Materialkombination muss aufgrund der geringen Leistungsfähigkeit für den Einsatz in einem Deponieoberflächenabdichtungssystem als ungeeignet angesehen werden. Mit der **Kombination des Sandes aus der Naturmaterialkombination und dem Kies aus der Recyclingmaterialkombination** konnte eine potenzielle laterale Dränkapazität von $306 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ermittelt werden.

Aus den vorliegenden Ergebnissen der Kipprinnenversuche muss geschlossen werden, dass insbesondere der Recyclingsand nicht den Anforderungen einer Kapillarschicht entspricht. In Bezug auf den Kapillarblock aus Bauschutt-Recyclingmaterial wird zwar ein Porensprung realisiert, was sich im Rahmen der Voruntersuchungen in den ungesättigten Leitfähigkeitsfunktionen von R-KS-Q-0/2 und R-KB-Q-2/10 widerspiegelte. Diese wiesen bei 10 hPa noch Unterschiede von mehreren Zehnerpotenzen zueinander auf. Allerdings zeigten sich in der Korngrößenverteilung von R-KS-Q-0/2 hohe Anteile der Fraktion $> 0,63$ mm, die zu einer Überschreitung der empfohlenen Bandbreite führten. Die Folge ist eine mangelnde Kapillarität des Kapillarschichtmaterials und die damit verbundene geringe Leistungsfähigkeit der Recyclingmaterialkombination. Daraus resultiert, dass für eine leistungsstarke Kapillarsperrenkombination die empfohlenen Bandbreiten einzuhalten sind.

Die potenzielle laterale Dränkapazität der Natur-/Recyclingmaterialkombination liegt um etwa $30 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ höher als bei der Naturmaterialkombination. Aufgrund der Verwendung des gleichen Kapillarschichtssands bei beiden Kipprinnenversuchen wird die höhere Leistungsfähigkeit auf den Kapillarblock aus Bauschutt-Recyclingmaterial zurückgeführt. Nach SMESRUD & SELKER (2001) ist die laterale Dränkapazität einer Kapillarsperrenkombination umso höher, je größer der Korngrößenunterschied zwischen Kapillarschicht- und Kapillarblockmaterial ist. Limitierend wirkt diesbezüglich natürlich die benötigte Filterstabilität der Materialien zueinander. Ausschlaggebend für die höhere Leistungsfähigkeit durch den Einsatz eines gröberen Kapillarblocks ist der größere Porensprung bzw. der sehr geringe Wassereintrittswert des kiesigen Materials. D. h., erst bei Erreichen von sehr geringen Matrixpotenzialen an der Grenzschicht füllen sich die kleinsten Poren des Kapillarblocks mit Wasser, die folgend für die Wasserbewegung zur Verfügung stehen. Bei weniger groben Kapillarblockmaterialien ist der Zustand, dass sich die ersten Poren mit Wasser füllen und damit ein Versagen der Kapillarsperrenfunktion verbunden ist, schon bei höheren Matrixpotenzialen an der Grenzschicht erreicht (BAKER & HILLEL 1990, HILLEL & BAKER 1988, STEENHUIS ET AL. 1991, TAMI ET AL. 2004).

Allerdings zeigt das Recyclingmaterial N-KB-Q-2/10 nach den Retentionsbeziehungen der Voruntersuchungen trotz gröberer Korngrößenverteilung einen höheren Wassereintrittswert als das Naturmaterial N-KB-2/5. Die Erklärung dafür ist in der raueren Oberflächenbeschaffenheit bzw. in der höheren Eigenporosität des Recyclingmaterials zu finden. Der Wassereintrittswert sollte zwar anhand der Hauptbewässerungskurve ermittelt werden (TAMI ET AL. 2004). Ein Vergleich der Retentionsbeziehungen auf dem Bewässerungsast zwischen dem Naturkies und dem Recyclingmaterial ist auf Basis der Messwerte, die während der Kipprinnenversuche ermittelt wurden, jedoch nicht möglich. Die Eigenporosität spiegelt sich somit in der Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung, die durch die Druck-

topf-Methode ermittelt wurde, wider, zeigt aber keinen negativen Effekt auf die Wirksamkeit der Kapillarsperrenfunktion.

Aus der Annahme, dass bei einer Eigenporosität des Kapillarsperrenmaterials der eigentliche Porensprung nicht gewahrt bleibt und dadurch Fließwege geschaffen werden, die zur Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit der Kapillarsperre führen, empfahl BAUER (2001) die Wasseraufnahmefähigkeit auf 1 Masse-% zu beschränken. Mit dem Nachweis einer potenziellen lateralen Dränkapazität von über $300 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ unter Einsatz des Bauschutt-Recyclingmaterials als Kapillarblock muss dieser Parameter entsprechend der Wasseraufnahmefähigkeit von R-KB-Q-2/10 auf mindestens 3,7 Masse-% erweitert werden. Die lange Versuchsdauer unterstützt diese Vorderung.

Sowohl die erreichte Leistungsfähigkeit der Naturmaterialkombination als auch die der Natur-/Recyclingmaterialkombination liegen im Rahmen der Dränkapazitäten für geeignete Kapillarsperrenmaterialien nach KÄMPF (2000), STEINERT (1999) und NEFF & GARTUNG (2000).

- **Matrixpotenziale, Wassergehalte und Wasserleitfähigkeiten**

Der Bereich der Kapillarschicht in 52 cm Höhe, also 32 cm über der Schichtgrenze, nimmt unter Einsatz der Stirnwandbewässerung im Regelfall nicht nachweisbar an der lateralen Wasserbewegung teil. In 35 cm Höhe (15 cm über der Grenzschicht) zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Messwerte gegenüber der Zuflussrate, die jedoch nur geringe Veränderungen der Wassergehalte zur Folge hat. Eine Abhängigkeit von Wasserspannung und Wassergehalt bezüglich der Zuflüsse zeigt ebenfalls der Bereich 5 cm über der Schichtgrenze auf (Messgeräte in 25 cm Höhe). Dieser Zusammenhang äußert sich in einer deutlichen Zunahme der Wassergehalte bei stetiger Zuflusssteigerung während im Vergleich die Wasserspannungen in geringerem Maße abfallen. Die Reaktionen der Messwerte während des Kipprinnenversuchs der Recyclingmaterialkombination bewegen sich in einem kleinen Wertebereich, zeigen aber noch ähnliche Tendenzen zu den anderen Kipprinnenversuchen.

Aus diesen Punkten kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass eine Kapillarschichtmächtigkeit von 30 cm ausreichend ist, da der größte Anteil des Wassers unmittelbar über der Schichtgrenze transportiert wird. Dies stimmt mit Ergebnissen von STEINERT (1999) und VON DER HUDE (1999) überein.

Bei diesen Betrachtungen muss jedoch zusätzlich berücksichtigt werden, dass die Durchbrüche in den Kapillarblock, die mit Erreichen des lateralen Dränkapazitätsbereichs Abflusssteigerungen überdurchschnittlichen Ausmaßes annehmen, nicht die Folge eines gleichmäßigen Flusses sind (HILL & PARLANGE 1972, in

KUTILEK & NIELSEN 1994 und HILLEL 2004). Die im Kapillarblock gemessenen Wasserspannungen und Wassergehalte weisen darauf hin, dass die Kapillarblockabflussmengen auf punktuelle Durchbrüche bzw. „fingering“ zurückzuführen sind (BAKER & HILLEL 1990, HILLEL & BAKER 1988, KUTILEK & NIELSEN 1994). Anhand einiger Reaktionen von Messgeräten im Kapillarblock kann auf Durchbrüche geschlossen werden. Sie geben Hinweise, an welcher Position in etwa ein Durchbruch stattgefunden haben könnte. Aufgrund der unregelmäßigen Wasserflüsse in dem groben Material des Kapillarblocks und der auch daraus resultierenden Messschwierigkeiten können diese Angaben nur als Tendenz betrachtet werden. Die Durchbrüche, die neben der Systemüberlastung z. B. auch auf Heterogenitäten an der Grenzschicht beruhen (BAUTERS ET AL. 1998, RITSEMA ET AL. 1998, RITSEMA & DEKKER 1994), können somit von den Messgeräten nicht vollständig wiedergegeben werden.

Das Kapillarsperrensystem befindet sich während der Kipprinnenversuche in Bewässerungsphasen. In diesen Bewässerungsphasen weisen die Kapillarsperrenmaterialien aufgrund des Hystereseeffekts grundsätzlich verschiedene Wasserretentionsbeziehungen auf als in Entwässerungsphasen. Auf der Basis der in der Kapillarschicht N-KS-0/2(Ems) gemessenen Tensionen und Wassergehalte konnten zusammen mit der gesättigten Leitfähigkeit ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktionen berechnet werden. Anhand der gemessenen Werte in den Kapillarblockmaterialien N-KB-2/5 und R-KB-Q-2/10 konnte allerdings keine Wasserleitfähigkeitsfunktion ermittelt werden. Exakte Aussagen, welche Wasserleitfähigkeitsverhältnisse an der Grenzschicht während eines Durchbruchereignisses in den Kapillarsperrenmaterialien herrschen, können anhand der Messwerte aus den Kipprinnenversuchen somit nicht getroffen werden. Während z. B. WOHNLICH (1991) und BAUER (2001) annehmen, dass die Kapillarsperre ihre Wirksamkeit verliert, wenn sich die Wasserleitfähigkeitsfunktionen von Kapillarschicht und Kapillarblock schneiden, gibt JELINEK (1997) zu bedenken, dass der Kapillarblock schon bei höheren Wasserspannungen erhebliche Wassermengen ableiten kann. Wichtig ist, dass auch unter Berücksichtigung der Hysterese eine Differenz von mehreren Zehnerpotenzen zwischen den Wasserleitfähigkeitsfunktionen von Kapillarschicht- und Kapillarblockmaterialien herrschen muss. Dies gilt insbesondere für den Wasserspannungsbereich, der bei hohen Belastungen an der Grenzschicht auftritt. Bei den vorliegenden Untersuchungen handelt es sich damit um Wasserspannungen unter 10 hPa. Auch VON DER HUDE (1999) beschreibt insbesondere bei hohen Belastungen Tensionen von unter 20 hPa an der Grenzschicht.

Der dargestellte Hystereseeffekt zwischen Entwässerungs- und Bewässerungsexperimenten ist von großer Bedeutung für die Bewertung und Modellierung von Kapillarsperrenkombinationen. Sowohl die Wasserretentionsfunktion als auch die Wasserleitfähigkeitsfunktion werden im Labor im Regelfall im Entwässerungsex-

periment bestimmt. Damit sind gerade in grobporigen Materialien Unsicherheiten und Fehler bei der Materialbewertung und Modellierung von Kapillarsperren nicht auszuschließen.

6 Numerische Simulation

6.1 Simulation des Kipprinnenversuchs der Natur-Recyclingmaterialkombination

Für die Simulation des Kipprinnenversuchs der Natur-Recyclingmaterialkombination wurde zum einen auf die Parameter zurückgegriffen, die aus den Wasserretentionsbeziehungen der Drucktopfuntersuchungen abgeleitet werden konnten (Parametersatz A). Zum anderen standen die während des Kipprinnenversuchs mittels Tensiometer- und FDR-Sonden abgeleiteten VAN-GENUCHTEN-Parameter zur Verfügung (Parametersatz B). Für die gesättigte Wasserleitfähigkeit des Kapillarschichtands N-KS-0/2(Ems) wurde der Mittelwert der Labormessungen eingesetzt, während die Leitfähigkeit des Kapillarblockkieses R-KB-Q-2/10 nach BEYER (1964) berechnet wurde (Tab. 6.1).

Tabelle 6.1: Van-Genuchten-Parameter und gesättigte Wasserleitfähigkeit von Kapillarschicht (N-KS-0/2(Ems)) und Kapillarblock (R-KB-Q-2/10) der Natur-Recyclingmaterialkombination
A: Parameter abgeleitet aus Labor-Stechzylindermessungen im Drucktopfverfahren
B: Parameter abgeleitet aus Tensiometer- und FDR-Messungen während des Kipprinnenversuchs

Parameterkombination	Material	θ_s [Vol.-%]	θ_r [Vol.-%]	α [$1 \cdot \text{cm}^{-1}$]	n [-]	k_f [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
A	N-KS-0/2(Ems)	40	4	0,06108	3,0309	$8,8 \cdot 10^{-5}$
	R-KB-Q-2/10	42	2	0,62312	5,06069	$3,25 \cdot 10^{-21}$
B	N-KS-0/2(Ems)	17,6	5,3	0,04619	4,87677	$8,8 \cdot 10^{-5}$
	R-KB-Q-2/10	42	2	0,62312	5,06069	$3,25 \cdot 10^{-21}$

¹berechnet nach BEYER (1964)

In Abbildung 6.1 werden die Simulationsergebnisse der beiden Parameterkombinationen gegenübergestellt und mit den gemessenen Daten verglichen.

Die obere Grafik zeigt die Übereinstimmung der gemessenen Zuflüsse des Kipprinnenversuchs der Natur-/Recyclingmaterialkombination mit denen, die in das Modell eingegangen sind. Die Gegenüberstellung der Kapillarschicht- bzw. Kapillarblockabflüsse weisen dagegen Differenzen auf. Mit der Parameterkombination A, deren van-Genuchten-Parameter aus den Labor-Drucktopfentwässerungsversuchen abgeleitet wurden, kann bereits ab dem 12. Tag nahezu keine Reaktionen des Kapillarschichtabflusses mehr auf Zuflussratensteigerungen beobachtet werden. Nach sehr geringen Zunahmen bleibt der Kapillarschichtabfluss für den restlichen Verlauf der Simulation auf einem Niveau von etwa $120 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Die Differenz zu den Zuflüssen spiegelt sich in der Darstellung der Kapillarblockabflüsse wider.

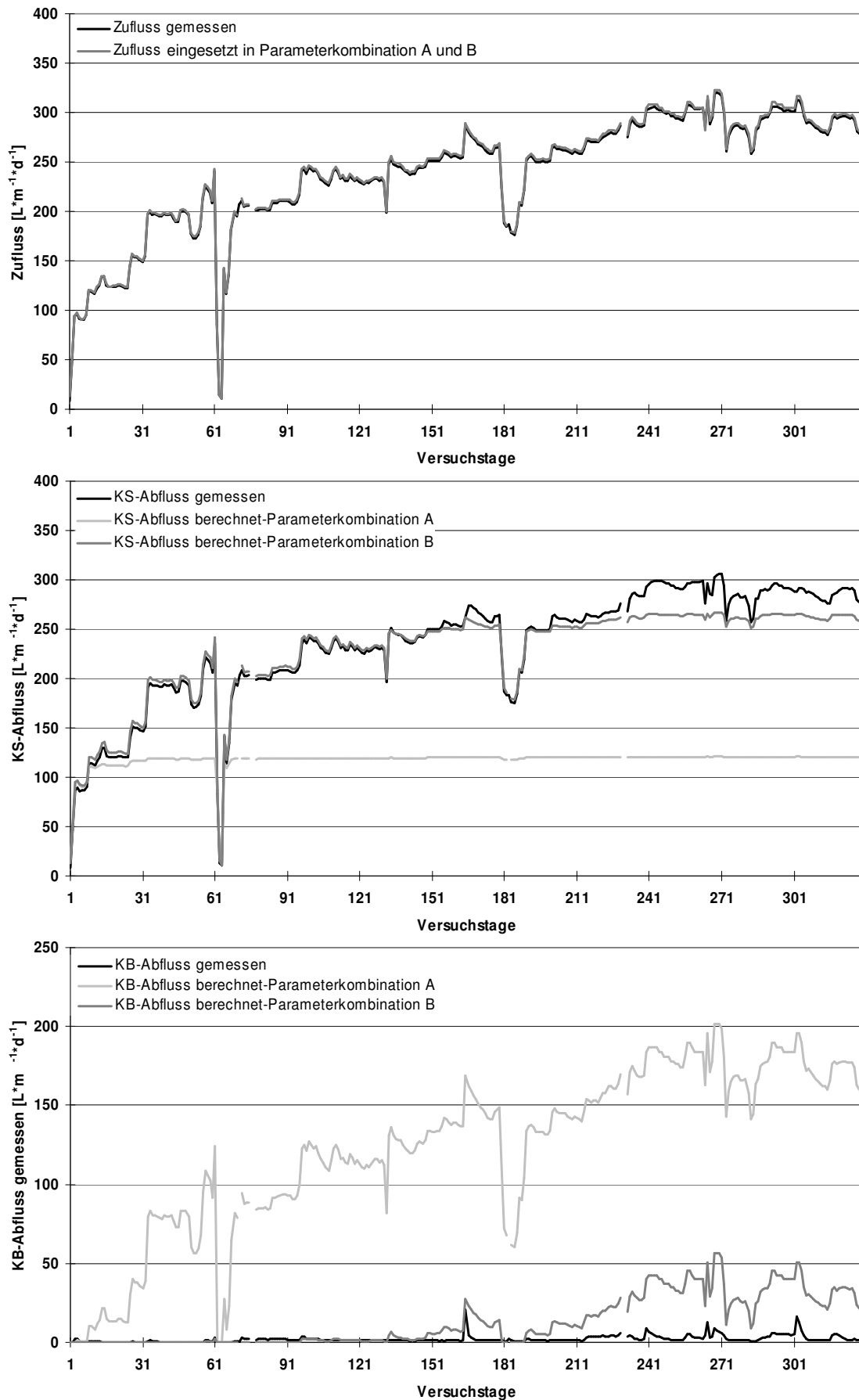


Abbildung 6.1: Gegenüberstellung der im Kipprinnenversuch und in den Simulationen eingesetzten Zuflüsse (oben) sowie gemessenen und mittels Parameterkombination A (Drucktopfverfahren) und B (Tensiometer-/FDR-Sondenmessungen) berechneten Kapillarschicht- (Mitte) und Kapillarblockabflüsse (unten) des Kipprinnenversuchs der Natur-/Recyclingmaterialkombination bei 15° Neigung (vgl. Tab. 6.1)

Die Parameterkombination B, deren van-Genuchten-Parameter des Kapillarschicht-sands aus den Tensionen und Wassergehalten im Verlauf des Kipprinnenversuchs ermittelt wurden, zeigt bis zu einer Zuflussrate von etwa $250 \text{ L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ eine gute Übereinstimmung. Bis zur Zuflussrate von etwa $220 \text{ L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ kann nur eine leichte Überschätzung des Kapillarschichtabflusses der Simulation gegenüber den gemessenen Werten beobachtet werden.

Diese Überschätzung kann darauf zurückgeführt werden, dass in diesem Zuflussmengenbereich, die mittels der Parameterkombination B simulierten Kapillarblockabflüsse, die gemessenen unterschreiten. Mit weiteren Zuflusssteigerungen über $250 \text{ L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ kann im Modell noch eine leichte Zunahme der Kapillarschichtabflüsse errechnet werden, die ähnliche Reaktionen wie die realen Kapillarschichtabflüsse zeigen, sie aber in zunehmendem Maße mehr oder weniger unterschätzen. Daraus folgend resultieren bei der Simulation höhere Durchbruchmengen im Kapillarblock als real gemessen wurde.

Bereits anhand der Abflussganglinien in Abbildung 6.1 wird offensichtlich, dass die Simulation mit der Parameterkombination B besser mit den gemessenen Werten übereinstimmt als die Parameterauswahl A, die sowohl für das Kapillarblock- als auch für das Kapillarschichtmaterial auf der Retentionsbeziehung der Drucktopfuntersuchungen mit Stechzylindern beruht. Dies spiegelt sich entsprechend bei der Ermittlung der potenziellen lateralen Dränkapazität wider (Abb. 6.2 und 6.3). Der Leistungsfähigkeit von $306 \text{ L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, die bei dem Kipprinnenversuch für die Natur-/Recyclingmaterialkombination bestimmt wurde, stehen aus den Simulationsergebnissen $120 \text{ L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ auf Basis der Parameterkombination A und $266 \text{ L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ unter Einsatz der Parameterkombination B gegenüber. Die Zufluss-Kapillarblockabflussbeziehungen beider Simulationen zeigen im Rahmen der Regressionsanalyse zur Bestimmung der potenziellen lateralen Dränkapazität für die Annäherung an die Regressionsgerade mit der Steigung 1 ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 > 0,99$.

Vergleichbar mit den praktischen Kipprinnenversuchen werden bei den Simulationen des Kipprinnenversuchs bereits vor Erreichen des maximalen Wasserabfuhrvermögens der Kapillarschicht Durchbrüche registriert. Der empfohlene Sicherheitsbereich von 10 % zeigt sich auch in diesem Zusammenhang als ausreichend, um die potenzielle laterale Dränkapazität, die als primäres Bewertungskriterium einer Kapillarsperrenkombination gelten muss, auf praktische Anforderungen zu übertragen.

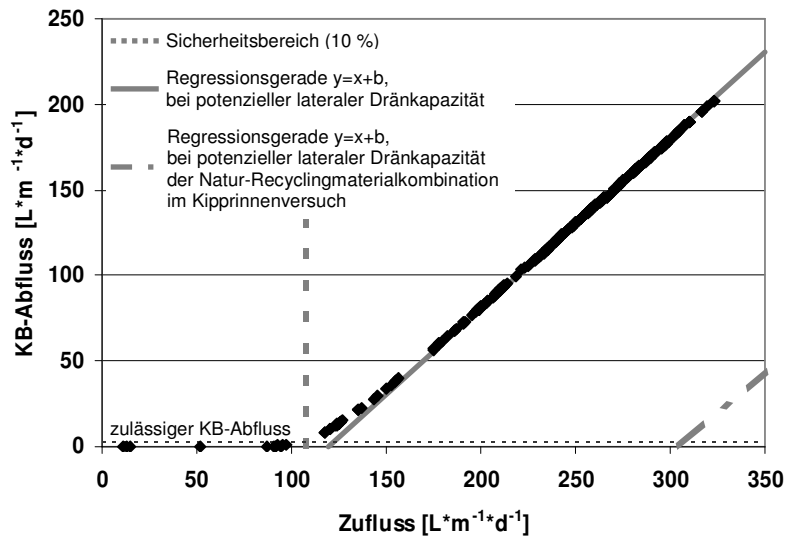


Abbildung 6.2: Zufluss-Kapillarblockabflussbeziehung des mittels der Parameterkombination A (Labor-Drucktopfverfahren) simulierten Kipprinnenversuchs der Natur-Recyclingmaterialkombination bei 15° Neigung (vgl. Parameter in Tab. 6.1)

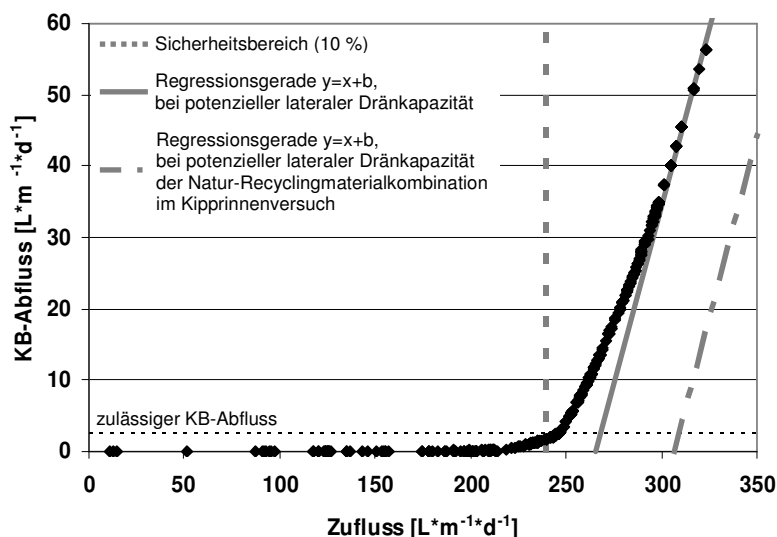


Abbildung 6.3: Zufluss-Kapillarblockabflussbeziehung des mittels der Parameterkombination B (Tensiometer-/FDR-Sondenmessungen) simulierten Kipprinnenversuchs der Natur-Recyclingmaterialkombination bei 15° Neigung (vgl. Parameter in Tab. 6.1)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Simulation mit der Parameterkombination B die Wasserabflußkomponenten - in ihrem zeitlichen Verlauf und in ihren Größenordnungen - sowie die potenzielle laterale Dränkapazität aus den Kipprinnenversuchen am besten wiedergibt. Dieses Resultat bestätigt die Erfahrungen von KÄMPF (1999), dass mit der Parameteridentifikation mittels der Auswertung der Kipprinnenversuche bessere Simulationsergebnisse erzielt werden als mit Stechzylindermessungen. Anhand der während des Kipprinnenversuchs registrierten Messungen von Matrixpotenzial und Wassergehalt konnten jedoch nur die benötigten van-Genuchten-Parameter der Kapillarschicht ermittelt werden.

Für den Kapillarblock musste auch beim Parametersatz B auf die Stechzylindermessungen und damit auf die Entwässerungskurve der Wasserretentionsbeziehung zurückgegriffen werden, was als mögliche Erklärung für die Unterschätzung der potenziellen lateralen Dränkapazität der Simulation im Vergleich zum Kipprinnenversuch herangezogen werden muss. Denn das Porensystem befindet sich im Kipprinnenversuch in einem Bewässerungszustand, so dass sowohl in der Kapillarschicht als auch im Kapillarblock - und insbesondere an der Grenzschicht - bei gleichen Matrixpotenzialen geringere Wassergehalte vorherrschen als es aus den Ergebnissen der Stechzylinder-Entwässerungsexperimente zu erwarten wäre. Geringere Wassergehalte haben bei gleichem Matrixpotenzial entsprechend geringere ungesättigte Wasserleitfähigkeiten zur Folge. Die Verwendung der van-Genuchten-Parameter für den Kapillarblock aus den Stechzylindermessungen muss somit zu einer Überschätzung der Durchbrüche führen. Die sofortige Abnahme der Durchbruchmenge nach Erreichen eines Peaks spiegelt gleichermaßen die hohe Entwässerungsneigung des Kapillarblockmaterials wider. Aus dem Verlauf der berechneten Durchbruchkurven wird deutlich, dass trotz dieser methodischen Einschränkungen mit der eingesetzten Retentionsbeziehung das Verhalten des Kapillarblocks im System aus Kapillarschicht und Kapillarblock gut abgebildet werden kann.

GRÄSLE & HORN (1998) erwarten mit Parametern auf Basis der Wasserretentionsfunktion eine Überschätzung der Leistungsfähigkeit der Kapillarsperre, da sich daraus im sättigungsnahen Bereich höhere Wasserleitfähigkeiten ergeben und somit die Kapillarsperre im Modell in der Lage ist, vermehrt Wasser abzuführen. KÄMPF (1999) erreichte allerdings eine weitaus geringere laterale Dränkapazität bei der numerischen Simulation mittels HYDRUS-2D mit den Parametern aus Stechzylindermessungen als von ihm im Kipprinnenversuch ermittelten Kenngrößen.

Bei der Natur-Recyclingmaterialkombination wurde aus kontinuierlichen Messungen des Matrixpotenzials und der Wassergehalte während des Kipprinnenversuchs eine Retentionsbeziehung ermittelt, für die im Vergleich zur Wasserspannung-Wassergehaltsbeziehung aus den Labor-Voruntersuchungen sowohl ein höherer Wert für den Parameter n aber insbesondere auch ein höherer Lufteintrittswert angepasst wurde. Da die gesättigten Leitfähigkeiten beider Kapillarsperrematerialien in den Simulationsgängen identisch waren, wird der Einfluss des höheren Lufteintrittswerts in der Parameterkombination B auf die potenzielle laterale Dränkapazität von $266 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ deutlich. Die Folge ist, dass nahe der Sättigung im Fall B, wenn der Lufteintrittswert noch nicht überschritten ist, die „größeren“ Poren mit Kapillarwasser gefüllt sind und damit auch am Wassertransport teilnehmen. Dagegen sind im Fall A die gleichen Poren trocken.

Für die Simulationsberechnungen wurden vorab keine Kalibrierungen durchgeführt. Es handelt sich demnach beim Vergleich gemessener und berechneter Abflusskom-

ponenten um eine echte Validierung. Vor diesem Hintergrund sind die Simulationsergebnisse unter Verwendung des Parametersatzes B als gut bis ausreichend zu bewerten, zumal das verwendete numerische Modell HYDRUS-2D ausschließlich den Matrixfluss und keine präferenziellen Fließvorgänge berücksichtigt, wie sie in der Matrix des Kapillarblocks zu erwarten sind.

6.2 Empfindlichkeitsstudien

Empfindlichkeitsstudien wurden mit Hilfe des Modells HYDRUS-2D und den zuvor dargestellten Versuchsläufen unter „ceteris paribus“-Bedingungen durchgeführt. Dabei wurden zum einen sowohl für die Parameterkombination A als auch für die Parameterkombination B die gesättigten Leitfähigkeiten als Einflussgröße geändert (vgl. Tab. 6.1 in Kapitel 6.1). Zum anderen wurde die Zuflussratensteigerung bei der Parameterkombination B – unter Beibehaltung der gesättigten Leitfähigkeiten aus Tabelle 6.1 - variiert, um den Einfluss punktueller Spitzenbelastungen im Modell zu beurteilen.

6.2.1 Einfluss der gesättigten Leitfähigkeit

Tabelle 6.2 beinhaltet die in den Simulationsläufen verwendeten gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten. Bei der Simulation nach Variante I wurde für die Kapillarschicht die mittels Haubenpermeameter im Labor gemessene gesättigte Leitfähigkeit mit der nach BEYER (1964) berechneten Leitfähigkeit für den Kapillarblock kombiniert. Damit entsprechen die Eingangsparmeter von Variante I denen der in Kapitel 6.1 beschriebenen Simulationsdurchgängen. In der Variante II wurden die nach BEYER (1964) berechneten k_f -Werte für Kapillarschicht und -block verwendet. Variante III steht für den Einsatz der nach HAZEN (1895 in HARTGE & HORN 1999) berechneten gesättigten Leitfähigkeiten.

Tabelle 6.2: In den Empfindlichkeitsstudien verwendete gemessene bzw. berechnete gesättigte Wasserleitfähigkeiten von Kapillarschicht- und -blockmaterial der Natur-Recyclingmaterialkombination

Variante	Material	k_f [$m*s^{-1}$]	k_f bestimmt nach
I	Kapillarschicht	$8,8*10^{-5}$	gemessen
	Kapillarblock	$3,25*10^{-2}$	BEYER
II	Kapillarschicht	$3,2*10^{-4}$	BEYER
	Kapillarblock	$3,25*10^{-2}$	BEYER
III	Kapillarschicht	$3,8*10^{-4}$	HAZEN
	Kapillarblock	$1,15*10^{-1}$	HAZEN

Für eine Vereinfachung der Simulationsgänge wurde auf die realen Zuflussdaten des Kipprinnenversuchs verzichtet, die Größenordnung der Zuflussmengen wurde aber eingehalten. Die Zuflüsse wurden in einem Zeitraum von 100 Tagen stufenweise von 50 auf etwas über $300 L*m^{-1}*d^{-1}$ gesteigert.

In Abbildung 6.4 sind die Ergebnisse der drei Simulationsvarianten mit der Parameterkombination A (VAN-GENUCHTEN-Parameter abgeleitet aus Drucktopf-Entwässerungsversuchen an Stechzylindern, vgl. Tab. 6.1) mit Hilfe doppelt skalierten Grafiken dargestellt. Zufluss und Kapillarschichtabfluss (KS-Abfluss) sind an der linken Ordinate abgetragen, während der Kapillarblockabfluss (KB-Abfluss) an der rechten Ordinate abzulesen ist.

Bei Variante I setzen erwartungsgemäß durch die Wahl der gleichen Parameter wie bei der Simulation des Kipprinnenversuchs in Kapitel 6.1 mit der Steigerung der Zuflussmenge von $100 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ auf $150 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ die ersten Kapillarblockabflüsse ein. Dem Zufluss von $150 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ stehen ca. $120 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Kapillarschicht- und entsprechend etwa $30 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Kapillarblockabfluss gegenüber. Der Kapillarschichtabfluss nimmt auch bei folgender Zuflussratensteigerung nicht weiter zu. Die Differenz zwischen Zufluss und dem nahezu konstant verlaufenden Kapillarschichtabfluss macht sich als steigende Durchbruchsmenge bemerkbar.

Die Durchbruchraten der Variante II sind in dem Zuflussbereich, in dem sich nach Auswertung des praktischen Kipprinnenversuchs bereits hohe Kapillarblockabflüsse befinden, sehr klein. Erste berechnete Kapillarblockabflüsse können ab $200 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Zufluss registriert werden. Bei einem Zufluss von über $300 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ zeigt sich in der Simulation eine Durchbruchsmenge von unter $0,2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

Auch bei Variante III, bei der die gesättigten Leitfähigkeiten nach HAZEN (1895 in HARTGE & HORN 1999) berechnet wurden, wird eine große Unterschätzung der Kapillarblockabflüsse nachgewiesen. Der Verlauf der Kapillarblockabflüsse ähnelt dem des Simulationsdurchgangs II, reagiert allerdings weniger ausgeprägt auf die Zuflussratensteigerungen im Zuflussbereich von $220 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ bis $300 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Sowohl die anfängliche Durchbruchrate als auch die Zunahme des Kapillarblockabflusses bei der letzten Zuflussratensteigerung auf etwas über $300 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ zeigen jedoch größere Veränderungen als bei Variante II.

Mit den ersten Kapillarblockabflüssen der Varianten II und III bei einer Zuflussmenge von etwas über $200 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ zeigt die Variante III mit den höheren Leitfähigkeiten auch etwas größere Durchbruchsmengen. Die Erklärung für dieses Verhalten liegt darin, dass bei den Simulationsläufen lediglich die gesättigten Wasserleitfähigkeiten verändert wurden. Der Verlauf der k_u -Funktion wird durch das Beibehalten der van-Genuchten-Parameter nur um die entsprechende Veränderung des k_f -Werts verschoben. Nach HAZEN (1895 in HARTGE & HORN 1999) liegt für den Kapillarblock eine höhere gesättigte Leitfähigkeit vor als nach der Berechnung von BEYER (1964). Daraus folgt, dass mit dem k_f -Wert nach HAZEN schon bei höheren Matrixpotenzialen, die an der Grenzschicht herrschen, im Kapillarblock höhere ungesättigte Wasserleitfähigkeiten erreicht werden als unter Verwendung des Parameters nach BEYER (1964).

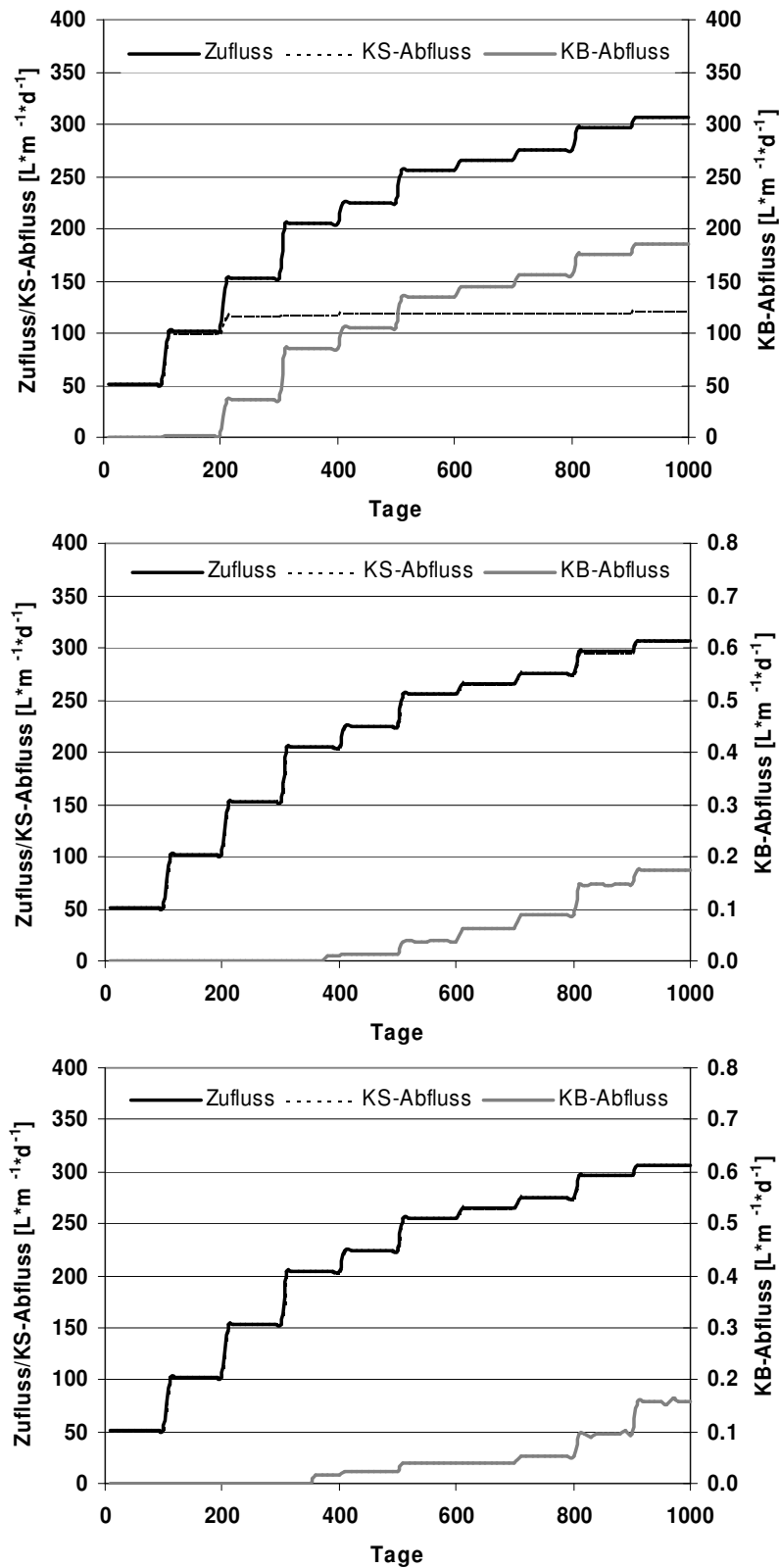


Abbildung 6.4: Gegenüberstellung von Zufluss, Kapillarschicht- und Kapillarblockabfluss der Parameterkombination A unter Verwendung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten nach Variante I (oben), Variante II (Mitte), und Variante III (unten) (vgl. Tab. 6.2)

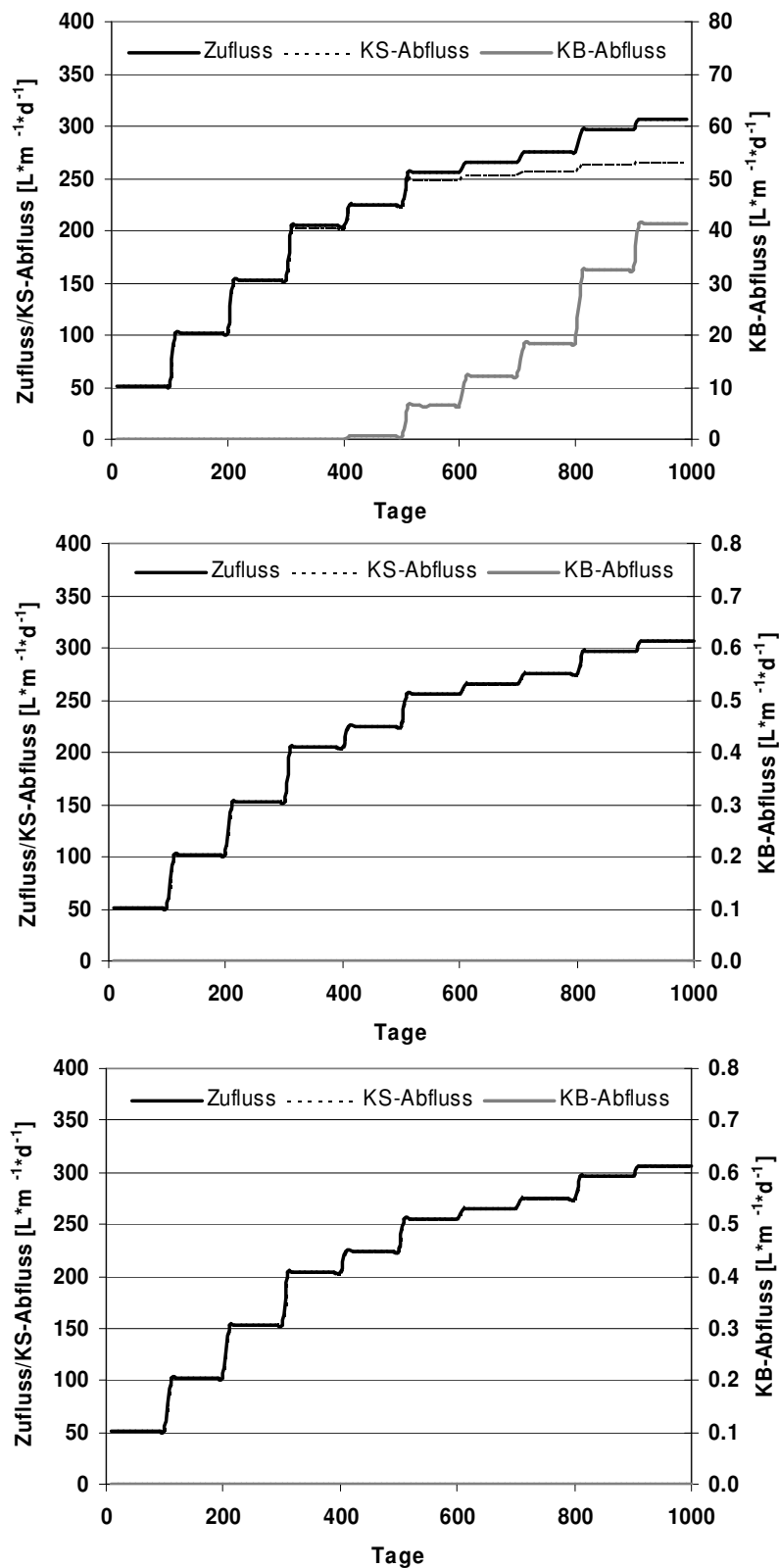


Abbildung 6.5: Gegenüberstellung von Zufluss, Kapillarschicht- und Kapillarblockabfluss der Parameterkombination B unter Verwendung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten nach Variante I (oben), Variante II (Mitte), und Variante III (unten) (vgl. Tab. 6.2)

Der Anstieg der Kapillarblockabflussmengen ist jedoch gegenüber der Variante mit den niedrigeren, nach BEYER (1964) berechneten Leitfähigkeiten weniger ausgeprägt, so dass die Durchbrüche von Simulationsvariante III ab einer Zuflussmenge von $265 \text{ L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ die der Simulation II unterschreiten. Die Kapillarschicht zeigt nach HAZEN (1895 in HARTGE & HORN 1999) ein höheres Abfuhrvermögen und damit geringere Kapillarblockabflüsse. Mit der letzten Zuflussratensteigerung gleicht sich diese Differenz nahezu aus.

Abbildung 6.5 zeigt die Simulationsergebnisse unter Einsatz der Parameterkombination B (Van-Genuchten-Parameter abgeleitet aus Tensiometer- und FDR-Sonden Messungen im Kipprinnenexperiment, vgl. Tab. 6.1) mit den Variationen der gesättigten Leitfähigkeiten, die in Tabelle 6.2 dargestellt sind. Die Leitfähigkeiten des ersten Simulationslaufs entsprechen denen, die für die Simulation des Kipprinnenversuchs mit der Parameterkombination B verwendet wurden. Gemäß der Darstellung in Abbildung 6.1 (vgl. Kapitel 6.1) zeigt der Kapillarschichtabfluss mit Erreichen von ca. $250 \text{ L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ nur noch eine geringe Reaktion auf weitere Bewässerungszunahmen. Mit der Zunahme des Zuflusses auf etwas mehr als $300 \text{ L}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ entspricht der Kapillarblockabfluss der Zuflussratensteigerung.

Mit dem Einsatz der berechneten gesättigten Leitfähigkeiten für Kapillarschicht- und Kapillarblockmaterial – sowohl nach BEYER (1964) als auch nach HAZEN (1895 in HARTGE & HORN 1999) – ist kein Durchbruch in den Kapillarblock zu registrieren. Aufgrund der 3- bis 4-fach höheren berechneten gesättigten Wasserleitfähigkeit des Materials N-KS-0/2(Ems) im Vergleich zur gemessenen, wird in diesen Simulationen die Leistungsfähigkeit der Natur-/Recyclingmaterialkombination stark überschätzt. In Verbindung des höheren Luftporenwerts des Kapillarschichtmaterials in der Parameterkombination B wird der Effekt der Leistungssteigerung auf Basis der höheren gesättigten Wasserleitfähigkeit weiter verstärkt.

Es kann somit festgehalten werden, dass unter Verwendung der Parameterkombination A, die auf Stechzylindermessungen beruht, aber auch bei Einsatz der Parameterkombination B, deren van-Genuchten-Parameter des Kapillarschichtmaterials aus dem Kipprinnenversuch der Natur-/Recyclingmaterialkombination ermittelt wurden, der Ersatz der gemessenen durch eine berechnete gesättigten Leitfähigkeit keine bessere Annäherung an die aus den Kipprinnenversuchen ermittelte potenzielle laterale Dränkapazität ergibt. Dabei macht es auch keinen Unterschied nach welchem Verfahren, ob nach BEYER (1964) oder HAZEN (1895 in HARTGE & HORN 1999), der k_f -Wert berechnet wird.

Die im Vergleich zur gemessenen wesentlich höhere berechnete Leitfähigkeit führt in den Simulationen zu einem solch hohen Abfuhrvermögen der Kapillarschicht, dass kaum Kapillarblockabflüsse errechnet wurden. Die laterale Dränkapazität wurde

unter diesen Annahmen nicht erreicht und die Leistungsfähigkeit des Kapillarsperrensystems somit weit überschätzt.

Die hohe Empfindlichkeit des Modells HYDRUS-2D bezüglich der gesättigten Leitfähigkeit als Einflussgröße kann beispielhaft an der Parameterkombination A unter Gegenüberstellung der Varianten I (gemessene gesättigte Leitfähigkeit für Kapillarschichtmaterial, nach BEYER (1964) berechnete gesättigte Leitfähigkeit für Kapillarschichtmaterial) mit Variante II (nach BEYER (1964) berechnete gesättigte Leitfähigkeiten für Kapillarschicht und -blockmaterial) deutlich gemacht werden. Mit der Erhöhung der gesättigten Leitfähigkeit der Kapillarschicht von Variante I um etwa eine halbe Zehnerpotenz in Variante II sinkt der Kapillarschichtabfluss um das 100-fache. Variationsbreiten von gesättigten Wasserleitfähigkeiten im Bereich einer halben Zehnerpotenz können unter natürlichen Bedingungen allerdings nicht ausgeschlossen und vermieden werden (vgl. Kapitel 5.1.1, Tab.5.9).

Die Simulationsstudien zeigen somit, dass der Parameter gesättigte hydraulische Leitfähigkeit einen bedeutenden Einfluss auf das Simulationsergebnis hat. Für die Bestimmung des k_f -Wertes sollten Messungen Vorrang vor Berechnungen haben. Die berechneten Wasserleitfähigkeiten sind generell höher als die gemessenen Daten, wie es die Tabelle 6.2 zeigt (vgl. Kapitel 5.1.1 Tab. 5.9). Ursache dürfte im wesentlichen die Nichtberücksichtigung von Porenkontinuitäten in den Berechnungsmodellen sein.

Die methodischen Schwierigkeiten bei der Messung der Wasserleitfähigkeit betreffen in erster Linie das Kapillarschichtmaterial, da es hier durch zu hohe Gradienten leicht zu Fehlern kommen kann. Ein weiteres Problem besteht darin, dass unter Feldbedingungen auch unter so genannter „Wassersättigung“ Luft in Kapillarporen eingeschlossen sein kann, die zu Behinderungen des Wasserflusses in den Kapillaren führen. Folglich sind Labor- k_f -Werte im Regelfall höher als unter Feldbedingungen.

6.2.2 Einfluss unterschiedlicher Zuflussratensteigerungen auf das Kapillarsperrensystem

Unter Einsatz der Parameterkombination B aus Tabelle 6.1 (vgl. Kapitel 6.1), welche die beste Annäherung an die gemessenen Daten des Kipprinnenversuchs mit der Natur-Recyclingkombination zeigte, wurden drei Simulationen mit unterschiedlichen Zuflussratensteigerungen durchgeführt.

Damit sollte untersucht werden, welchen Einfluss die Zuflussratensteigerungen auf das Durchbruchverhalten haben. In der Abbildung 6.7 sind die Simulationsergebnisse für drei verschiedene Varianten dargestellt. In der Variante I (oben) wurde der Zufluss alle 10 Tage um $1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ kontinuierlich gesteigert. In der

Variante II (Mitte) wurde die Zuflussrate um 10 bis $50 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ diskontinuierlicher gesteigert. In der letzten Variante III wurde der Zufluss abrupt um 150 bzw. $100 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ erhöht.

Bei der Variante I (obere Grafik) wird die Simulation bei einem Zufluss von $204 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ begonnen, mit welchem erste Durchbrüche von $0,1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ einsetzen. Ab der Zuflussmenge von etwa $248 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ nehmen die Kapillarblockabflüsse überproportional zu, womit die Zunahme des Kapillarschichtabflusses trotz Zuflussratensteigerung immer geringer wird. Beim Zufluss von $306 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ zeigt sich ein Kapillarblockabfluss von $41,2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

Die mittlere Grafik der Abbildung 6.7 spiegelt Zuflussratensteigerungen von 10 bis $50 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ wider. Der Kapillarblockabfluss setzt wie im voranbeschriebenen Simulationslauf nach der Zuflusssteigerung auf $204 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ mit $0,1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ein. Die Kapillarblockabflüsse steigen in Relation zu den stufenweise zunehmenden Bewässerungsmengen und sind in ihrem mittleren Verlauf mit den Durchbrüchen der oberen Grafik, welche die Zuflussratensteigerungen von $1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ zeigt, gleichzusetzen. Mit dem Erreichen eines Kapillarschichtabflusses von etwa $250 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ reagiert dieser nur noch schwach auf weitere Zuflussratensteigerungen. Die Kapillarblockabflüsse nehmen im entsprechenden Maß zu, so dass mit dem Zufluss von $306 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ein Kapillarblockabfluss von $41,2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ zu beobachten ist.

Der untersten Grafik der Abbildung 6.7 ist zu entnehmen, dass in einem weiteren Simulationsdurchgang die Zuflussratensteigerungen noch stärker erhöht wurden. Nach einer Anfangsbewässerung von $50 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ nimmt die Zuflussmenge um etwa $150 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ zu. Die Kapillarschicht ist auch nach einer solchen sprunghaften Zuflussratensteigerung hohen Ausmaßes in der Lage das Wasser nahezu vollständig abzuführen. Wie auch bei den zuvor betrachteten Simulationsdurchgängen ist bei der Zuflussrate von $204 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ein Kapillarblockabfluss von $0,1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ und bei einer Bewässerung von $306 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ Durchbrüche von $41,2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ zu registrieren.

Im Rahmen von Feldversuchen wurden einerseits punktuelle Spitzenbelastungen für Kapillarsperrensysteme beschrieben, die auf präferentiellen Wasserfluss z. B. in Schrumpfrissen der Wasserhaushaltsschicht nach langen Trockenphasen zurückzuführen waren (JELINEK 1997, VON DER HUDE ET AL. 1994). Andererseits können flächige Spitzenbelastungen auftreten, wenn sich die Rekultivierungsschicht bei Eintritt eines Starkniederschlagsereignisses bereits in einem hohen Sättigungszustand befindet. Die Belastung aus der Rekultivierungsschicht verstärkt sich entsprechend der Kumulation der Abflüsse in der Kapillarschicht (BARTH 2003, JELINEK 1997).

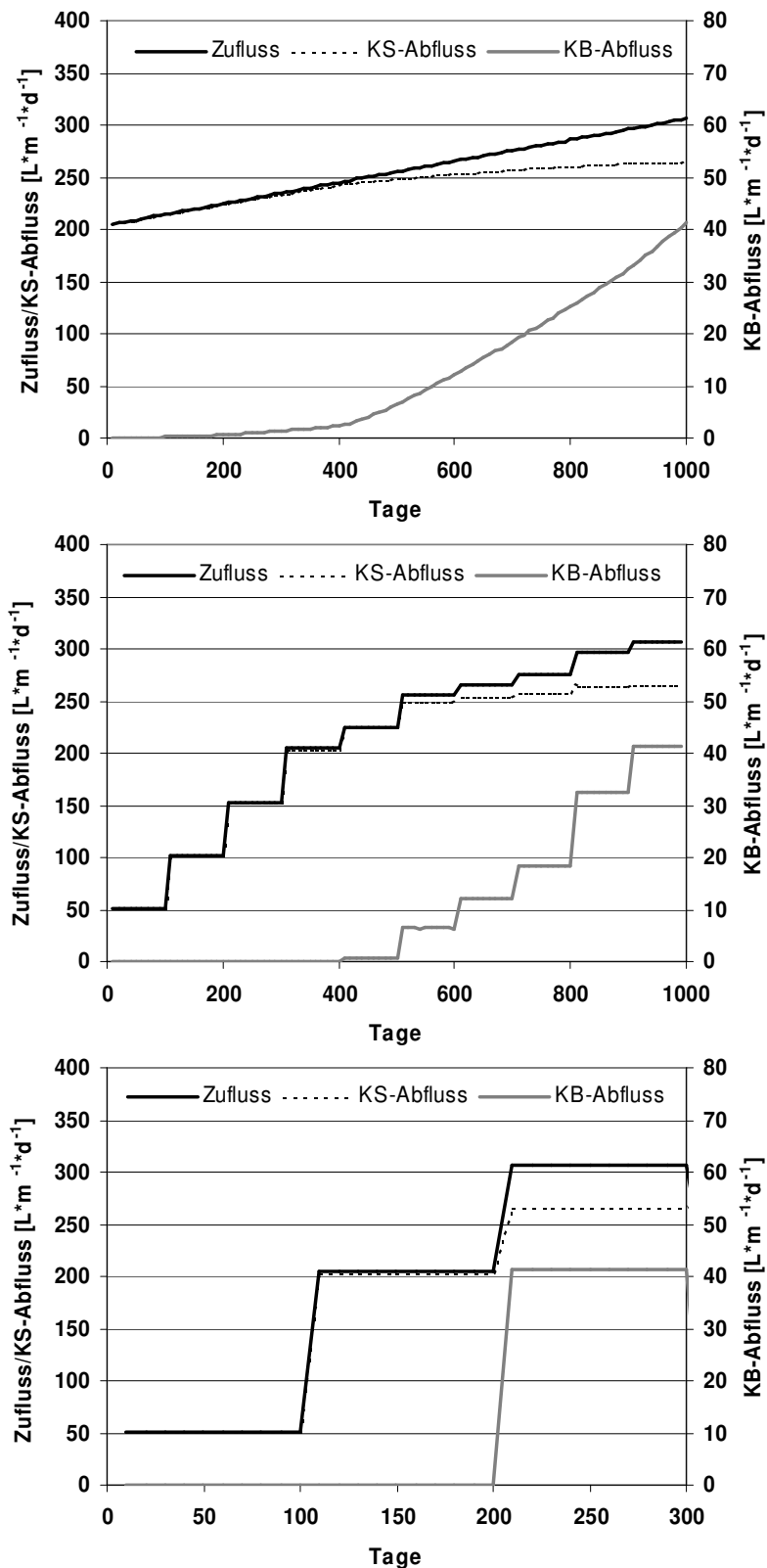


Abbildung 6.6: Gegenüberstellung von Zufluss, Kapillarschicht- und Kapillarblockabfluss der Simulationen anhand der Parameterkombination B (Tabelle 6.1) mit Zuflussratensteigerungen von $1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (oben), 10 bis $50 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (Mitte) sowie 100 und $150 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (unten) bei 15° Neigung

In der Simulation mit HYDRUS-2D wird deutlich, dass in dem Zuflussbereich vor Erreichen der lateralen Dränkapazität die Höhe der Zuflussratensteigerung keinen Einfluss auf die Funktionalität der Kapillarsperre ausübt. Im Modell ist dies zwar durch die Homogenitätsannahme zu erklären, da keine Einbau-Ungenauigkeiten und auch keine Materialheterogenitäten integriert wurden, die in der praktischen Umsetzung auftreten können. Aber auch im praktischen Kipprinnenversuch mit der Natur-/Recyclingmaterialkombination zeigte sich nach einem Pumpenausfall am 65. Tag und anschließender Zuflussratensteigerung von 2,6 auf $180 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ innerhalb von drei Tagen keine Überlastung des Systems. Erst im Bereich der lateralen Dränkapazität wird die Abhängigkeit des Kapillarblockabflusses von der Zuflussratensteigerung offensichtlich.

6.3 Fazit der numerischen Simulation

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass der Parameter „gesättigte Wasserleitfähigkeit“ einen hohen Einfluss auf die Simulationsergebnisse ausübt. Aus den Ergebnissen resultiert eine Untauglichkeit des Einsatzes von berechneten k_f -Werten nach BEYER (1964) und HAZEN (1895 in HARTGE & HORN 1999) für die numerische Simulation der Kapillarsperrenfunktion. Um die Wasserbewegungen bzw. die Wirksamkeit von Kapillarsperren in bodenhydraulischen Modellen auf physikalischer Basis zu beschreiben, ist die Bestimmung der benötigten Parameter durch Laborversuche und primär durch Kipprinnenversuche anzuraten.

Die Höhe der Änderungen von Zuflussratensteigerungen hat keinen Einfluss auf Kapillarblockabflüsse. D. h., nach dem Modell HYDRUS-2D ist die Kapillarsperre mit den eingesetzten Parametern in der Lage, plötzlich auftretende Zuflussmengen hohen Ausmaßes, wie z. B. bei Starkregenereignissen, abzuführen.

Obwohl das Modell HYDRUS-2D, das auf der RICHARDS-Gleichung basiert, die Wasserbewegungen in dem groben Kapillarblockmaterial nicht prozessgerecht - wie z.B. präferentielle Flüsse - abbilden kann, wurde das Durchbruchverhalten im Simulationsgang B mit der Ausnahme einer leichten Unterschätzung der lateralen Dränkapazität befriedigend wiedergegeben. Derzeit ist es jedoch noch nicht möglich, auf den versuchstechnischen Aufwand der Untersuchungen von Kapillarsperrenkombinationen in Kipprinnen zu verzichten und die Dimensionierung mit Hilfe von Modellen vorzunehmen.

7 Schlussbetrachtung

7.1 Bestimmung der lateralen Dränkapazitäten aus Kipprinnenversuchen

Im Laufe der Kapillarsperrenforschung wurden verschiedene Methoden entwickelt, die laterale Dränkapazität anhand der Abflussdaten von Kipprinnenversuchen zu ermitteln (STEINERT 1999, VON DER HUDE 1999, WOHLICH 1991).

Eine der „empirischen“ Ableitungen der lateralen Dränkapazität ist die Bestimmung der Zuflussrate in das Kapillarsperrensystem, bei der erste nennenswerte Durchbrüche registriert werden (BARTH 2003, STEINERT 1999, VON DER HUDE 1999, WOHLICH 1991). Diese Methode, wie auch die Bestimmung aus der Zufluss-Kapillarblockabflussbeziehung, anhand welcher die laterale Dränkapazität vor dem exponentiellen Anstieg der Blockabflüsse festgelegt wird (STEINERT 1999), weisen den Nachteil auf, dass die laterale Dränkapazität nur näherungsweise abgeschätzt werden kann und damit von der Versuchsdurchführung abhängig ist.

STEINERT (1999) entwickelte aufgrund dessen ein Verfahren, um die laterale Dränkapazität methodisch standardisiert ableiten zu können. Dafür stellte er die Zufluss-/Kapillarblockabflussbeziehung in einem doppelt logarithmischen Koordinatensystem dar und teilte die Datensätze in zwei Bereiche ein: Der erste Bereich entspricht den Kapillarblockabflüssen, die sich noch vor dem exponentiellen Anstieg befinden. Der zweite Bereich wird durch hohe Kapillarblockabflüsse bei entsprechend hohen Zuflussraten charakterisiert. Der Schnittpunkt der Korrelationsgeraden der beiden Bereiche soll der lateralen Dränkapazität entsprechen. STEINERT (1999) empfiehlt in seinem Verfahren einen Sicherheitsfaktor, da sich der errechnete Schnittpunkt in einem Zuflussbereich befinden kann, bei dem der Anstieg der Kapillarblockabflüsse bereits begonnen hat.

Bei diesem Vorgehen muss jedoch in die Betrachtung mit eingeschlossen werden, dass sich Unsicherheiten aus den Korrelationsgleichungen ergeben, da sie nur für einen mittleren Verlauf der Datenpunkte stehen. Abweichungen können entsprechend durch den Sicherheitsbereich abgedeckt werden. Dennoch bleibt der große Einfluss einzelner Durchbruchereignisse auf die Korrelationsgerade bestehen, die nach KÄMPF (2000) stark von der jeweiligen Vorgeschichte und den Versuchsrandbedingungen abhängen. Damit kann die laterale Dränkapazität sowohl unter- als auch überschätzt werden. Dem könnte eventuell die nach STEINERT (1999) vorgeschlagene Ausklammerung des Wertebereichs, in dem sich die laterale Dränkapazität befindet, entgegenwirken. Dieser Ausschluss an Daten, der in seiner Arbeit einen großen Bereich von 100 bis $150 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ einnimmt, erscheint in ihren Ausmaßen allerdings sehr willkürlich und ist mit einem hohen Datenverlust verbunden.

Die Begriffsbestimmung der lateralen Dränkapazität nach STEINERT (1999), die einer Zuflussmenge entspricht, bevor nennenswerte Durchbrüche zu registrieren sind,

wird zwar als praxisnah bezeichnet (STEINERT 1999). Aufgrund der genannten Kritikpunkte wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Methode entwickelt, die auf der Definition der lateralen Dränkapazität nach ROSS (1990) beruht, nach der das maximale Abfuhrvermögen der Kapillarschicht dann erreicht ist, wenn der Kapillarblockabfluss der Zuflussratensteigerung entspricht.

Aus der ROSS'schen Definition kann eine entscheidende Konsequenz für die laterale Dränkapazität gezogen werden. Bei steigender Zuflussrate zeigt das Kapillarsperrensystem zwar zunächst einen exponentiellen Anstieg, allerdings werden die Durchbrüche von der Zusickerung aus der Kapillarschicht begrenzt. D. h., ist das maximale laterale Abfuhrvermögen der Kapillarschicht erreicht, entsprechen die Durchbruchmengen der Zuflussratensteigerung, womit der exponentielle Anstieg der Kapillarblockabflüsse letztlich in eine proportionale Steigung von 1 übergeht.

Mit dem in Kapitel 4.4 vorgeschlagenen regressionsanalytischen Ansatz kann die potenzielle laterale Dränkapazität ohne die Ausgrenzung von Messwerten kalkuliert werden, indem die Kapillarblockabflüsse und Zuflussmengen an eine lineare Funktion mit der Steigung 1 schrittweise angepasst werden. Das Bestimmtheitsmaß R^2 dient als Gütekriterium für die Auswahl der optimalen Anpassungsgüte. Liegt die beste Annäherung vor, entspricht der Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der x-Achse der lateralen Dränkapazität.

Für eine Gegenüberstellung der Methoden wurden Daten eines Kipprinnenversuchs von STEINERT (1999) herangezogen. Bei den Materialien handelte es sich um einen Grobsand über einem Kies mit der Körnung 2-8 mm. Über die Errechnung des Schnittpunktes der Korrelationsgeraden ermittelte STEINERT (1999) eine laterale Dränkapazität von $465 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, während er direkt aus den Messwerten bei einer Neigung von 20 % ($\sim 12^\circ$) eine laterale Dränkapazität von $349 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ abgeleitet hatte. Die Überprüfung, ab welcher Zuflussmenge sich die Kapillarblockabflüsse der Steigung 1 annähern, zeigt eine im Vergleich etwas höhere potenzielle laterale Dränkapazität von etwa $478 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

Aus den Kipprinnenversuchen mit der Naturmaterialkombination (vgl. Abb. 5.16) und der Natur-/Recyclingmaterialkombination (vgl. Abb. 5.27) konnten hydraulische Leistungsfähigkeiten von 240 bis $290 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ bzw. von 260 bis $287 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ entnommen werden. Die Abbildungen 7.1 und 7.2 zeigen die modifizierte Bestimmungsverfahren der lateralen Dränkapazität nach STEINERT (1999) unter Angabe der Korrelationsgleichungen und der Bestimmtheitsmaße (jeweils obere Grafik). Auf eine Logarithmierung der Skalen wurde allerdings verzichtet, da sie durch die anschließende erneute Linearisierung der Korrelationsgleichungen keine Aussagekraft hat. Nach STEINERT (1999) soll der Datenbereich, in dem die laterale Dränkapazität liegt, nicht berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wurden die Bereiche der oben genannten hydraulischen Leistungsfähigkeiten ausgeschlossen.

Die Schnittpunkte und somit die lateralen Dränkapazitäten liegen nach der Methode von STEINERT (1999) für die Naturmaterialkombination bei $267 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ und für die Natur-/Recyclingmaterialkombination bei $291 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Demgegenüber stehen die potenziellen lateralen Dränkapazitäten aus der Regressionsanalyse von 273 und $306 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ (Abb. 7.1 und 7.2).

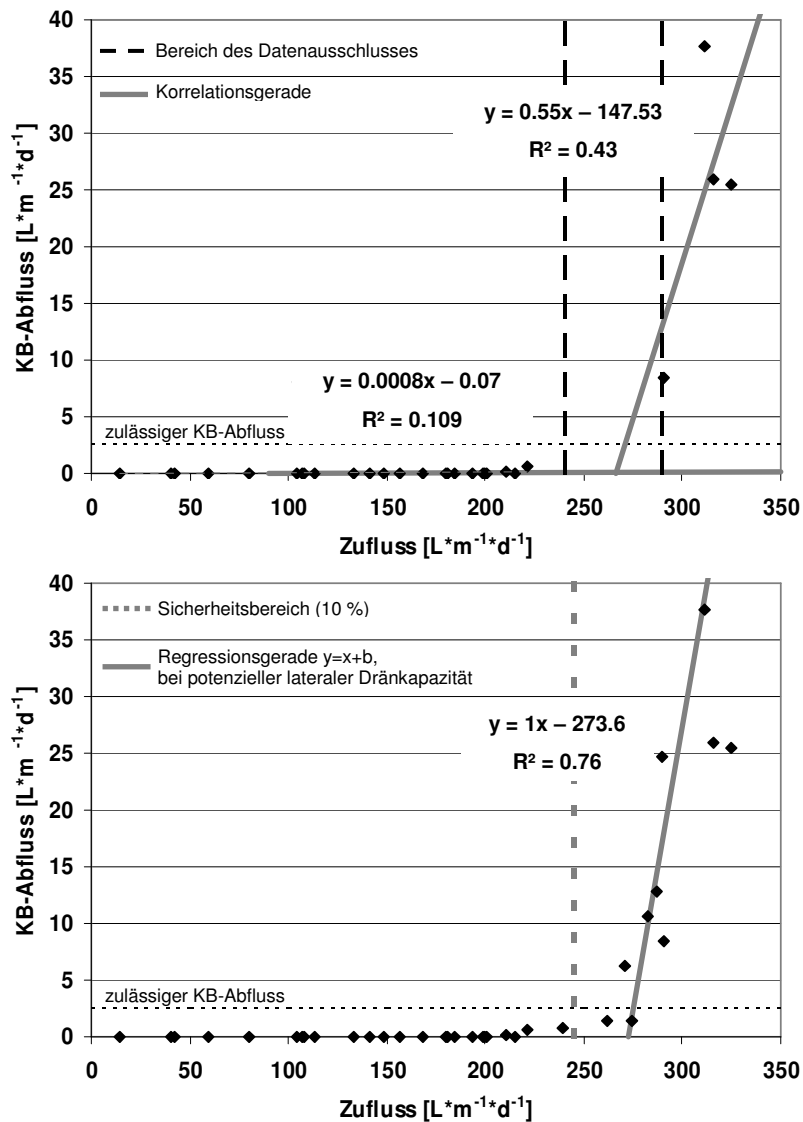


Abbildung 7.1: Bestimmung der lateralen Dränkapazität aus dem Kipprinnenversuch der Naturmaterialkombination bei 15° Neigung nach STEINERT (1999) – oben - und mittels spezieller Regressionsanalyse - unten

Aus den Steigungen der nach STEINERT (1999) berechneten Geraden kann abgeleitet werden, dass nach Überschreiten der lateralen Dränkapazität nur 55 % bzw. 27 % des zusätzlich zugeführten Wassers in den Kapillarblock gelangen. Das bedeutet, dass bei diesem Modell die Kapazität der Kapillarschicht noch nicht erschöpft war, da noch 45 % bzw. 73 % des jeweils zusätzlich zugeführten Wassers in dieser Schicht fließen können. Anders sieht es bei dem eigenen Verfahren aus. In beiden Fällen wird nach dem Überschreiten der lateralen Dränkapazität 100 % des

zusätzlich zugeführten Wassers im Kapillarblock lateral abgeführt. Aufgrund der Tatsache, dass die Steigungen bei STEINERT (1999) flacher sind, ist zu folgern, dass die nach seiner Methode berechneten lateralen Dränkapazitäten mit großer Wahrscheinlichkeit als zu gering einzustufen sind. Demnach ist dem vorgestellten Verfahren zur Ableitung der potenziellen lateralen Dränkapazität, das auf einem regressionsanalytischen Ansatz beruht und ohne die Nichtberücksichtigung von Messdaten auskommt, der Vorzug zu geben.

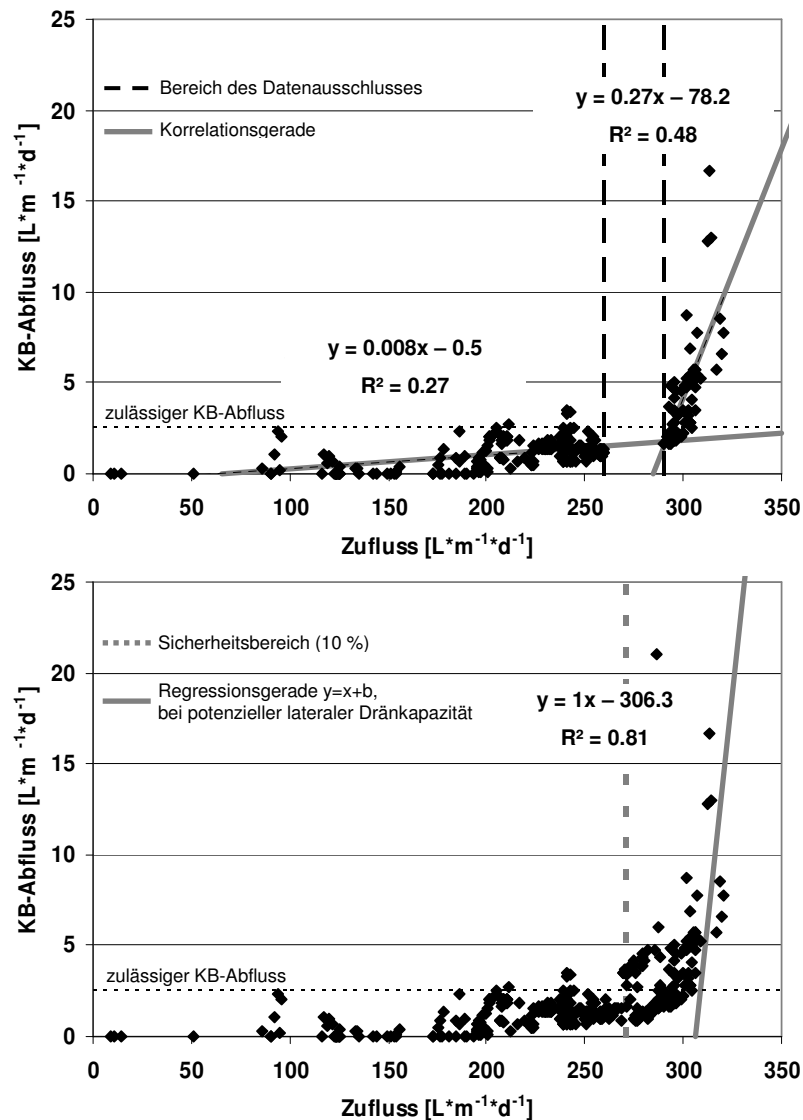


Abbildung 7.2: Bestimmung der lateralen Dränkapazität aus dem Kipprinnenversuch der Natur-/Recyclingmaterialkombination bei 15° Neigung nach STEINERT (1999) – oben - und mittels spezieller Regressionsanalyse - unten

Die Grundlage, auf der die Regressionsanalyse beruht, ist des Weiteren physikalisch fundiert und erlaubt es, unabhängig von Versuchsrandbedingungen Rückschlüsse aus den hydraulischen Materialeigenschaften auf die lateralen Dränkapazität als zentralen Beurteilungsparameter zu übertragen. KÄMPF (1999) beschreibt den Ansatz von ROSS (1990) als einzige Basis, die Leistungsfähigkeiten verschiedener

Kapillarsperren-Materialkombinationen zu vergleichen.

Nach beiden zuletzt beschriebenen Bestimmungsmethoden sind schon vor der jeweilig ermittelten lateralen Dränkapazität Kapillarblockabflüsse zu verzeichnen. Mittels der Festlegung eines Sicherheitsbereichs könnten diese Abflüsse aus dem Kapillarblock jedoch eingeschlossen werden. Den Regressionsanalysen zufolge scheint ein Sicherheitsbereich von 10 % ausreichend und empfehlenswert.

Mit dem vorgestellten Verfahren ist es somit auf der einen Seite durch die Ermittlung der potenziellen lateralen Dränkapazität möglich, die absolute Leistungsfähigkeit zu beurteilen und die entsprechenden Materialeigenschaften gegenüberzustellen. Auf der anderen Seite können für die Umsetzung einer Kapillarsperrenkombination in die Praxis und die damit verbundene Abschätzung der möglichen Hanglänge die Vorgaben der maximal zulässigen Durchlässigkeit von mineralischen Dichtungen nach DEP V (2002) über einen Sicherheitsbereich als weiteres Beurteilungskriterium einbezogen werden.

Vereinfachte Berechnungsverfahren, wie in Kapitel 3.3.3 mit den Formeln 3.9, 3.10 und 3.11 beschrieben, sind für die Abschätzung der lateralen Dränkapazität unter Praxisbedingungen nicht geeignet. Kipprinnenversuche können demnach mit Hilfe dieser Gleichungen nicht ersetzt werden. Dennoch stellen sie, wie in Kapitel 5.2.3 gezeigt, ein hilfreiches Instrument zur Überprüfung der Laborversuche dar.

7.2 Physikalische Materialeigenschaften

Mit Hilfe von physikalischen Untersuchungen und Großkipprinnenversuchen konnte die Eignung von Bauschutt-Recyclingmaterialien für den Einsatz in einer Kapillarsperre als alternatives Deponieoberflächenabdichtungssystem nachgewiesen werden. Die Voraussetzung für eine Eignung als Deponieersatzbaustoff ist, dass die in diesem Zusammenhang untersuchten Bauschutt-Recyclingmaterialien die gleichen Anforderungen erfüllen müssen wie die natürlichen Primärbaustoffe.

Als Orientierung für die physikalischen Materialeigenschaften dienen Gütekriterien, die sich im Laufe der Kapillarsperrenforschung als Empfehlungen für geeignete Materialkombinationen herauskristallisiert haben (BAUER 2001, GARTUNG & NEFF 2000, LAGA 1997, PALM ET AL. 2003, STEINERT 1999). Dabei fällt der Korngrößenverteilung eine bedeutende Rolle zu, welche die entscheidenden Parameter der Retentionsbeziehung und der Wasserleitfähigkeitsfunktion beeinflusst. Geringe Abweichungen von den empfohlenen Korngrößenbandbreiten, die als Einordnung für funktionierende Kapillarsperren gelten, führten zu einer mangelhaften Wirkungsfunktion im Kipprinnenversuch. Der Recyclingsand R-KS-Q-0/2, der eine etwas zu grobe Körnung für die Zuordnung in die Bandbreite nach WEIGEL (1993) aufwies, zeigte eben-

falls einen etwas zu geringen Lufteintrittswert nach den von BAUER (2001) aufgestellten Gütekriterien. Die geringe Kapillarität wirkte sich entsprechend negativ auf die laterale Dränkapazität der Recyclingmaterialkombination aus.

Eine geringe Überschreitung des geforderten Quotienten, der die Filterstabilität nach TERZAGHI feststellt, hat hingegen keinen leistungsmindernden Einfluss. Bei der im Kipprinnenversuch getesteten Naturmaterialkombination wurde ein Wert von 2,5 erreicht, im Vergleich wurde für die Natur-/Recyclingmaterialkombination ein Wert von 4,2 errechnet, der die Forderung von ≤ 4 somit nicht erfüllt. Dennoch zeigt die Natur-/Recyclingmaterialkombination eine potenzielle laterale Dränkapazität von $306 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ auf, gegenüber einer potenziellen lateralen Dränkapazität von $273 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ der Naturmaterialkombination. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass Ungleichförmigkeiten von ≤ 3 , wie BAUER (2001) es empfiehlt, ausreichend sind, statt $U \leq 2,5$ nach GARTUNG & NEFF (2000).

Die Anforderung an die Wasseraufnahmefähigkeit für Kapillarsperrenmaterialien von 1 Masse-% muss auf der Basis der Erfahrungen aus dem Kipprinnenversuch mit der Natur-/Recyclingmaterialkombination erweitert werden. Das Bauschutt-Recyclingmaterial, welches als Kapillarblock eingesetzt wurde (R-KB-Q-2/10), weist eine Wasseraufnahmefähigkeit von 3,7 Masse-% auf. Dies entspricht somit einer Überschreitung der Vorgabe nach BAUER (2001) von fast 300 %. Im Großkipprinnenversuch konnte über einen Versuchszeitraum von etwa einem Jahr nachgewiesen werden, dass die Natur-/Recyclingmaterialkombination keine Leistungs- oder Funktionsnachteile im Vergleich zur Naturmaterialkombination aufzeigt. Daraus folgt, dass trotz einer gewissen Eigenporosität des Kapillarblockmaterials der Porensprung zum Kapillarschichtmaterial erhalten bleibt.

In diesem Zusammenhang muss jedoch beachtet werden, dass mit einer hohen Eigenporosität die Kornstabilität nachlässt. Die Kornstabilität muss allerdings für Kapillarsperrenmaterialien garantiert werden. So konnte KÄMPF (2000) eine Beeinträchtigung der Kapillarsperrenwirkung aufgrund zu hoher Anteile der Fraktion $< 0,5 \text{ mm}$ im Kapillarblock nachweisen. Es muss sichergestellt werden, dass - insbesondere unter deponiebautechnischen Belastungen - der Feinkornanteil in den Kapillarsperrenmaterialien nicht in dem Maße ansteigt, dass er negative Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit ausübt. Die Filterstabilität und der Porensprung der beiden Materialien zueinander muss zu jeder Zeit gewahrt bleiben.

Nach dem eingesetzten Kornzertrümmerungsversuch konnte für das Material R-KB-Q-2/10 eine gute Kornstabilität ausgewiesen werden, während die Materialien mit Anteilen an Ziegel, Steinzeug und Mauerwerk die Anforderungen nicht erfüllen konnten. Es ist jedoch eine Abwandlung der Versuchsdurchführung zu empfehlen, da es durch unterschiedliche Feinkornanteile der Einzelproben vor der Belastung im Versuch schwierig ist eine eventuelle Zunahme des Feinkornanteils signifikant auf

die mechanische Belastung zurückzuführen. Eine Absiebung des Feinkornanteils vor Beginn der Untersuchung wäre in diesem Zusammenhang hilfreich.

Die Funktion der Kapillarsperre beruht auf den Korngrößenunterschieden von Kapillarschicht und Kapillarblock. Die Grenzflächenspannung am Übergang der wassergefüllten Poren der Kapillarschicht zu den luftgefüllten Poren des Kapillarblocks verhindert die vertikale Versickerung. Aufgrund der ungesättigten Verhältnisse ergeben sich im groben Blockmaterial nur geringe Fließquerschnitte, während an der Grenzschicht im Kapillarschichtsand nahezu gesättigte Verhältnisse mit hohen Wasserleitfähigkeiten herrschen. Somit wird die Kapillarsperrenwirkung ferner durch die weit differierenden hydraulischen Eigenschaften der beiden Materialien verursacht. Aus dem Einfluss dieser Parameter auf die Funktion und Leistungsfähigkeit der Kapillarsperre resultiert die Notwendigkeit ihrer Ermittlung.

Bei der Ermittlung der Retentionsbeziehungen und der daraus berechneten Wasserleitfähigkeitsfunktionen anhand von Untersuchungen, die an Stechzylindern im Labor durchgeführt werden, treten Differenzen zu denen mittels Tensiometern und FDR-Sonden in Kipprinnenversuchen gemessenen Parametern auf. Dies ist auf den Hystereseeffekt der Materialien zurückzuführen. Während mit der Drucktopfmethode die Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung der Entwässerungsphase dargestellt wird, befindet sich das Kapillarsperrensystem in der Regel in der Bewässerungsphase, die sich in Abhängigkeit von der Zuflussbelastung in verschiedenen sekundären Bewässerungsästen darlegen kann. Dadurch ergeben sich in den Kipprinnenversuchen andere Relationen der Retentionsbeziehungen und Wasserleitfähigkeitsfunktionen der Kapillarsperrenmaterialien zueinander, was entsprechend die Kapillarsperrenfunktion beeinflusst.

Über das Modell HYDRUS-2D wurden die Beobachtungen aus den Kipprinnenversuchen nachgebildet. Das Ziel numerischer Simulationen ist es, die Wasserbewegungen im Kapillarsperrensystem nachzuvollziehen, um auf den hohen versuchstechnischen Aufwand der Kipprinnenversuche verzichten zu können. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang jedoch die exakte Parameteridentifikation. Die beste Übereinstimmung der simulierten Abflüsse mit den gemessenen wurde mit dem Einsatz der VAN-GENUCHTEN-Parameter erreicht, die aus den Messwerten des Kipprinnenversuchs mit der Natur-/Recyclingmaterialkombination ermittelt werden konnten.

Auch der Parameter „gesättigte Leitfähigkeit“, der bei der Simulation in das Modell HYDRUS-2D mit eingeht, kann nicht durch einen nach BEYER (1964) oder HAZEN (1895 in HARTGE & HORN 1999) berechneten Wert ersetzt werden. Da die gesättigte Leitfähigkeit einen hohen Einfluss auf das Simulationsergebnis hat, tritt eine Überschätzung der lateralen Dränkapazität ein, sofern die berechneten k_f -Werte genutzt werden.

Im Rahmen der numerischen Simulation konnte durch eine weitere Empfindlichkeitsstudie nachgewiesen werden, dass bis zum Erreichen der lateralen Dränkapazität sehr hohe Zuflussratensteigerungen keine frühzeitigen Durchbrüche verursachen.

D. h., solange punktuelle oder auch flächige Spitzenbelastungen nicht die laterale Dränkapazität des Deponiehangs überschreiten, kann das Sickerwasser ohne nennenswerte Durchbrüche abgeführt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass im Modell eine Homogenitätsannahme getroffen wurde. Bei der praktischen Umsetzung muss mit Einbau-Ungenauigkeiten und auch mit Materialheterogenitäten gerechnet werden, was präferentielles Fließen begünstigt. Das Modell HYDRUS-2D basiert auf der RICHARDS-Gleichung und kann somit diese Art des Wasserflusses nicht prozessgerecht abbilden.

Dennoch konnte mit Hilfe des Modells HYDRUS-2D eine gute Annäherung der simulierten Daten an die gemessenen Abflüsse erreicht werden. Da lediglich die VAN-GENUCHTEN-Parameter der Kapillarschicht aus den Tensionen und Wassergehalten des Kipprinnenversuchs ermittelt werden konnten, ist davon auszugehen, dass durch eine verbesserte Parameteridentifikation des Kapillarschichtmaterials eine noch bessere Übereinstimmung erzielt werden kann. Die Empfindlichkeit des Modells auf Veränderungen der Eingabeparameter verdeutlichen jedoch die Untauglichkeit der aus Stechzylinderuntersuchungen ermittelten VAN-GENUCHTEN-Parameter. In diesem Zusammenhang können die Großkipprinnenversuche derzeit nur begrenzt durch numerische Modellierung ersetzt werden, um den versuchstechnischen Aufwand zu reduzieren.

7.3 Umweltverträglichkeit

Mit dem Einsatz mineralischer Abfälle als Deponieersatzbaustoff muss die stoffliche Unbedenklichkeit gegenüber der im KRW-/ABFG (1996) dargelegten Schutzgüter gewährleistet sein. D. h., im Sinne des KRW-/ABFG (1996) muss es sich um eine schadlose Verwertung handeln, die das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt. 2001 verabschiedete die LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL ein Arbeitspapier über den „Einsatz von Abfällen im Deponiebau“, in dem die Grenze für Verwertungsmaßnahmen mit der Überschreitung der Zuordnungswerte Z2 des Merkblatts 20 der LAGA (1997) gezogen wurde. Für Kapillarsperren wurden in den „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen“ der LAGA explizit Zuordnungskriterien formuliert. Gesetzlich geregelt ist die Umweltverträglichkeit von Deponieersatzbaustoffen jedoch erst seit dem 01. September 2005 über die einzuhaltenden Zuordnungskriterien der DEPVERWV. Für die Systemkomponenten der Oberflächenabdichtung, wie sie die Kapillarsperre darstellt, richten sich die Zuordnungswerte der DEPVERWV (2005) für Eluate und Festsubstanzen nach LAGA M20 für die Abfallart „Boden“ (1997).

Die Umweltverträglichkeit der Bauschutt-Recyclingmaterialien ist von der Zusammensetzung der Baustoffe abhängig (BAASCH & GOETZ 2004, ENGESER ET AL. 1998, JOHNSON ET AL. 1998, KARNUTH 2003). Hauptbestandteil von Ziegel und Steinzeug sind Aluminiumsilikate, während Beton zu einem großen Anteil aus Calciumsilikaten und -aluminaten besteht. Durch eindringende Feuchtigkeit können an der Oberfläche der Beton- und Mineralgemischkörnungen Salzausblühungen entstehen. Je nach Zusammensetzung der Materialien handelt es sich dabei um Carbonate, Sulfate, Chloride und Nitrate (ARNOLD 1981). Diese leicht löslichen Salze wurden bei der Eluatherstellung der untersuchten Recyclingmaterialien abgewaschen, was sich neben erhöhten Sulfat- und Chloridkonzentrationen insbesondere auf den pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit auswirkt.

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse der Eluatuntersuchungen mit den Zuordnungskriterien nach DEPVERWV (2005) zeigen sich Überschreitungen bei den genannten Parametern, wobei die erhöhte Chloridkonzentration auf die Korngröße zurückgeführt werden kann, da das grobe Kapillarsperrmaterial keine Überschreitung des Grenzwerts aufweist. Nach FÄLLMAN (1997) und KARNUTH (2003) kann durch die Oberflächenvergrößerung durch den Brechvorgang des groben Recyclingmaterials zu feineren Körnungen eine verstärkte bzw. schnellere Stofffreisetzung stattfinden. Mit der Oberflächenvergrößerung geht ebenfalls eine Verkürzung des Diffusionspfades einher (VAN DER SLOOT 2000).

Die erhöhten Sulfatkonzentrationen hängen im starken Maß von der Zusammensetzung bzw. von den Inhaltsstoffen der Beton- bzw. Mineralgemische ab (BAASCH & GOETZ 2004). Sulfate gelten insbesondere in Mauerwerken aber auch in Ziegel als wichtige Gruppe beinhalteter Salzminerale (ARNOLD 1981, KRAUS 2002). Somit zeigen die Gemische, die einen größeren Anteil von Mauerwerk und Ziegel aufweisen, sehr hohe Sulfatgehalte im Eluat im Vergleich zu den Qualitätsmaterialien, die aus Naturstein, Beton und Asphalt bestehen, was auch BAASCH & GOETZ (2004) in ihren Untersuchungen über die Umweltverträglichkeit von Recyclingbaustoffen feststellen konnten.

Die hohe elektrische Leitfähigkeit ist die Folge betonbürtiger, leichtlöslicher und auswaschbarer Substanzen bzw. Ionen wie Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , OH^- und HCO_3^- . Auch die Sulfat- und Chloridgehalte tragen zu einer erhöhten Leitfähigkeit bei.

Mit den hohen Leitfähigkeiten sind alkalische pH-Werte verbunden, die für Bauschutt-Recyclingmaterialien typisch sind, da Calciumhydroxide aus der Zementmatrix herausgelöst werden. Recyclingmaterialien mit hohen Anteilen an Betonbruch weisen ein hohes Puffervermögen gegenüber Säureeinwirkungen durch z. B. Sickerwässer auf. KARNUTH (2003) konnte auf Basis des pH-stat-Verfahrens eine Pufferkapazität für Recyclingmaterialien ähnlicher Zusammensetzung wie die untersuchten Kapillarsperrmaterialien von mehreren zehntausend Jahren ableiten.

Dies ist bezüglich der Umweltverträglichkeit bedeutsam, da unterschiedliche pH-Werteverhältnisse die Verfügbarkeit verschiedener chemischer Parameter beeinflussen. Zink wird z.B. bei einem pH-Wert von 6,5 und Kupfer bei einem pH-Wert von 5 verstärkt mobilisiert. Wobei nach BAASCH & GOETZ (2004) hohe pH-Werte im Sickerwasser die Freisetzung von Schwermetallen mit amphoterem Charakter wie z. B. auch Kupfer begünstigen. Dieser Aspekt konnte jedoch mit den vorliegenden Ergebnissen der Eluatuntersuchungen nicht nachgewiesen werden. Die Analysen bestätigen, dass Schwermetalle entweder im Brennvorgang von Ziegel und Steinzeug ausgetrieben oder in eine stabile bzw. schwer lösliche Matrix eingebunden werden (KARNUTH 2003, SPANKA 2002).

Der Parameter Chrom gesamt des LAGA Merkblatts 20 wurde in der DepVerwV durch den Parameter Chrom(VI) ersetzt. Dies erscheint sinnvoll, da Chrom(VI) als leichtlöslich und toxisch gilt, während Chrom(III) für Mensch und Tier essentiell ist (WELP ET AL. 2001). Die Gehalte des Parameters Chrom gesamt wurden nach den Grenzwerten der LAGA (1997) überwiegend eingehalten, überschreiten aber den Zuordnungswert der DEPVERWV (2005) für Chrom(VI). Als Quelle für Chrom im Bauschutt-Recyclingmaterial können Rohstoffe bzw. Zuschlagsstoffe für die Zement oder Betonherstellung in Betracht kommen. Je nach Herstellung des Baustoffs können bei der Elution unterschiedliche Anteile an Chrom(III) oder Chromat freigesetzt werden (VAN DER SLOOT 2002). Eine Oxidation von etwa 1-2 % des Chrom(III) zu Chrom(VI) konnte im Boden bisher nur über MnO_2 als Oxidationsmittel erreicht werden (FISCHER & BÖHM 2001). Eine Stabilität erreicht Chrom(VI) nach WERNER (2001) bevorzugt bei hohen pH-Werten, geringem Gehalt an organischer Substanz und starker Durchlüftung. Dies entspricht in hohem Maß den Bedingungen in einem Kapillarblock aus Recyclingmaterialien, so dass für eine Beurteilung der Umweltverträglichkeit der leicht lösliche Chromatanteil festgestellt werden muss.

Neben den Zement- bzw. Beton- und anderen Mauerwerkbestandteilen im Recyclingmaterial wurden auch auf Basis der Asphaltanteile keine Überschreitungen der Grenzwerte durch die Spurenelemente erwartet. Bituminöse Bindemittel zeigen eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Einflüssen (LINDGREN 1996, ROGOSCH 2003). In der Festsubstanz der Qualitätsmaterialien wurden jedoch hohe Gehalte an Kohlenwasserstoffen ermittelt, die auf den Asphalt in den Mineralgemischen zurückzuführen sind. Nach den Vorgaben der LAGA (1997) stellen Überschreitungen des Parameters Kohlenwasserstoffe aufgrund von Asphaltanteilen im Baustoff kein Ausschlusskriterium dar. Die Begründung ist sicherlich darin zu finden, dass Asphalt eine Resistenz gegenüber aggressiven Wässern zeigt und auch eine hohe Langzeitbeständigkeit aufweist, da Alterung durch Oxidation keine Bedeutung hat.

Eine solche Öffnungsklausel, die sich explizit auf Kohlenwasserstoffgehalte bezieht, die durch Asphalt verursacht wurden, fließt zwar in die DEPVERWV (2005) nicht ein.

Primär ist jedoch festzustellen, dass mit Asphalt als Quelle des überhöhten Kohlenwasserstoffgehalts langfristig keine Umweltbeeinträchtigungen zu erwarten sind. Im „Besonderen Teil“ der Verordnung über die Verwertung von Abfällen auf Deponien über Tage (DEPVERWV 2005) wird erklärt, dass aus der LAGA-Mitteilung 20 für die Abfallart „Boden“ neben den Eluatkriterien auch Grenzwerte für den Feststoffgehalt übernommen wurden. Nach dem KRW-/ABFG (1994) dürfen sich Schadstoffe nicht im Wirtschaftskreislauf anreichern. Mit der DEPVERWV (2005) wird erkannt, dass durch eine Verwertung geeigneter Abfälle als Deponieersatzbaustoffe dem Wirtschaftskreislauf Schadstoffe entzogen werden. Aus diesem Grund wird im Teil B der DEPVERWV (2005) konstatiert, dass eine Begrenzung der Feststoffgehalte sogar entbehrlich sei. Dies kann mit der Ansicht von OBERMANN & CREMER (1992) bzw. HIRNER ET AL. (1998) ergänzt werden, dass Feststoffuntersuchungen keinen Aufschluss über eine Eluierbarkeit der Materialien und damit über deren kurz- oder langfristiges Schadstoffpotenzial geben können.

Damit kommt der Eluatuntersuchung hinsichtlich der Umweltverträglichkeitsbeurteilung von Deponieersatzbaustoffen eine immense Bedeutung zu. Das DEV-S4-Verfahren wurde in diesem Zusammenhang mit der DEPVERWV (2005) gesetzlich verankert, obwohl die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Freilandbedingungen in Frage zu stellen ist (BAASCH & GOETZ 2004, KARNUTH 2003, VAN DER SLOOT 1998, HIRNER ET AL. 1998, FRIEGE ET AL. 1990, DÜSER 1999).

Unter natürlichen Bedingungen finden z. B. Umsetzungsprozesse statt, die mit dem S4-Verfahren nicht berücksichtigt werden können. Das Porenwasser unter Freilandbedingungen ist aufgrund des sehr geringen Eluat-/Feststoffverhältnisses konzentrierter als das S4-Eluat. Das kann zum einen zu einer stärkeren chemischen Aktivität führen, die eine weitere Ionenfreisetzung zur Folge hat. Zum anderen kann es durch Reaktionen verschiedener Ionen zu Ausfällungen kommen, die geringere Schadstoffkonzentrationen bedingen (FRIEGE ET AL. 1990).

KARNUTH (2003) kritisiert, dass auch Stofffreisetzungen durch pH-Wert-Schwankungen im S4-Eluat nicht erfasst werden können. Aufgrund der hohen alkalischen Wirkung des Bauschutt-Recyclingmaterials ist jedoch nicht mit starken Änderungen des pH-Wertes zu rechnen. BAASCH & GOETZ (2004) konnten in Freilandversuchen jedoch bedingt durch die hohe Alkalität eine verstärkte Freisetzung von Kupfer nachweisen. Dies kann mit den Ergebnissen der Eluatuntersuchungen der Kapillarsperrensande und -kiese aus Bauschutt-Recyclingmaterial trotz eines hohen pH-Wertes in der Lösung nicht bestätigt werden. In einem Langzeitschüttelversuch konnte mit der Schütteldauer eine geringe signifikante Konzentrationszunahmen von Kupfer festgestellt werden. Eine Unterschätzung der Kupferkonzentration auf Basis des DEV-S4-Verfahrens kann somit nicht ausgeschlossen werden. Der vorgegebene Grenzwert der DepVerwV wurde nach einer Schütteldauer von 7 Tagen allerdings nur um 12 % ausgeschöpft.

Ein anderer Umsetzungsprozess, der im Zusammenhang von Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit von Recycling-Baustoffen von GOETZ & BAASCH (2004) festgestellt wurde, ist die Ausfällung von Calciumsulfat. Dadurch wird Sulfat immobil und die Konzentration im Sickerwasser sinkt. Für diese Reaktion wird allerdings eine jahreszeitliche Abhängigkeit beschrieben, so dass mit dem Einfluss steigender Temperaturen auch die Mobilität des Sulfats erneut ansteigt.

Ein weiterer Kritikpunkt an der Eluatherstellung nach S4 bzw. der Übertragung auf reale Verhältnisse wird im Materialabrieb während des Schüttelns gesehen. Die reaktive Oberfläche wird vergrößert und neue Bruchflächen können zusätzlich ausgelaugt werden, so dass es zu Konzentrationszunahmen kommt (BAASCH & GOETZ 2004, KARNUTH 2003, VAN DER SLOOT 1998, FÄLLMAN 1997). DÜSER (1999) gibt in diesem Zusammenhang allerdings zu bedenken, dass der Auslaugungsprozess des oberflächennahen Bereichs der Materialien schon soweit fortgeschritten sein kann, dass ein Materialabrieb keinen Einfluss auf die Eluatkonzentrationen zeigen muss.

BAASCH & GOETZ (2004) sowie KARNUTH (2003) konnten im Sickerwasser aus Lysimeterversuchen mit Recyclingbaustoffen signifikant unterschiedliche Schadstoffkonzentrationen im Vergleich zu den S4-Eluaten nachweisen. Diese Unterschiede in den Konzentrationen muss auf die stark differierenden Eluat-/Feststoffverhältnisse zurückgeführt werden. Aufgrund des geringen Anteils an Sickerwasser, das unter Feldbedingungen mit dem Material in Berührung kommt, zeigen sich zu Beginn der Untersuchungen höhere Konzentrationen als im S4-Eluat. Wird das Eluat-/Feststoffverhältnis beider Untersuchungsverfahren rechnerisch berücksichtigt, weist die überwiegende Anzahl untersuchter Parameter im Eluat nach DEV-S4 die höheren Gehalte auf. Die höheren Konzentrationen sind die Folge der vollständigen Benetzung der Materialoberfläche im Schüttelversuch im Vergleich zu den nur teilgesättigten Verhältnissen unter Feldbedingungen. Daraus folgt, dass durch das S4-Verfahren die Auslaugung der Materialien im großen Maß überschätzt werden kann (BAASCH & GOETZ 2004, KARNUTH 2003). Diese Überschätzung kann im positiven Sinn auch als Zeitraffereffekt der Auslaugung betrachtet werden. GRECH ET AL. (2002) sprechen bei einem Wasser-/Feststoffverhältnis von 10 von einer ungefähren fiktiven Elutionsdauer in der Praxis von ca. 20-40 Jahren.

Dennoch kann nicht davon ausgegangen werden, dass durch das S4-Elutionsverfahren ein Langzeitverhalten unter praxisnahen Bedingungen nachvollzogen werden kann. Deshalb sollte nach Auffassung von HIRNER ET AL. (1998) das S4-Verfahren zur Abschätzung des initialen Verhaltens von Materialien herangezogen werden. Dabei muss allerdings in die Betrachtungen einbezogen werden, dass insbesondere leichtlösliche Substanzen erfasst werden. Die zu Beginn von Freilandversuchen zu messenden hohen Konzentrationen an Salzen sowie hohen elektrischen Leitfähigkeiten sinken mit der Fortschreitung der Auswaschung (GRECH ET AL.

KARNUTH 2003, BAASCH & GOETZ). Diese zeitliche Entwicklung muss bei der Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Deponieersatzbaustoffen einfließen. Die Sekundärrohstoffe werden auf einem kontrollierten System eingebaut. Das Niederschlags-sickerwasser wird in Dränagen gefasst und kann für die Zeit, in der noch hohe Schadstoffkonzentrationen zu erwarten sind über Sickerwasseranlagen gereinigt werden, um anschließend eine umweltverträgliche sowie ressourcenschonende Deponieabdichtung zu erhalten. Im Vergleich zum DEV-S4-Eluatverfahren sollten für die Bewertung der nachhaltigen Umweltrelevanz Frachten bezogene Verfahren zum Einsatz kommen, die weniger die Augenblickskonzentration sondern vielmehr die Quellstärke des zu untersuchenden Ersatzbaustoffs ermitteln (z. B. Säulenversuche oder Lysimeterversuche).

Es bleibt zu beachten, dass durch den Einsatz von mineralischen Abfällen in einer Kapillarsperre als alternative Deponieoberflächenabdichtung keine Gefährdung von Boden und Grundwasser entstehen darf (DEPVERWV 2005, KrW-/ABFG 1996). Wird allerdings mit einer Risikobewertung der Nachweis erbracht, dass trotz Überschreitung einzelner Zuordnungswerte keine Umweltbeeinträchtigungen einhergehen, kann die zuständige Behörde nach der DEPVERWV (Fußnote 2 in Anhang 1, Tabelle 1) den Einsatz auch dieser Deponieersatzbaustoffe zulassen. Mit den nach DEPVERWV (2005) einzuhaltenden Zuordnungskriterien Z1.1 ist das Potenzial der physikalisch bzw. bautechnisch geeigneten mineralischen Abfälle als Deponieersatzbaustoffe im Vergleich zu den zuvor empfohlenen Anforderungen stark eingeschränkt. Im Merkblatt 20 der LAGA richteten sich die Grenzwerte für die Kapillarschicht nach Z1.1 und für den Kapillarblock nach Z1.2 der jeweilig einzusetzenden mineralischen Abfälle. Mit der Fußnote 2 der Tabelle 1 der DEPVERWV (2005) sollen jedoch Randbedingungen bestimmter Einzelfälle berücksichtigt werden, die sich bei dem Einsatz alternativer und gleichwertiger Abdichtungskomponenten nach §14 Abs. 6 der DEP (2002) ergeben. Dabei werden in der Begründung des Deutschen Bundestages zur DEPVERWV (2005) insbesondere die Kapillarsperren unter Verwendung von gebrochenem Beton als ein solcher Einzelfall hervorgehoben. Für den im Kipprinnenversuch getesteten Kapillarblock aus Recyclingmaterial ist die Fußnote 2 lediglich auf die Parameter pH-Wert und Leitfähigkeit anzuwenden. Aufgrund der Materialzusammensetzung, mit hohen Anteilen an Naturstein, weist das Eluat weder überhöhte Chlorid- noch Sulfatkonzentrationen auf. Die Überschreitung von pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit ist auf die Calciumhydroxide zurückzuführen, die aus der Zementmatrix ausgelaugt werden.

Die Kapillarsperrenkombination aus Natursand (N-KS-0/2(Ems)) und einem Kapillarblock aus Bauschutt-Recyclingmaterial weist über eine Versuchszeit von fast 12 Monaten eine gute Leistungsfähigkeit auf. Eine Beeinträchtigung der Kapillarsperrenwirkung aufgrund von Instabilitäten bzw. von Inkrustationen, die durch mögliche Auslaugungsprozesse bzw. Ausfällungen und Ablagerungen verursacht worden sein könnten, ist nicht festzustellen.

Die Widerstandsfähigkeit des Recyclingmaterials gegenüber der Auslaugung hängt insbesondere von der Dichtigkeit bzw. von der Porosität des Zementgesteins ab, wobei Zement eine hohe Wasserbeständigkeit aufweist (PETZOLD 1992). Aus diesem Grund sollte bei der Auswahl des einzusetzenden Recyclingmaterials darauf geachtet werden, dass die Anteile an Normal- und Schwebbeton überwiegen, da mit Leichtbeton eine hohe potenzielle Auslaugbarkeit verbunden ist. Bei der Übertragung der positiven Ergebnisse aus den Kipprinnenversuchen auf den Einsatz als Deponieoberflächenabdichtung muss bezüglich der Auslaugung zusätzlich berücksichtigt werden, dass unter realen Bedingungen niedrigere Wassertemperaturen in der Dichtung herrschen als im Laborversuch. Dadurch ist von einer langsameren Reaktionsgeschwindigkeit auszugehen. Außerdem sind im Kapillarblock nur geringe Wasserflüsse zu erwarten. Mit geringen Wassermengen wird sich um das grobkörnige Material ein Filmfluss mit äußerst geringen Fließgeschwindigkeiten entwickeln (STEINERT 1999). Diese nur langsame Erneuerung der betonangreifenden Substanzen durch geringe Mengen an Wasserzufluss bzw. unbewegtem Wasser führen zu einem nur geringen Angriffsgrad (ETTEL 2003, KARNUTH 2003), zumal die Abführung der Lösungsprodukte sehr langsam geschieht, womit sich Gleichgewichtsreaktionen einstellen können, die weitere Lösungsprozesse verzögern. Bei vollständig mit Wasser gefüllten Poren ist die Karbonatisierung unbedeutend, da nach Erreichen einer bestimmten Porenlösungskonzentration keine Diffusion oder Auflösung mehr stattfindet. Zusätzlich setzen mit Wasser gefüllte Poren dem Eindringen von CO_2 größeren Widerstand entgegen als leere Poren (ETTEL 2003, KARNUTH 2003, VAN DER SLOOT 1998).

7.4 Fazit und Ausblick

Resultierend aus der gesetzlichen Vorgabe, die zur Stilllegung zahlreicher Deponien in Deutschland führt bzw. führen dürfte, entsteht eine hohe Nachfrage nach Deponiebaustoffen. Eine Substitution der natürlichen Baustoffe durch Reststoffe bzw. mineralische Abfälle ist im Hinblick auf eine Ressourcenschonung unerlässlich.

Die Untersuchungen zum Einsatz von Bauschutt-Recyclingmaterialien in einer Kapillarsperre als alternative Deponieoberflächenabdichtung zeigen die Eignung von Bauschutt als Kapillarblock. Der Kipprinnenversuch der Materialkombination aus Natursand für die Kapillarschicht und Recyclingmaterial als Kapillarblock wies mit $306 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ eine etwas bessere laterale Dränkapazität auf als der Referenzversuch der Naturmaterialkombination mit $273 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

Die im Laufe der Kapillarsperrenforschung ermittelten Gütekriterien (BAUER 2001, GARTUNG & NEFF 2000, LAGA 1997, PALM ET AL. 2003, STEINERT 1999) geben eine gute Orientierung für die Auswahl geeigneter Kapillarsperrenmaterialien, wobei der Wert der Wasseraufnahmefähigkeit auf mindestens 3,7 Masse-% angehoben werden muss.

Beim Einsatz von Recycling-Baustoffen muss auf deren stoffliche Zusammensetzung geachtet werden. Während die Eignung von Bauschutt aus Beton, Asphalt und Naturstein als Kapillarblock nachgewiesen werden konnte, sind Recyclingmaterialien mit hohen Anteilen an Ziegel, Steinzeug und Mauerwerk von diesem Verwendungszweck auszuschließen. Als begrenzende Faktoren werden in diesem Zusammenhang die Kornstabilität und die chemischen Eigenschaften angesehen. Demzufolge ist bei der Verwendung von Bauschutt-Recyclingmaterial als Deponieersatzbaustoff in Verbindung mit einer Kapillarsperre ein den Anforderungen entsprechendes Qualitätsmanagement anzuwenden.

Mit der DEPVERWV (2005) wird der Einsatz von Reststoffen erheblich eingeschränkt, da viele Materialien zwar als Deponieersatzbaustoffe die bauphysikalischen Anforderungen erfüllen können, aber die geforderten chemischen Zuordnungskriterien nicht einhalten. Für alternative Deponieoberflächenabdichtungskomponenten wurde mit der Fußnote 2 in Anhang 1, Tabelle 1 in der DEPVERWV (2005) eine Öffnungsklausel eingearbeitet. Diese kann nach Angaben des Gesetzgebers insbesondere bei dem Einsatz von Betonbruch als Kapillarsperrenmaterial Anwendung finden. Wird mit einer Risikobewertung der Nachweis erbracht, dass trotz Überschreitung einzelner Zuordnungswerte keine Umweltbeeinträchtigungen einhergehen, kann die zuständige Behörde nach der DEPVERWV (Fußnote 2 in Anhang 1, Tabelle 1) den Einsatz auch dieser Deponieersatzbaustoffe zulassen. Das Recyclingmaterial, das sich im Kipprinnenversuch als geeigneter Kapillarblock herausgestellt hat, weist lediglich bei den Parametern pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit Überschreitungen der Zuordnungskriterien nach DEPVERWV (2005) auf. Eine Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit ist auszuschließen.

Die laterale Dränkapazität aus den Kipprinnenversuchen sollte nach der Definition von Ross (1990) bestimmt werden, da nur sie es erlaubt, unabhängig von Versuchsrandbedingungen die Leistungsfähigkeit einer Materialkombination auf die hydraulischen Materialeigenschaften zu übertragen. Für die Umsetzung einer Kapillarsperrenkombination in die Praxis und die damit verbundene Abschätzung der möglichen Hanglänge können die Vorgaben der maximal zulässigen Durchlässigkeit von mineralischen Dichtungen über einen Sicherheitsbereich als weiteres Beurteilungskriterium mit einbezogen werden. In diesem Zusammenhang wurde eine Methode zur Bestimmung der potenziellen lateralen Dränkapazität mit Hilfe einer Regressionsanalyse entwickelt. Sie ermöglicht es, aus den Daten der Zufluss-Kapillarblockabflussbeziehung, die in Kipprinnenversuchen ermittelt wird, auf eine einfache aber physikalisch fundierte Weise die Leistungsfähigkeit einer Kapillarsperrenkombination zu bestimmen.

Vor der ersten großbautechnische Umsetzung einer Kapillarsperre aus Bauschutt-Recyclingmaterial als Deponieoberflächenabdichtung ist die Eignung des Materials unter natürlichen Bedingungen in einem Probefeld nachzuweisen. Für diesen

Gleichwertigkeitsnachweis wird seit November 2004 ein Testfeld von der Professur für Abfall- Ressourcenmanagement der Justus-Liebig-Universität auf der Hausmülldeponie Reiskirchen bei Gießen (Hessen) betreut. Bei den eingebauten Kapillarsperrenmaterialien handelt es sich um einen Natursand der Körnung 0 bis 2 mm in Kombination mit dem als Kapillarkblock geeigneten Recyclingmaterial R-KB-Q-2/10.

Forschungsbedarf besteht im Bereich des Verständnisses für die Fließprozesse innerhalb einer Kapillarsperre. Insbesondere eine prozessgerechte Abbildung der bodenhydraulischen Verhältnisse an der Grenzschicht sowohl in der Kapillarschicht als auch im Kapillarkblock bei Versagen der Kapillarsperrenfunktion könnte zu einer Verbesserung der numerischen Modellierung von Kapillarsperren führen. Dabei kommt dem physikalischen Verständnis des präferentiellen Fließens im Kapillarkblock eine besondere Bedeutung zu. Mit Erreichen dieser prozessabbildenden exakten Parameteridentifikation könnte durch numerische Modellierung der versuchstechnisch sehr aufwendige Kipprinnenversuch zumindest teilweise ersetzt werden.

Für den Einsatz von Reststoffen in Deponieoberflächenabdichtungen sollte unter Rücksichtnahme des Ressourcenschutzes die Gewichtung der Eluatuntersuchungen nach DEV-S4 überdacht werden. Ergebnisse aus Sickerwasseruntersuchungen im Rahmen von Feldversuchen oder Säulen- bzw. Lysimeterversuchen sollten verstärkt in die Risikobewertung einfließen, die nach DEPVERWV (2005) bei Überschreitung einzelner Zuordnungskriterien gefordert wird, um einen voreiligen Ausschluss potenziell geeigneter Baustoffe zu vermeiden.

8 Zusammenfassung

Im Laufe der letzten drei Jahrzehnte hat sich das Abfallrecht in Deutschland erheblich weiterentwickelt. Resultierend aus der Umsetzung der TECHNISCHE ANLEITUNG SIEDLUNGSABFALL (TASi, 1993) sowie basierend auf der EU-DEPONIERICHTLINIE (EU-DEPRL, 1999) und deren Umsetzung in Landesrecht - neben anderen Maßnahmen insbesondere durch die ABFALL-ABLAGERUNGSVERORDNUNG (ABFABLV, 2001) und die DEPONIEVERORDNUNG (DEPV, 2002) - dürften die gesetzlichen Vorgaben kurz- bis mittelfristig zur Stilllegung der meisten Deponien in Deutschland führen. Mit den o.g. Verwaltungsvorschriften und Verordnungen wurden Anforderungen an die Oberflächenabdichtung von Deponien in Form der sogenannten Regelabdichtung definiert. Anstelle dieser herkömmlichen Regelabdichtung ist jedoch auch ein Einsatz alternativer Oberflächenabdichtungen möglich, sofern das alternative System oder alternative Systemkomponenten als gleichwertig eingestuft werden können (DEPV, 2002).

Eine Alternative stellen Kapillarsperrensysteme dar, die im Laufe des vorangegangenen Jahrzehnts große Anerkennung erlangt haben (BARTH 2003, BAUER 2001, JELINEK 1997, KÄMPF 2000, MELCHIOR 1993, STEINERT 1999, VON DER HUDE 1999, WOHNLICH 1991, ZISCHAK 1997). Unter Verwendung von Naturmaterialien für die sandige Kapillarschicht und den darunter liegenden kiesigen Kapillarblock kamen sie bereits häufig auf Deponien und Altlastenstandorten als Abdichtungssystem zur Anwendung (MELCHIOR & STEINERT 2001). Im Hinblick auf die drohende Knappheit an Primärbaustoffen im Zusammenhang der durchzuführenden Deponiestilllegungen, ökonomische Vorteile und insbesondere die umweltpolitischen Forderungen der Ressourcenschonung war es das vorrangige Ziel der vorliegenden Arbeit, die Eignung von Bauschutt-Recyclingmaterialien in Kapillarsperrensystemen zu untersuchen.

Zu diesem Zweck wurden 7 Recyclingmaterialien verschiedener Körnungen - 4 Sande und 3 Kiese - auf ihre Tauglichkeit für den Einsatz als Kapillarschicht- bzw. -blockmaterial analysiert. Die Bauschutt-Recyclingmaterialien konnten aufgrund ihrer stofflichen Zusammensetzung in zwei Qualitäten eingeteilt werden. Als Qualitätsmaterial wurde das Mineralgemisch mit den Inhaltsstoffen Beton, Asphalt und Naturstein bezeichnet. Andere Materialien beinhalteten zusätzlich Anteile von Mauerwerk, Ziegel und Steinzeug. Für vergleichende Untersuchungen wurden 4 Naturmaterialien verschiedener Herkunft und Körnungen - 3 Sande und 1 Kies - herangezogen, die ferner für geeignete Kombinationsmöglichkeiten mit den Recyclingmaterialien getestet wurden.

Alle Materialien wurden bezüglich ihrer physikalischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften anhand der sich im Laufe der Kapillarsperrenforschung entwickelten Gütekriterien überprüft. Die Untersuchungen ergaben, dass die Sande aus Recyclingmaterial nur bedingt für den Einsatz in einer Kapillarsperre geeignet sind.

Die günstigsten chemischen und physikalischen Eigenschaften weist das Qualitätsmaterial der Körnung 0-2 mm (R-KS-Q-0/2) auf. Bessere Ergebnisse bezüglich der Eignung als Kapillarschichtmaterial erzielten erwartungsgemäß die Natursande, ebenfalls mit der Körnung 0-2 mm (N-KS-0/2(Rhein/Main) und N-KS-0/2(Ems)).

Bei den Kapillarblockmaterialien zeigte das Qualitätsmaterial der Körnung 2-10 mm (R-KB-Q-2/10) im Vergleich zu dem Naturmaterial der Körnung 2-5 mm (N-KB-2/5) im Rahmen der umfangreichen laboranalytischen Voruntersuchungen gleichermaßen gute Eigenschaften für den Einsatz als Kapillarblock, mit Ausnahme einer geringen Überschreitung der Wasseraufnahmefähigkeit.

Basierend auf den Ergebnissen der physikalischen, mechanischen und chemischen Voruntersuchungen wurden drei Materialkombinationen ausgewählt, die in Kipprinnenversuchen weiterführend auf ihre hydraulische Eignung bzw. laterale Dränkapazität getestet wurden. Zum Einsatz kam eine reine Naturmaterialkombination (N-KS-0/2(Ems) mit N-KB-2/5), eine reine Recyclingmaterialkombination (R-KS-Q-0/2 mit R-KB-Q-2/10) und eine Natur-/Recyclingmaterialkombination mit dem Natursand N-KS-0/2(Ems) und dem Recyclingmaterialkies R-KB-Q-2/10.

Die eigens für die Versuche konzipierte Kipprinne hatte eine Länge von 6 m und eine Breite von 0,6 m. Die stufenweise veränderbare Neigung wurde für alle Versuche auf 15° konstant gehalten. In den Kipprinnenversuchen wurde der Kapillarblock mit einer Mächtigkeit von 20 cm und die Kapillarschicht mit 40 cm eingebaut. Der Zufluss konnte entweder über eine Beregnung oder über eine Stirnwandbewässerung erfolgen. Die Abflüsse der Kapillarschicht und des Kapillarblocks wurden über Kippzähler digital erfasst. Randabflüsse wurden getrennt gesammelt und ausgewertet. Die hydraulischen Prozesse wurden in 6 Messfeldern mit insgesamt 24 Tensiometern und 24 FDR-Sonden kontinuierlich untersucht und die Daten digital gespeichert. Das Matrixpotenzial und der Wassergehalt wurden in einer Tiefe des Kapillarblocks und drei Tiefen der Kapillarschicht gemessen. Außerdem konnte mit den Tensiometern die Temperatur zusätzlich registriert werden.

Für eine standardisierte Bewertung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Kapillarsperrensystemen wurde ein regressionsanalytischer Ansatz entwickelt. Bei dem Ansatz wird davon ausgegangen, dass nach dem materialspezifischen Überschreiten der hydraulischen Kapazität der Kapillarschicht der Kapillarblockabfluss proportional mit der Zuflussratensteigerung zunimmt. Das bedeutet, dass unter diesen Bedingungen die Funktion linear ist und die Steigung 1 haben muss. Das Bestimmtheitsmaß R^2 bildet dabei das Gütemaß für die Anpassung der Zufluss- und Kapillarblockabflussraten an die definierte Gerade. Die sogenannte potenzielle laterale Dränkapazität stellt nach diesem Verfahren den Achsenabschnitt dar, an dem die Gerade die x-Achse schneidet. Die Vorteile des Regressionsmodells zu den beste-

henden Berechnungsmethoden und Ableitungsempfehlungen werden exemplarisch dargestellt und diskutiert.

Die Ergebnisse der Kipprinnenversuche zeigen, dass die Naturmaterialkombination, die als Referenz für die Eignung des Einsatzes von Bauschutt-Recyclingmaterial in Kapillarsperren herangezogen wurde, eine potenzielle laterale Dränkapazität von $273 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ besitzt. Bei der Recyclingmaterialkombination kann lediglich eine potenzielle laterale Dränkapazität von $64 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ festgestellt werden. Diese Materialkombination muss aufgrund der geringen Leistungsfähigkeit für den Einsatz in einem Deponieoberflächenabdichtungssystem als ungeeignet angesehen werden. Mit der Kombination des Sandes aus der Naturmaterialkombination und dem Kies aus der Recyclingmaterialkombination konnte hingegen eine potenzielle laterale Dränkapazität von $306 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ermittelt werden.

Der Kipprinnenversuch mit der Natur-Recyclingmaterialkombination wurde mittels des Modells HYDRUS-2D mit dem Ziel nachgebildet, über eine numerische Simulation den versuchstechnischen Aufwand der Bemessung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Kapillarsperrenkombinationen verringern zu können. Die Validierung ergab ein deutlich besseres Simulationsergebnis, sofern die van-Genuchten-Parameter anhand der gemessenen Tensiometer- und FDR-Sonden-Daten aus dem Kipprinnenversuch abgeleitet wurden. Stechzylindermessungen nach dem Drucktopfverfahren eignen sich demgegenüber weniger, da die Wasserretention im Kapillarschichtsand bei der Drucktopfentwässerungsmethode deutlich vom Bewässerungsexperiment im Kipprinnenversuch abweicht (Hystereseeffekt).

Empfindlichkeitsstudien mit dem Modell HYDRUS-2D zeigen, dass die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit eine sehr sensible Einflussgröße auf hinsichtlich der lateralen Dränkapazität ist. Aus diesem Grund sollte der gemessene k_f -Wert als Eingangparameter für die Simulation Vorrang vor einer Berechnungen haben. Die nach BEYER (1964) oder HAZEN (1895 in HARTGE & HORN 1999) berechneten Wasserleitfähigkeiten sind prinzipiell ungeeignet. Sie sind generell höher als die gemessenen Daten, wodurch die lateralen Dränkapazitäten in der Simulation weit überschätzt wurden.

Ferner konnte mit den Modellsimulationen gezeigt werden, dass in dem Zuflussbereich vor Erreichen der lateralen Dränkapazität die Höhe der Zuflussratensteigerung keinen bedeutsamen Einfluss auf die hydraulische Leistungsfähigkeit der Kapillarsperre ausübt.

Resultierend aus den Simulationsergebnissen können Großkipprinnenversuche derzeit nur begrenzt durch numerische Modellierungen ersetzt werden, um den versuchstechnischen Aufwand zu reduzieren.

Mit den verschiedenen physikalischen, mechanischen und chemischen Materialeignungsüberprüfungen konnte festgestellt werden, dass eine Bewertung der Resultate an den bestehenden Empfehlungen hilfreich ist. So führten geringe Abweichungen von den empfohlenen Korngrößenbandbreiten, die als Einordnung für funktionierende Kapillarsperren gelten, zu einer mangelhaften Wirkungsfunktion im Kipprinnenversuch. Die Anforderung an die Wasseraufnahmefähigkeit für Kapillarsperrenmaterialien von 1 Masse-% muss auf der Basis der Erfahrungen aus dem Kipprinnenversuch mit der Natur-/Recyclingmaterialkombination jedoch auf mindestens 3,7 Masse-% erweitert werden. Eine ausreichende Kornstabilität, die mit wachsender Eigenporosität sinkt, muss für die Kapillarsperrenmaterialien allerdings weiterhin gewährleistet bleiben.

Zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit sind die Zuordnungskriterien der DEPVERWV (2005) heranzuziehen. Für den im Kipprinnenversuch getesteten Kapillarkblock aus Recyclingmaterial wurden im Eluat lediglich Überschreitungen von pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit festgestellt. Wird mit einer Risikobewertung der Nachweis erbracht, dass trotz Überschreitung einzelner Zuordnungswerte keine Umweltbeeinträchtigungen einhergehen, wovon bei den genannten Parametern auszugehen ist, kann die zuständige Behörde nach der DEPVERWV (Fußnote 2 in Anhang 1, Tabelle 1) den Einsatz dieser Deponieersatzbaustoffe zulassen.

Mit Hilfe der physikalischen, mechanischen und chemischen Untersuchungen sowie der Untersuchungen zur hydraulischen Leistungsfähigkeit im Kipprinnenversuch konnte die prinzipielle Eignung von Bauschutt-Recyclingmaterial für den Einsatz als Kapillarkblockmaterial in einer Kapillarsperre als alternatives Deponieoberflächenabdichtungssystem nachgewiesen werden. Die Übertragung der Ergebnisse auf andere Bauschutt-Recyclingmaterialien setzt allerdings voraus, dass das Material zuvor qualifiziert untersucht wird. Zur Zeit wird die Natur-Recyclingmaterialkombination im Feldversuch auf der Deponie Reiskirchen/Hessen unter Praxisbedingungen auf einem Probefeld von 40 m Länge getestet.

9 Summary

The German law on waste has been developed continuously in the course of the last three decades. These legal regulations should lead for a short or medium term to a closure of the majority of landfills in Germany, due to the implementation of the TECHNISCHE ANLEITUNG SIEDLUNGSABFALL (TASi, 1993) as well as the implementation of the ABFALL-ABLAGERUNGSVERORDNUNG (ABFABLV, 2001) and the DEPONIEVERORDNUNG (DEPV, 2002) in federal state law on the basis of the EU-DEPONIERICHTLINIE (EU-DEPRL, 1999). These administrative and legal instructions defined requirements for the surface sealing of landfills in the form of the so-called conventional sealing. The use of an alternative surface sealing will be possible, if either the alternative system or one of its alternative components can be classified on a par with the conventional system (DEPV, 2002).

An alternative is the capillary barrier system, which has obtained a high acceptance during the previous decade (BARTH 2003, BAUER 2001, JELINEK 1997, KÄMPF 2000, MELCHIOR 1993, STEINERT 1999, VON DER HUDE 1999, WOHNLICH 1991, ZISCHAK 1997). It has already been used as sealing system on landfills and brownfield sites using natural materials for the sandy fine layer and the subjacent gritty coarse layer (MELCHIOR & STEINERT 2001).

With regard to the imminent scarcity of natural construction materials relating to the closure of landfills, the economic advantages and environmental concerns, the main purpose of this research was to examine and verify the suitability of waste recycling construction materials for their use in capillary barrier systems.

Therefore, seven recycling materials of different particle-size distributions – four types of sand and three types of gravel – were analysed in terms of their suitability as fine layer and coarse layer respectively. The construction waste recycling materials could be divided into two different qualities on the basis of their substantial composition. The mineral mixture, which included concrete, asphalt and natural stone, was characterised as quality material. Other materials additionally contained masonry, clay brick and vitrified clay. Four natural materials of different sources and particle-size distributions – three sands and one gravel – were selected for comparative analyses. Furthermore, they were tested in terms of their suitability as a possible combination with recycling materials.

Every material was tested concerning its physical, mechanical and chemical characteristics on the basis of the quality factor, which has been developed during the research of capillary barriers. These tests have proven that the sandy recycling materials are suitable to a limited use in capillary barriers only. The quality material with a particle-size distribution of 0-2 millimeter (R-KS-Q-0/2) shows the most advantageous chemical and physical characteristics. Furthermore, natural sands achieved, as expected, better results regarding their suitability as fine layer material, also with

a particle-size distribution of 0-2 millimeter (N-KS-0/2(Rhein/Main) und N-KS-0/2(Ems)).

During extensive preliminary laboratory examinations of the coarse layer material, the quality material with a particle-size distribution of 2-10 mm (R-KB-Q-2/10) showed likewise good characteristics for the use in a capillary barrier in comparison to the natural material with a particle-size distribution of 2-5 mm (N-KB-2/5). The water absorption capacity only was found to be slightly higher for the recycling material.

Based on the results of the physical, mechanical and chemical preliminary examinations, three combinations of materials were chosen, which were continuously tested in an experimental tank for testing capillary barriers concerning their hydraulic suitability and their lateral diversion capacity. A combination of pure natural materials (N-KS-0/2(Ems) with N-KB-2/5), a combination of pure recycling materials (R-KS-Q-0/2 with R-KB-Q-2/10) and a combination of natural and recycling material with the natural sand N-KS-0/2(Ems) and the recycling gravel material (R-KB-Q-2/10) were used.

The experimental tank for testing capillary barriers has specially been designed for these experiments with a length of six meters and a width of 0.6 meters. The incline is gradually alterable and has been constantly fixed at 15° for each test run. The water inflow resulted either from a sprinkler or from a front wall irrigation.

The drainage of the fine layer as well as the coarse layer was collected and digitally recorded by tipping counters. The drainages at the edge of the tank were collected and analysed separately. The hydraulic processes in six sectional measuring fields were continuously measured by a total of 24 tensiometers and 24 FDR-sensors. The matric potential and the water content were quantified in one depth of the coarse layer and in three depths of the fine layer. Furthermore, the tensiometers could record the temperature. The thickness of the coarse layer in the experimental tank amounted 20 centimeters, the thickness of the fine layer 40 centimeters.

In order to deal with a standardised evaluation of the hydraulic capability of capillary barrier systems, an approach of regression analysis has been developed. This approach assumes that the drainage of the coarse layer rises proportionally with the increase of the inflow rate after the material-specific overstepping of the hydraulic capacity of the fine layer. This means that under these preconditions, the function is linear and shows a gradient of 1. The measure of the quality for the adaption of the coarse layer inflow and outflow rates at the defined straight line represents the coefficient of determination R^2 . According to this method, the so-called potential lateral diversion capacity is the axis intercept, at which the straight line intersects the x-axis. The advantages of the regression model in comparison to the existing calculation methods as well as recommendations of interpretation are exemplarily presented and discussed.

The results of the tests in the experimental tank demonstrate that the combination of natural material has a potential lateral diversion capacity of $273 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. Hence, this combination was used as reference for the suitability of recycling material in capillary barriers. The combination of recycling material merely demonstrates a potential lateral diversion capacity of $64 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. As a result of its low performance, the recycling material combination must be regarded as inappropriate for the use in landfill surface sealing systems. The combination of sand from the natural material combination and gravel from the recycling material combination achieved a potential lateral diversion capacity of $306 \text{ L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$.

The test with the combination of natural-recycling material in the experimental tank was reproduced by using the model HYDRUS-2D. This numerical simulation had the intention to reduce the effort of rating the hydraulic performance of capillary barrier combinations. The validation showed a significantly better simulation result, when the VAN-GENUCHTEN-parameters were derived from the tests in the experimental tank on the basis of the measured data of the tensiometers and the FDR-sensors. In contrast, the measurements with soil sampling cores using the method of pressure-plate-apparatus for moisture characteristic measurements suited less, because of the identification of hysteresis-effects of the water retention function in the fine layer between the pressure-plate-method and the irrigation tests in the experimental tank.

Tests of sensitivity by using HYDRUS-2D demonstrate that the saturated hydraulic conductivity is a very sensitive factor concerning the result of the lateral diversion capacity. On this account the measured k_f -value should be prioritised to a calculation as an input parameter for the simulation. According to BEYER (1964) or HAZEN (1895 in HARTGE & HORN 1999), the calculated water conductivities are principally inappropriate. They are generally higher than the measured data, leading to a large overestimation of the lateral diversion capacity in the simulation.

The model simulations shows, that the inflow rate increase does not exert a significant influence on the hydraulic performance of the capillary barrier before the lateral diversion capacity is achieved.

Nevertheless it could be shown, that the use of numerical models in order to reduce the effort of testing is limited.

Due to different physical, mechanical and chemical examinations of the suitability of materials it could be ascertained that an evaluation of the results with existing recommendations is helpful. For example, little differences from the recommended soil texture spectra, which are regarded as classification for running capillary barriers, lead to an insufficient effect at the tests in the experimental tank. On the basis of the tests with the natural/recycling material combination in the experimental tank, the requirements for the water absorption for capillary barrier materials of 1 mass-%

must be expanded to at least 3,7 mass-%. A sufficient grain stability, which decreases with a growing innate porosity, must still be guaranteed.

The criteria of the DEPVERWV (2005) for the classification of materials have to be consulted for the judgment of the environmental compatibility. The coarse layer of recycling material, which was tested in the experimental tank, shows oversteppings concerning the pH-value and the electric conductivity in eluate only. Despite single oversteppings, the competent authority may allow the use of construction materials, if a risk assessment assures that any environmental impact is excluded. This is assumed as a fact concerning the parameters mentioned.

The principle suitability of recycling materials used as a coarse layer in a capillary barrier as an alternative surface sealing system for landfills could be verified by the physical, mechanical and chemical analyses as well as the analyses of the hydraulic performance in the experimental tank. A qualified preliminary examination of the material is inevitable for transferring these results to other recycling materials.

Currently, the natural/recycling material combination is tested under practical conditions at the landfill in Reiskirchen/ Hesse in a test field with a length of 40 meters .

Literaturverzeichnis

- Abfallablagerungsverordnung** (2001): Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen.
- Abfallgesetz** (1972): Abfallbeseitigungsgesetz (1. AbfG).
- Abfallgesetz** (1986): Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (2. AbfG) BGB1. I S. 1410, berichtigt S.1501.
- Andersen, L. J., Clausen, E., Jakobsen, R. und Nilsson, B.** (1988): Two-year water balance measurements of the Capillary Barrier test field at Botterup, Denmark. Preliminary results. In: UNESCO (Hrsg.): Impact of Waste Disposal on Groundwater and Surface Water. Workshop proceedings, 15.-19. August, Copenhagen, Denmark, 24 S.
- Arnold, A.** (1981): Salzminerale in Mauerwerken. Schweiz mineral petrogr Mitt 61, 147-166.
- Baasch, A. und Goetz, D.** (2004): Umweltverträglichkeit von Recycling-Baustoffen beim Einsatz im Straßenbau. Straße & Autobahn 7, 365-368.
- Baker, R. S. und Hillel, D.** (1990): Laboratory tests of a theory of fingering during infiltration into layered soils. Soil Science Society of America Journal 54, 20-30.
- Barth, C. und Wohnlich, S.** (2001): Proof of efficacy of capillary barriers for capping of a sanitary landfill. In R. W. Sarsby und T. Meggyes (Hrsg.): The exploitation of natural resources and the consequences. Telford, London.
- Barth, C.** (2003): Die Wirksamkeit der Kapillarsperre als Deponieoberflächenabdichtung - Feldversuch auf der Deponie Bayreuth. Diss., Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München, <http://edoc.ub.uni-muenchen.de/archive/00001829/>, 119 S.
- Bauer E.** (2001): Eignung verschiedener Materialien für Kapillarsperren - Auswahl und Dimensionierung. Diss., Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie, Ludwig-Maximilians-Universität München, Münchner Geologische Hefte, Band 13, 142 S.
- Bauters, T. W. J., DiCarlo, D. A., Steenhuis, T. S. und Parlange, J.-Y.** (1998): Preferential flow in water-repellent sands. Soil Sci Soc Am J 62, 1185-1190.
- Benson, C. H., Brosscher, P. J., Lane, D. T. und Pliska, R. J.** (1994): Monitoring System for Hydrologic Evaluation of Landfill Covers. Geotechnical Testing Journal 17, 138-149.
- Bertram, U.** (2003): Aktueller Stand der Überarbeitung der LAGA-Mitteilung 20: Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2003. In: T. Egloffstein, G. Burkhardt und K. Czurda (Hrsg.): Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2003, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 128, Erich Schmidt Verlag, Berlin. 159-180.
- Beyer, W.** (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilung. Wasserwirtschaft-Wassertechnik 14, 165-169.
- Blume, H.-P.** (1992): Handbuch des Bodenschutzes - Bodenökologie und -belastung, Vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen. 2, ecomed, Landsberg/Lech.
- BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit** (2004): Bundesregierung unterbindet Scheinverwertung auf Deponien. <http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/doc/print/6854.php>
- Bohne, K.** (1998): Wasserbewegung und Wasserleitfähigkeit des Bodens. In: H.-P. Blume et al.: Handbuch der Bodenkunde. ecomed, Landsberg/Lech.

- Brameshuber, W. und Uebachs, S.** (2000): Emissionen organischer Stoffe aus mineralischen Baustoffen unter Berücksichtigung der Verwendung von Abfällen zur Verwertung am Beispiel Beton. Forschungsbericht F 581, Institut für Bauforschung Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, 133 S.
- Bratschi, E. und Matter, B.** (1994): Oberflächenabdichtung bei der Sanierung der Sondermülldeponie Bonfol. Entsorgungspraxis, 12, 41-45.
- Breh, W. und Hötzl, H.** (1999): Langzeituntersuchungen zur Wirksamkeit des Oberflächenabdichtungssystems mit Kapillarsperre auf der Deponie Karlsruhe West - Ergebnisse, Schlußfolgerungen und Ausblick. In T. Eglolfstein, G. Burkhardt und K. Czurda (Hrsg.): Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten '99. Zeitgemäße Oberflächenabdichtungssysteme - ist die Regelabdichtung nach TA-Si noch zeitgemäß? Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 116, Erich Schmidt Verlag, Berlin. 143-166.
- Bronstert, A.** (1994): Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. Diss., Mitteilungen des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Band 46, Universität Karlsruhe, 192 S.
- Bronstert, A., Merkel, U. und Zischak, R.** (1996): Stömungsverhältnisse im Hangbereich einer Deponie-Oberflächenabdichtung. Wasser & Boden 48, 38-54.
- Brooks, R. H. und Corey, A. T.** (1964): Hydraulic Properties of Porous Media. Hydrology Paper 3, Colorado State University, 27 S.
- Brooks, R. H. und Corey, A. T.** (1966): Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow. Journal of the Irrigation and Drainage Division - Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 92, 61-88.
- Brücklmeier, W., Melchior, S. und Steinert, B.** (2003): Versuchsfelder zur Untersuchung der Wirksamkeit alternativer Oberflächenabdichtungen auf der Deponie Deetz. Schrift zum 1 Symposium Umweltgeologie 2003 10, 371-379.
- Butts, M. B. und Jensen, H. K.** (1996): Effective parameters for multiphase flow in layered soils. Journal of Hydrology 183, 101-116.
- Colombi, C.** (1986): Sanierung der Depnie Pramont. Verband Schweizerischer Abwasserfachleute. Verbandsbericht der 163. Mitgliederversammlung vom 20./21. 06.1986, Sion.
- Deponieverordnung** (2002): Verordnung über Deponien und Langzeitlager.
- Deponieverwertungsverordnung** (2005): Verordnung über die Verwertung von Abfällen auf Deponien über Tage.
- Deutscher Bundestag** (2005): begründung zur Verordnung über die Verwertung von Abfällen auf Deponien über Tage. Drucksache 15/5542, 14-32.
- Diersch, H.-J. G.** (2002): Feflow 5.0 - Reference Manual. WASY GmbH, Berlin.
- DIN 1045** (1988): Beton- und Stahlbeton - Bemessung und Ausführung.
- DIN 18123** (1996): Bestimmung der Korngrößenverteilung.
- DIN 18124** (1997): Bestimmung der Korndichte - Kapillarpyknometer - Weithalspyknometer.
- DIN 18126** (1996): Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung.

- DIN 18128** (1990): Bestimmung des Glühverlusts.
- DIN 18129** (1996): Kalkgehaltsbestimmung.
- DIN 38414** (1984): Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4).
- DIN EN 1097 - 6** (2001): Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen.
- DIN EN 1484** (1997): Anleitung zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC).
- DIN EN 933-4** (1999): Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen.
- DIN ISO 11466** (1997): Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente.
- Düser, O.** (1999): Verwertung von aus Bauschutt aufbereitetem Recyclingmaterial in mineralischen Dichtungssystemen. Diss. Eigenverlag Universität Hannover, Hannover.
- Egloffstein, T. und Burkhardt, G.** (2004): Sicherung / Sanierung von Altdeponien - Gefahrenabwehr - contra Vorsorgeprinzip? Unterschiedliche Ansätze und Vorgehensweisen bei der Altlasten- und Deponiesanierung. In: T. Egloffstein, G. Burkhardt und K. Czurda (Hrsg.): Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2004. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 132, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 283-308.
- Eliassi, M. und Glass, R. J.** (2001): On the continuum-scale modeling of gravity-driven fingers in unsaturated porous media: The inadequacy of the Richards equation with standard monotonic constitutive relations and hysteric equations of state. *Water Resources Research* **37**, 2019-2035.
- Eliassi, M. und Glass, R. J.** (2002): On the porous-continuum modeling of gravity-driven fingers in unsaturated materials: Extension of standard theory with a hold-back-pile-up effect. *Water Resources Research* **38**, 16-1-16-11.
- Engeser, B., Mederer, J. und Zörkendörfer, E.** (1998): Untersuchung an Bauschutt-Recycling Material und Diskussion der Bezüge zur LAGA-TR/Bauschutt. NfB/N 4.07, Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover, 45 S.
- Ettel, W.-P.** (2003): Beton. In W. Scholz und W. Hiese (Hrsg.): Baustoffkenntnis. Werner Verlag, München 247-367.
- EU-Deponierichtlinie** (1999): Richtlinie 1999/31/EG des Rates der Europäischen Union vom 26. April 1999 über Abfalldeponien.
- Fällmann, A.-M.** (1997): Performance and Design of the availability test for measurement of potentially leachable amounts from waste materials. *Environmental Science & Technology* **31**, 735-744.
- Fehlau, K.-P. und Nienhaus, U.** (2001): Die Entwicklung der bautechnischen Sicherung von Deponien.
- Fischer und Böhm** (2001): Eigenschaften und Umweltrelevanz von Chrom. Ökotoxikologische Relevanz von Chrom (III) und Chrom (VI) in Kalkdüngemitteln, Böden und Pflanzen - Referate des Kolloquiums der landwirtschaftlichen Beratung Thomasdünger und der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken, 15. Januar 2001 in Bonn, Schriftenreihe der FehS, 9, 23-34.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen** (1986): Merkblatt über die Verwendung industrieller Nebenprodukte im Straßenbau, Teil: Steinkohleflugasche, Köln.

- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen** (1990): Stellungnahme zur Verwendung verbrauchter Formsande aus Gießereien im Erd- und Straßenbau. *Straße & Autobahn* 41, 83.
- Fremgen, B. und Meinken, K.** (2004): Einsatz aufbereiteter MVA-Schlacke als Baustoff auf Deponien - noch möglich trotz DepVerwV? - Teil 1. *Müll und Abfall* 7, 319-324.
- Fremgen, B. und Meinken, K.** (2004): Einsatz aufbereiteter MVA-Schlacke als Baustoff auf Deponien - noch möglich trotz DepVerwV? - Teil 2. *Müll und Abfall* 8, 364-372.
- Friege, H., Leuchs, W., Plöger, E., Cremer, S. und Obermann, P.** (1990): Bewertungsmaßstäbe für Abfallstoffe aus wasserwirtschaftlicher Sicht. *Müll und Abfall* 7, 413-426.
- Gartung, E. und Neff, H.K.** (2000): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponiebauwerke": GDA-Empfehlungen, E 2-33 - Kapillarsperren als Oberflächenabdichtungssystem (Entwurf). *Bautechnik*, 77(9), 629-634.
- Geiseler, J. und Kraß, K.** (1985): Das Langzeitverhalten von LD-Schlacken als Straßenbaustoff. *Straßen- und Tiefbau* 39, 18-25.
- Giurgea, V. und Hötzl, H.** (2004): Long-term investigations on the performance of alternative surface-sealing systems consisting of clay liners combined with capillary barriers. In W. Xiang, K. Czurda und H. Hötzl (Hrsg.): *New advances on contaminated sites and waste disposal*. ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Karlsruhe.
- Giurgea, V., Hötzl, H. und Gerlach, A.** (2004): Erste Ergebnisse des Lysimetermonitorings einer Asphaltabdichtung mit unterliegender Kapillarsperre, Hausmülldeponie Hohberg, Pforzheim. In T. Eglhoffstein, G. Burkhardt und K. Czurda (Hrsg.): *Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2004*. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Glass, R. J., Steenhuis, T. S. und Parlange, J.-Y.** (1988): Wetting front instability as a rapid and far-reaching hydrologic process in the vadose zone. *Journal of Contaminant Hydrology* 3, 207-226.
- Glass, R. J., Steenhuis, T. S. und Parlange, J.-Y.** (1989a): Wetting Front Instability, 1. Theoretical Discussion and Dimensional Analysis. *Water Resources Research* 25, 1187-1194.
- Glass, R. J., Steenhuis, T. S. und Parlange, J.-Y.** (1989b): Wetting Front Instability, 2. Experimental Determination of Relationships Between System Parameters and Two-Dimensional Unstable Flow Field Behavior in Initially Dry Porous Media. *Water Resources Research* 25, 1195-1207.
- Glass, R. J., Steenhuis, T. S. und Parlange, J.-Y.** (1989c): Mechanism for finger persistence in homogenous unsaturated, porous media: theory and verification. *Soil Science* 148, 60-70.
- Glass, R. J., Oosting, G. H. und Steenhuis, T. S.** (1989d): Preferential solute transport in layered homogenous sands as a consequence of wetting front instability. *Journal of Hydrology* 110, 87-105.
- Glass, R. J. und Nicholl, M. J.** (1996): Physics of gravity fingering of immiscible fluids within porous media: An overview of current understanding and selected complicating factors. *Geoderma* 70, 133-163.
- Glass, R. J. und Yarrington, L.** (2003): Mechanistic modeling of fingering, nonmonotonicity, fragmentation, and pulsation within gravity/buoyant destabilized two-phase/unsaturated flow. *Water Resources Research* 39, 7-1-7-10.
- Gräsele, W. und Horn, R.** (1998): Zum Einsatz numerischer Simulationen bei der Planung von Kapillarsperren als Oberflächenabdichtung am Beispiel der Deponie "Blockland" (Bremen). *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung*, 39, 199-205.

- Grech, H., Oliva, J., Scheibengraf, M. und Angerer, T.** (2002): Recyclingbaustoffe - Regelung der Umweltverträglichkeit. Endbericht erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Umweltbundesamt, Wien, 130 S.
- Gregersen, J., Jensen, K. H., Nyegaard, P., Anersen, L. J. und van Genuchten, M. T.** (1991): Full-scale field testing and numerical analysis of the capillary barrier concept. Global Agronomic Opportunities, 83rd Annual Meetings of the American Society of Agronomy, Crop Science Society of America and Soil Science Society of America in Denver, Colorado, 27. Oct. – 1. Nov., 10 S.
- Gregersen, J.** (1995): Experimental and numerical investigation of two-dimensional unsaturated flow in layered soils. Report for the Ph.D. degree at the Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, Series Paper 59, Lyngby, 129 S.
- Großmann, M., Stimm, A., und Mehlich, C.** (2000): Bautechnische Umsetzung einer Kapillarsperre als Oberflächenabdichtung am Beispiel der Deponie Penig (Modellstandort Sachsen). In Th. Egloffstein, G. Burkhardt und K. Czurda (Hrsg.): Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2000. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Harder, H. und Kramer C. R.** (2003): Baustoffrecyclate als Komponenten von Kapillarsperrensystemen. In: K. Witt und R. Katzenbach: 1. Symposium Umweltgeotechnik, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. Fachsektion Deponien und Altlasten, Weimar 2003, Schriftenreihe Geotechnik der Bauhaus-Universität Weimar, Heft 10, Band 1, 67-78.
- Harder, H. und Martin, H.** (2001). Recycled building materials as components for capillary barriers. Ltd. GREEN 3, 3rd International Symposium on Geotechnics Related to the European Environment, June 2000 in Berlin, Thomas Telford Ltd., London.
- Hartge, K. H.** (1966): Ein Haubenpermeameter zum schnellen Durchmessen zahlreicher Stechzylinderproben. Kulturtechnik und Flurbereinigung 7, 155-163.
- Hartge, K. H.** (1998): Faktoren für die Wirksamkeit einer Kapillarsperre. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 39, 194-198.
- Hartge, K. H. und Horn, R.** (1999): Einführung in die Bodenphysik. 3, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.
- Hiersche, E.-U. und Wörner, T.** (1990): Alternative Baustoffe im Bauwesen. Ernst&Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin.
- Hill, E. D. und Parlange, J.-Y.** (1972): Wetting Front Instability in Layered Soils. Soil Science Society of America Journal 36, 697-702.
- Hillel, D.** (1982): Introduction to Soil Physics. Academic Press, Orlando.
- Hillel, D. und Baker, R. S.** (1988): A Description of Fingering During Infiltration into Layered Soils. Soil Science 146, 51-56.
- Hillel, D.** (1998): Environmental Soil Physics. Academic Press, San Diego, California.
- Hillel, D.** (2004): Introduction to Environmental Soil Physics. Academic Press, San Diego, California.
- Hirner, A. V., Pestke, F. M. und Busche, U.** (1998): Konzepte zur Mobilitätsabschätzung von Schadstoffen in Boden- und Abfallmaterialien. Acta hydrochim hydrobiol 26, 226-229.
- Ho, C. K. und Webb, S. W.** (1998): Capillary barrier performance in heterogeneous porous media. Water Resources Research 34, 603-609.

- Hötzl, H. und Giurgea, V.** (2004): Oberflächenabdichtungen für Deponien - Stand der Technik. Hamburger Berichte - Deponietechnik 2004, 1-17.
- Hohberg, I., Müller, C. und Schießl, P.** (1996): Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe - Sachstandsbericht. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Beuth-Verlag, Berlin, 458 S.
- Hohberg, I., de Groot, G. J., Veen, A. M. H. und Wassing, W.** (1997). Development of a Leaching Protocol for Concrete. Houthem St. Gerlach. The International Conference for the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials, June 4 - 6, Houthem St. Gerlach, Niederlande.
- Holban, E.** (1997): Capillary Barrier - Modeling, Numerical Analysis and Computer-Simulation. Diss., Fakultät für Informatik der Universität der Bundeswehr München, Berichte aus der Mathematik, Shaker, Aachen, 125 S.
- Holfelder, T.** (2002): Temperaturbeeinflusste Transportprozesse in Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. Diss., Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt, Heft 125, 144 S.
- Holsteiner, R.** (1997): Praxisgerechte Prüfung des Auslagerverhaltens von industriellen Nebenprodukten und Recyclingbaustoffen. Straßenforschung Heft 468, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien, 137 S.
- Horn, R.** 2004 (2004): Empfehlungen zur Herstellung nicht schrumpfanfälliger mineralischer Dichtungen mit zusätzlicher tonmineralischer Wasserspeicherschicht (nstmin) für Deponieoberflächenabdichtungssysteme. Müll und Abfall 36, 67-71
- Hupe, K., Heyer, D., Becker, J. F., Traore, O., Koop, A., Noetzel, S. und Stegmann, R.** (2004): Varianten der Oberflächenabdichtung: Aufbau und Ergebnisse aus Versuchsfeldern. Hamburger Berichte - Deponietechnik 2004, 22, 16.
- Jelinek, D.** (1993): Probebau einer Kapillarsperre auf der Deponie "Am Stempel". Wasser & Boden, 242-264.
- Jelinek, D. und von der Hude, N.** (1994): Kapillarsperrensysteme auf der Deponie "Monte Scherbelino" - Vier Alternativen im Test. Wasser & Boden, 60-65.
- Jelinek, D.** (1997): Die Kapillarsperre als Oberflächenbarriere für Deponien und Altlasten - Langzeitstudien und praktische Erfahrungen in Feldversuchen. Diss., Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt, Heft 97, 141 S.
- Jelinek, D.** (1999): Bau und Betrieb der Kapillarsperre auf der Altlast "Am Stempel", Landkreis Marburg-Biedenkopf. In Akademie für Bauen und Umwelt e.V. (Hrsg.): Die Kapillarsperre - Innovative Oberflächenabdichtung für Deponien und Altlasten. Springer, Gotha.
- Johnson, C. A., Richner, G. A., Vitvar, T., Schittli, N. und Eberhard, M.** (1998): Hydrological and geochemical factors affecting leachate composition in municipal solid waste incinerator bottom ash. Journal of Contaminant Hydrology 33, 361-376.
- Kainzmaier, B.** (2003): Langzeitverhalten von karbonathaltigen Gasdränschichten bei der Durchströmung mit aggressiven Deponiegasen - Ergebnisse der Großsäulenversuche auf der Deponie Erbenschwag. BayForrest, Kostengünstige und qualitative Abdeckung von Deponien, 1-15.
- Karnuth, M.** (2003): Verhalten von Recycling-Materialien in der Umwelt: Labor- und Feldversuche. Diss. Fachbereich Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität, Mainz; http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=969939817&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=969939817.pdf, 131 S.

- Kämpf, M.** (2000): Fließprozesse in Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten - Grundlagen zur hydraulischen Bemessung. Diss. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Fachbereich Bauingenieurwesen der TU Darmstadt, Heft 109, 145 S.
- Kämpf, M., Holfelder, T. und Montenegro, H.** (1999): Eignung von Reststoffen in Abdichtungssystemen für Deponien und Altlasten. Forschungsvorhaben im Auftrag der Fritz und Margot Faudi-Stiftung, Endbericht, Technische Universität Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Fachgebiet Wasserbau, 77 S.
- Kämpf, M. und Montenegro, H.** (1997): On the performance of capillary barriers as landfill cover. *Hydrology and Earth System Science* 4, 925-929.
- Khire, M. V., Benson, C. H. und Bosscher, P. J.** (1997). Water balance of two earthen landfill caps in a semi-arid climate. *Proceedings of the Int. Containment Technol. Conf., 1997, St. Petersburg, Florida*, 252-261.
- Khire, M. V., Benson, C. H. und Bosscher, P. J.** (1999): Field data from a capillary barrier and model predictions with UNSAT-H. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125, 518-527.
- Khire, M. V., Benson, C. H. und Bosscher, P. J.** (2000): Capillary barriers: Design variables and water balance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126, 695-708.
- Kindsmüller, W.** (1999): Gleichwertigkeitsnachweis für Deponieoberflächenabdichtungssysteme unter besonderer Berücksichtigung von Kapillarsperren. In Akademie für Bauen und Umwelt e.V. (Hrsg.): *Die Kapillarsperre - Innovative Oberflächenabdichtung für Deponien und Altlasten*. Springer, Berlin.
- Kindsmüller, W. und Drexler, K.** (2002): Unterschiedliche Herangehensweise der Fachbehörden bei Altablagerungen und Deponien - Kostengünstige und qualitative Abdeckung von Deponien. Beitrag zur BayFORREST-Tagung, 24.10.2001.
- Krass, K., Brüggemann, M. und Görener, E.** (2004a): Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 2001 - Teil 1: Recycling-Baustoffe. *Straße & Autobahn* 4, 193-202.
- Krass, K., Brüggemann, M. und Görener, E.** (2004b): Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 2001 - Teil 2: Industrielle Nebenprodukte. *Straße & Autobahn* 5, 275-281.
- Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz** (1996): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. *BGBL I* S. 2705.
- Kung, K.-J. S.** (1990): Preferential Flow in a Sandy Vadose Zone: 2. Mechanism and Implications. *Geoderma* 46, 59-71.
- Kung, K.-J. S.** (1993): Soil Processes and chemical transport - Laboratory observation of funnel flow mechanism and its influence on solute transport. *Journal of Environmental Quality* 22, 91-102.
- Kuntze, H., Roeschmann, G. und Schwerdtfeger, G.** (1994): *Bodenkunde*. 5, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Kutilek, M. und Nielsen, D. R.** (1994): *Soil Hydrology*. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt.
- Kutzner, J.** (2003): Zuschläge/Gesteinskörnungen für Mörtel und Beton. In W. Scholz und W. Hiese (Hrsg.): *Baustoffkenntnis*. Werner Verlag, München. 207-245.
- KWTB - Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau** (2003): 3. Monitoring-Bericht Bauabfälle.

- LAGA - Länderarbeitsgemeinschaft Abfall** (1997): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln.
- LAGA - Länderarbeitsgemeinschaft Abfall** (2001): Einsatz von Abfällen im Deponiebau.
- LAGA - Länderarbeitsgemeinschaft Abfall** (2004): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen.
- LAGA ad hoc Arbeitsgruppe** (2000): Anlage zu Abfallwirtschaftsfakten 6 "Oberflächenabdeckungen und -abdichtungen".
- Lindgren, A.** (1996): Asphalt wear and pollution transport. *The Science of the Total Environment* 189/190, 281-286.
- Liu, Y., Steenhuis, T. S. und Parlange, J.-Y.** (1994): Formation and persistence of fingered flow fields in coarse grained soils under different moisture contents. *Journal of Hydrology* 159, 187-195.
- Liu, Y., Steenhuis, T. S. und Parlange, J.-Y.** (1994): Closed-form solution for finger width in sandy soils at different water contents. *Water Resources Research* 30, 949-952.
- Löwe, D.** (2003): Oberflächenabdichtung mit Kapillarsperre für die Zentraldeponie Emscherbruch. *Wasser, Luft und Boden* 9, 62-64.
- Lu, T. X., Biggar, J. W. und Nielsen, D. R.** (1994): Water movement in glass bead porous media 2. Experiments of infiltration and finger flow. *Water Resources Research* 30, 3283-3290.
- Matter, B. und Gschwind, N.** (1989): Abwasserreinigung bei der Sanierung der Sondermülldeponie Bonfol. Sonderdruck Nr.1183 aus *Gas-Wasser-Abwasser* 1989/7 des Schweizerischen Vereins des Gas- und Wasserfaches, 381-388.
- Matthes, B.** (2005): LAGA-Regelwerk "Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln" - Stand der Überarbeitung und Umsetzung in Norddeutschland. In: S. Melchior und K. Berger (Hrsg.): *Abfallverwertung bei der Rekultivierung von Deponien, Altlasten und Bergbaufolgelandschaften*. *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten*, Band 56, 33-35.
- Melchior, S.** (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Diss., Institut für Bodenkunde, Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg, *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten*, Band 22, 329 S.
- Melchior, S.** (1997): In-situ Studies of Performance of Landfill Caps (Compacted Soil Liners, Geomembranes, Geosynthetic Clay Liners, Capillary Barriers). *Land Contamination & Reclamation* 5, 209-216.
- Melchior, S.** (2000): Erfahrungen mit herkömmlichen und modifizierten mineralischen Oberflächenabdichtungen. http://www.umweltdaten.landsh.de/nuis/abfall/info/tagung12/melchior_manuskript.pdf.
- Melchior, S.** (2005): Funktionale Anforderungen an den Einsatz von Ersatzbaustoffen bei der Profilierung, Abdichtung und Rekultivierung von Deponien, Altlasten und Bergbauhalden. In S. Melchior und K. Berger (Hrsg.): *Abfallverwertung bei der Rekultivierung von Deponien, Altlasten und Bergbaufolgelandschaften*. *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten*, Band 56, 9-18.
- Melchior, S., Berger, K., Vielhaber, B. und Miehlich, G.** (1993). Ergebnisse der Langzeitüberwachung von Oberflächen-Dichtsystemen auf der Deponie Georgswerder (Hamburg). Schrift zur 2. Arbeitstagung der BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme, Bundesanstalt für Materialforschung, Berlin.

- Melchior, S., Berger, K., Vielhaber, B. und Miehlich, G.** (1994). Die Wirksamkeit unterschiedlicher Oberflächenabdichtungssysteme auf der Deponie Georgswerder. Status-Seminar zur Sicherung von Altlasten - Erfahrungen und Empfehlungen, Hamburg, 183-192.
- Melchior, S. und Miehlich, G.** (1987): Untersuchungen zum Wasserhaushalt mehrschichtiger Oberflächendichtsysteme auf der Deponie Georgswerder, Hamburg. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 55, 213-218.
- Melchior, S. und Steinert, B.** (2001): Die Kapillarsperre - Stand der Technik, Leistungsfähigkeit und Kosten. Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der TU Berlin Heft 29, 19-32.
- Melchior, S., Steinert, B., Burger, K. und Miehlich, G.** (1996): Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 37, 3-8.
- Merkel, T.** (2004): Statistik zur Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken. Report des FEhS-Instituts 1(11), 10.
- Mesters, K.** (2004): Raumbeständigkeit von Hausmüllverbrennungsaschen. Straße & Autobahn 7, 369-375.
- Metje, W.-R.** (2003): Keramische und mineralisch gebundene Baustoffe. In W. Scholz und W. Hiese (Hrsg.): Baustoffkenntnis. Werner Verlag, München, 37-112.
- Miyazaki, T.** (1988): Water Flow in Unsaturated Soil in Layered Slopes. Journal of Hydrology 102, 201-214.
- Miyazaki, T.** (1993): Water flow in soils. Marcel Dekker, New York.
- Mock, J., von der Hude, N. und Jelinek, D.** (1991): Kapillardichtungen für Deponieoberflächenabdichtungssysteme - Realisierungsmöglichkeiten. In K.-P. Fehlau und K. Stief (Hrsg.): Fortschritte der Deponietechnik 1991 - Planung, Öffentlichkeitsarbeit, Abdichtung und Betrieb. E-rich Schmidt Verlag, Stuttgart.
- Morris, C. E. und Stormont, J. C.** (1996): Numerical Simulations of Capillary Barrier Field Tests. Manuscript, 11 S.
- Morris, C. E. und Stormont, J. C.** (1997): Capillary Barriers and Subtitle D Covers: Estimating Equivalency. Journal Of Environmental Engineering 123, 3-10.
- Morris, C. E. und Stormont, J. C.** (1998): Evaluation of numerical simulations of capillary barrier field tests. Geotechnical and Geological Engineering 16, 201-213.
- Mualem, Y.** (1984): Prediction of the soil boundary wetting curve. Soil Science 137, 379-389.
- Mückenhausen, E.** (1982): Die Bodenkunde - und ihre geologischen, geomorphologischen, mineralogischen und petrologischen Grundlagen. Institut für Bodenkunde der Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität Bonn, DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
- Müller, A.** (2004): Aufbereitung und Verwertung von Bauabfällen - aktueller Stand und Entwicklungen. Ratgeber Abbruch und Recycling 2004. Stein-Verlag, Iffezheim.
- Nyhan, J. W., Hankonson, T. E. und Drennon, B. J.** (1990): A Water Balance Study of Two Landfill Cover Designs for Semiarid Regions. Journal of Environmental Quality 19, 281-288.
- Nyhan, J. W., Schofield, T. G. und Starmer, R. H.** (1997): A water balance study of four landfill cover designs varying in slope for semiarid regions. Journal of Environmental Quality 26, 1385-1392.

- O'Donnell, E., Ridky, R. W. und Schulz, R. K.** (1994): Control of Water Infiltration Into Near-Surface, Low-Level Waste-Disposal Units in Humid Regions. In: G. W. Gee und N. R. Wing (Hrsg.): In-Situ Remediation: Scientific Basis for Current and Future Technologies. 33rd Hanford Symposium on Health and the Environment. Part 1 Battelle Press, Columbus, Richland, USA, 295-324.
- Obermann, P. und Cremer, S.** (1992): Mobilisierung von Schwermetallen in Porenwässern von belasteten Böden und Deponien: Entwicklung eines aussagekräftigen Elutionsverfahrens (Materialien zur Ermittlung und Sanierung von Altlasten). Landesamt für Wasser und Abfall Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 127 S.
- Oldenburg, C. M. und Pruess, K.** (1993): On Numerical Modeling of Capillary Barriers. *Water Resources Research* 29, 1045-1056.
- Paige, G. B., Stone, J. J., Lane, L. J., Yakowitz, D. S. und Hakonson, T. E.** (1996): Evaluation of a Prototype Decision Support System for Selecting Trench Cap Designs. *Journal of Environmental Quality* 25, 127-135.
- Palm, A., Smitt-Tegge, J. D. und Sondermann, W.-D. (Hrsg.)** (2003): Leitfaden zur Deponiestilllegung. VKS Verband Kommunale Abfallwirtschaft und Stadtreinigung e.V. Köln; ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Hennef, Köln.
- Petzold, A.** (1992): Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe. 3. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig Stuttgart.
- Prinz, H.** (1997): Abriß der Ingenieurgeologie. Deutscher Verlag für Grundbaustoffindustrie GmbH, Stuttgart.
- Prühs, H., Gartung, E. und Quenzler, H.** (1996). Anforderungen und Qualitätssicherung für Entwässerungsmaterialien. Deponieseminar 1996, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 51, 323-347.
- Raats, P. A. C.** (1973): Unstable Wetting Fronts in Uniform and Nonuniform Soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 37, 681-685.
- Radde, C.-A.** (2001): Neue rechtliche Regelungen für Deponien und die Ablagerung von Abfällen auf Deponien - Neuerungen durch das Artikelgesetz, die Abfallablagereungsverordnung und die Deponieverordnung. In: T. Egloffstein, G. Burkhardt und K. Czurda (Hrsg.): Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2001. *Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis*, Band 122, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1-17.
- Rancon, D.** (1980). Application de la technique des barrière capillaires aux stockages en tranchées. *Underground disposal of radioactive wastes : proceedings otaniemi, Finland, 2.-6. Juli 1979*, 241-265. Aus: von der Hude, N. (1999): Kapillarsperren als Oberflächenabdichtung auf Deponien und Altlasten - Laborversuche und Bemessungsregeln. *Diss. Wasserbau-Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Fachgebiet Wasserbau, Technische Universität Darmstadt*, Band 41, 161 S.
- Reichert, D.** (1997): Einsatz von Reststoffen zur Herstellung von Oberflächenabdichtungssystemen. *Diss. Fachbereich Bauwesen, Universität GH Essen, Forum Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft Universität GH Essen*, 178 S.
- Ritsema, C. J. und Dekker, L. W.** (1994): How water moves in a water repellent sandy soil. 2. Dynamics of fingered flow. *Water Resources Research* 30, 2519-2532.
- Ritsema, C. J., Dekker, L. W., Nieber, J. L. und Steenhuis, T. S.** (1998): Modeling and field evidence of finger formation and finger recurrence in a water repellent sandy soil. *Water Resources Research* 34, 555-567.

- Ritsema, C. J. und Dekker, L. W.** (2000): Preferential flow in water repellent sandy soils: principles and modeling implications. *Journal of Hydrology* 231-232, 309-319.
- Rogosch, N.** (2003): Bitumen, Asphalt und Teerpech. In W. Scholz und W. Hiese (Hrsg.): *Baustoffkenntnis*. Werner Verlag, München, 549-604.
- Ross, B.** (1990): The Diversion Capacity of Capillary Barriers. *Water Resources Research* 26, 2625-2629.
- Scheffer, F. und Schachtschabel, P.** (1992): *Lehrbuch der Bodenkunde*. 13. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart.
- Schnatmeyer, C.** (1998): Alternative Oberflächenabdichtungssysteme für Halden und Altstandorte am Beispiel einer Gichtstaubdeponie. Diss. Lehrstuhl für Geologie der Universität Trier,
- Schofield, R. K.** (1935): The pF of the water in soil. *Transactions of the 3rd International Congress of Soil Science*, 2, 37-48.
- Scholz, W. und Hiese, W.** (2003): *Baustoffkenntnis*. Werner Verlag, München.
- Selker, J. S., Steenhuis, T. S. und Parlange, J.-Y.** (1992): Wetting Front Instability in Homogeneous Sandy Soils under Continuous Infiltration. *Soil Science Society of America Journal* 56, 1346-1350.
- Shafique, S. B., Walton, J. C., Gutierrez, N., Smith, R. W. und Tarquin, J.** (1998): Influence of carbonation on leaching cementitious wasteforms. *Journal Of Environmental Engineering* 124, 463-467.
- Siederer, W., von Bechtolsheim, C. und Nicklas, C.** (2003): Verwertung auf Deponien. *Müll und Abfall* 10, 536-541.
- Simunek, J., Vogel, T. und van Genuchten, M. T.** (1992): The SWMS_2D Code for Simulating Water Flow and Solute Transport in Two-Dimensional Variably Saturated Media. Version 1.1. Research report No. 126, U.S. Salinity Laboratory, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Riverside, California, 169 S.
- Simunek, J., Sejna, M. und van Genuchten, M. T.** (1999): The HYDRUS-2D Software Package for Simulating the Two-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 2.0, International Ground Water Modeling Center (IGWMC), U.S. Salinity Laboratory Agricultural Research Service U.S. Department of Agriculture, Riverside, California, 227 S.
- Smesrud, J. K. und Selker, J. S.** (2001): Effect of Soil-Particle Size Contrast on Capillary Barrier Performance. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 10, 885-888.
- Smolczyk, U.** (1996): *Grundbau-Taschenbuch*. Ernst & Sohn, Berlin.
- Spanka, G.** (2002). Umweltverträglichkeit von zementgebundenen Baustoffen. Beiträge zum 41. Forschungskolloquium des DAfStb am 11. und 12. Juli 2002, Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf, 67-80.
- Steenhuis, T. S., Parlange, J.-Y. und Kung, K.-J. S.** (1991): Comment on "The Diversion Capacity of Capillary Barriers" by Benjamin Ross. *Water Resources Research* 27, 2155-2156.
- Steinert, B., Melchior, S., Burger, K., Berger, K., Türk, M. und Miehlich, G.** (1996): Dimensionierung von Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. BMBF-Verbundvorhaben Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen – Teilvorhaben 39, Institut für Bodenkunde, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg.

- Steinert, B., Melchior, S., Burger, K., Türk, M. und Miehlich, G.** (1997): Design of capillary barriers for capping of landfills and contaminated sites. In H. August, U. Holzlöhner und T. Meggyes (Hrsg.): *Advanced Landfill Liner Systems*. London.
- Steinert, B.** (1999): Kapillarsperren für die Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten - Bodenphysikalische Grundlagen und Kipprinnenuntersuchungen. Diss. Institut für Bodenkunde, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg, *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten*, Band 45, 250 S.
- Stormont, J. C.** (1995): The effect of constant anisotropy on capillary barrier performance. *Water Resources Research* 31, 783-785.
- Stormont, J. C.** (1996): The effectiveness of two capillary barriers on a 10% slope. *Geotechnical and Geological Engineering* 14, 243-267.
- Stormont, J. C.** (1996): Anisotropic capillary barrier for waste site surface covers. *Environmental Sciences* 54, 1.
- Stormont, J. C. und Morris, C. E.** (1998): Method to Estimate water Storage Capacity of Capillary Barriers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124, 297-302.
- TA Abfall** (1991): Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA-Abfall) - Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/Physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen.
- TA Siedlungsabfall** (1993): Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen.
- Tami, D., Rahardjo, H. Y., Leong, E. C. und Fredlund, D. G.** (2004): Design and laboratory verification of a physical model of sloping capillary barrier. *Journal of Canadian Geotechnic* 41, 814-830.
- Tami, D., Rahardjo, H. Y., Leong, E. C. und Fredlund, D. G.** (2004): A physical model for sloping capillary barriers. *Geotechnical Testing Journal* 27, 173-183.
- van der Sloot, H. A.** (1998): Quick techniques for evaluating the leaching properties of waste materials: their relation to decisions on utilization and disposal. *Trends in analytical chemistry* 17, 298-310.
- van der Sloot, H. A.** (2002): Developments in testing for environmental impact assessment. *Waste Management* 22, 693-694.
- van Genuchten, M. T.** (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892-898.
- Vereecken, H.** (1992): Derivation and validation of pedotransfer functions for soil hydraulic properties. In M. T. van Genuchten und F. J. Leij (Hrsg.): *Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils*. University of California, Riverside.
- Visser, W. C.** (1966): Progress in the knowledge about the effect of soil moisture content on plant production. *Tech Bulletin* 45, Institution of Land Water Management, Wageningen, Niederlande.
- Vogel, H.-J., Tölke, J., Schulz, V. P., Krafczyk, M. und Roth, K.** (2005): Comparison of a Lattice-Boltzmann Modell, a Full-Morphology Model, and a Pore Network Model for Determination Pressure-Saturation Relationships. *Vadose Zone Journal*, 4, 380-388.
- von der Hude, N.** (1991): Kapillarsperren zum Abschirmen von Deponien gegen Sickerwasser. *Wasser & Boden* 12, 754-757.

- von der Hude, N., Jeklinek, D. und Kämpf, M.** (1994). Kapillarsperrensysteme für die Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. In: T. Egloffstein, G. Burkhardt, K. Czurda und H. Hötzl (Hrsg.): Oberflächenabdichtungssysteme für Deponien und Altlasten. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Band 34, 125-157.
- von der Hude, N. und Möckel, S.** (1997): Bau einer Kapillarsperre im Oberflächenabdichtungssystem der Deponie Breiner Moor. Müll und Abfall 11, 681-683.
- von der Hude, N., Katzenbach, R. und Neff, H.** (1999): Kapillarsperren als Oberflächenabdichtungssystem - Entwurf, Eignungsprüfung, Herstellung und Qualitätsmanagement. Geotechnik 22, 143-152.
- von der Hude, N., Melchior, S. und Möckel, S.** (1999). Construction of a Capillary Barrier in the Cover of the Breiner Moor Landfill. In: T. H. Christensen et al. (Hrsg.): Proceedings Sardinia '99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium October 4-8, Cagliari, Italy, 393-402.
- von der Hude, N.** (1999): Kapillarsperren als Oberflächenabdichtung auf Deponien und Altlasten - Laborversuche und Bemessungsregeln. Diss. Wasserbau-Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Fachgebiet Wasserbau, Technische Universität Darmstadt, Band 41, 161 S.
- von der Hude, N.** (2000): GDA-Empfehlungen, E 2-33 - Kapillarsperren als Oberflächenabdichtungssystem (Entwurf). In: E. Gartung und H. K. Neff: Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponiebauwerke". Bautechnik, 77(9), 629-634.
- Wagner, J.-F. und Schnatmeyer, C.** (2002): Test field study of different cover sealing systems for industrial dumps and polluted sites. Applied Clay Science 21, 99-116.
- Wagner, K.** (2002): Die Deponieverordnung. In: T. Egloffstein, G. Burkhardt und K. Czurda (Hrsg.): Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2002. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 125, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1-12.
- Wagner, K.** (2004): Die Deponieverwertungsverordnung. In: T. Egloffstein, G. Burkhardt und K. Czurda (Hrsg.): Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2004. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 132, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 313-320.
- Wagner, K.** (2005): Deponieverordnung und Deponieverwertungsverordnung - Praxiskommentar. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 127, Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Walker, I. und Tränkle, J.** (1993): Untersuchungen zur künftigen Verwertbarkeit von Bauschutt. LWA-Materialien, 7/93, Forschungsnetz Abfallwirtschaft und Altlasten des Landes Nordrhein-Westfalen, Verbundprojekt 2, Knoten 3, Düsseldorf.
- Wang, Z., Feyen, J. und Ritsema, C. J.** (1998): Susceptibility and predictability of conditions for preferential flow. Water Resources Research 34,
- Ward, A. L. und Gee, G. W.** (1997): Performance Evaluation of a Field-Scale Surface Barrier. Journal of Environmental Quality 26, 694-705.
- Weigel, P.** (1993): Die Eignung unterschiedlicher Sandmaterialien zum Aufbau von Kapillarsperrensystemen. Diplomarbeit am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie, Ludwig-Maximilians-Universität München, unveröffentlicht.
- Welp, G., Kim, R.-Y. und Brümmer, G. W.** (2001): Hintergrundwerte, Mobilität und Toxizität von Chrom (III) und Chrom (VI) in Böden. Ökotoxikologische Relevanz von Chrom (III) und Chrom (VI) in Kalkdüngemitteln, Böden und Pflanzen - Referate des Kolloquiums der landwirtschaftlichen Beratung Thomasdünger und der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken, 15. Januar 2001 in Bonn, Schriftenreihe der FehS, 9, 35-50.

- Werner** (2001): Schlußdiskussion und zusammenfassende Bewertung. Ökotoxikologische Relevanz von Chrom (III) und Chrom (VI) in Kalkdüngemitteln, Böden und Pflanzen - Referate des Kolloquiums der landwirtschaftlichen Beratung Thomasdünger und der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken, 15. Januar 2001 in Bonn, Schriftenreihe der FehS, 9, 89-96
- Wilsnack, T. und Erler, U.** (2005): Beurteilung des Langzeitverhaltens behandelter, schadstoffhaltiger Materialien unter Berücksichtigung des pH-stat-Verfahrens. Müll und Abfall 8, 416-424.
- Wohnlich, S.** (1990): Fließvorgänge in Kapillarsperrensystemen für Deponieabdichtungen. Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft 141, 330-338.
- Wohnlich, S.** (1991): Kapillarsperren - Versuche und Modellberechnungen. In: K. Czurda und H. Hötzl (Hrsg.): Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Band 15, 127 S.
- Wohnlich, S., Bauer, E., Braun, A. und Franke, C.** (1996). BayForrest Forschungsvorhaben Nr. F 54(F) - Anwendung von Recyclingmaterialien in Kapillarsperren für Deponieabdichtungen. Bay Forrest Berichtsheft 5 zum 4. Statusseminar am 24/25.11.1996, München, 227-232.
- Wohnlich, S. und Bauer, E.** (1999): Aufbau und Wirkungsweise der Kapillarsperre. In Akademie für Bauen und Umwelt e.V. (Hrsg.): Die Kapillarsperre - Innovative Oberflächenabdichtung für Deponien und Altlasten. Springer, Gotha.
- Wohnlich, S., Balz, K. und Barth, C.** (2000): Einzelfallnachweis für alternative Oberflächenabdichtungen am Beispiel der Kapillarsperre. Wasser & Boden 52, 18-18.
- Wohnlich, S.** (2003): Deponie "Am Lemberg", Untersuchungsbericht zum Großkipprinnenversuch. Ruhr-Universität Bochum, unveröffentlicht.
- Yao, T. und Hendrickx, J. M. H.** (1996): Stability of Wetting Front in Dry Homogeneous Soils under Low Infiltration Rates. Soil Science Society of America Journal 60, 20-28.
- Yao, T. M. und Hendrickx, J. M. H.** (2001): Stability analysis of the unsaturated water flow equation, 2. Experimental verification. Water Resources Research 37, 1875-1881.
- Yeh, T.-C. J., Guzman, A., Sristava, R. und Gagnard, P. E.** (1994): Numerical Simulation of the Wicking Effekt in Liner Systems. Ground Water 32, 2-11.
- Zischak, R.** (1997): Alternatives Oberflächenabdichtungssystem "Verstärkte mineralische Abdichtung mit untenliegender Kapillarsperre" - Wasserbilanz und Gleichwertigkeit. Diss., Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe, Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Band 47, 179 S.

Anhang A

Physikalische Materialcharakteristik: R-KS-0/3

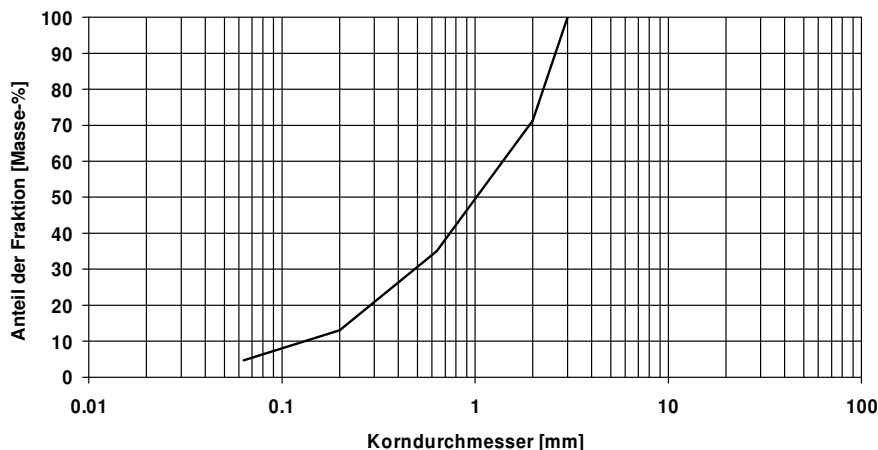


Abbildung A 1.1: Korngrößenverteilung von R-KS-0/3

Tabelle A 1.1: Materialeigenschaften von R-KS-0/3

Parameter	R-KS-0/3
Korndichte [g/cm ³]	2,55
Kornform	kubisch
Ungleichförmigkeit	10,53
lockerste Lagerung [g/cm ³]	1,3
dichteste Lagerung [g/cm ³]	1,5
kf gemessen [m/s]	5,77*10 ⁻⁵
Dichte bei kf-Messung [g/cm ³]	1,47
kf berechnet nach Hazen [m/s]	n. b., da U>5
kf berechnet nach Beyer [m/s]	1,6*10 ⁻⁴
Wasseraufnahmefähigkeit [%]	12

n. b. = nicht bestimmt

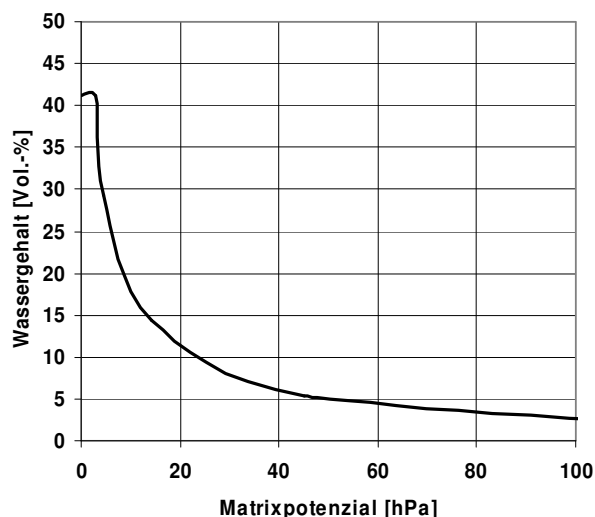


Abbildung A 1.2: Wasserretentionsbeziehung für R-KS-0/3

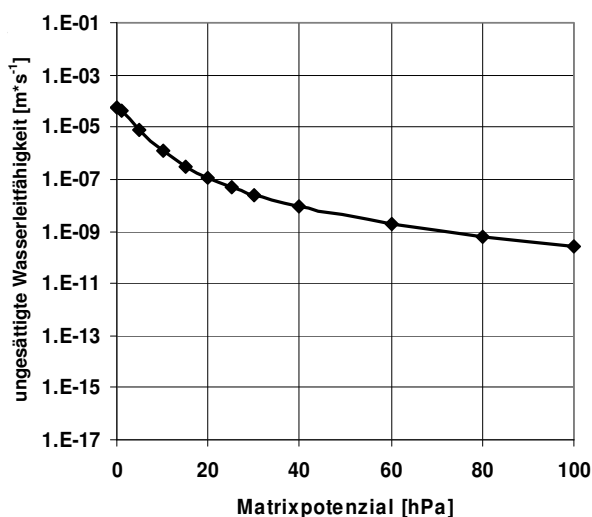


Abbildung A 1.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für R-KS-0/3

Tabelle A 1.2: van-Genuchten-Parameter von R-KS-0/3 (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 1.2)

van Genuchten-Parameter	θ_s [Vol.-%]	θ_r [Vol.-%]	α [1/cm]	n [-]
R-KS-0/3	42,36	1,69	0,18608	2,18534

Physikalische Materialcharakteristik: R-KS-0,71/2

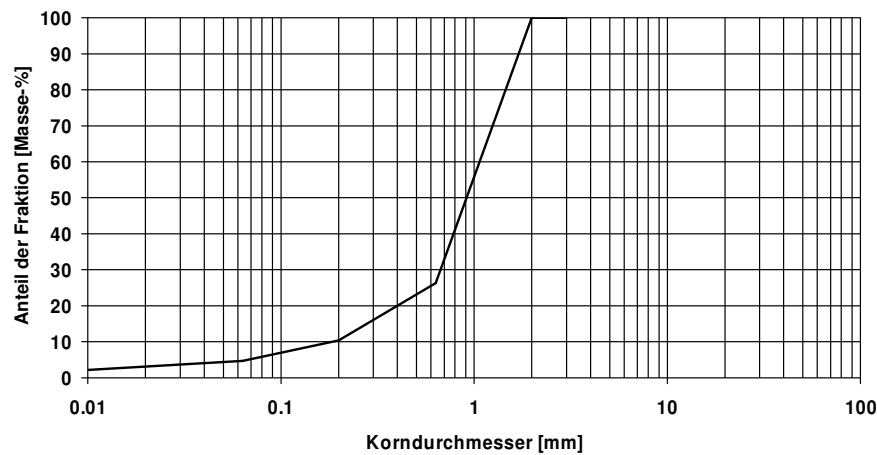


Abbildung A 2.1: Korngrößenverteilung von R-KS-0,71/2

Tabelle A 2.1: Materialeigenschaften von R-KS-0,71/2

Parameter	R-KS-0,71/2
Korndichte [g/cm ³]	2,3
Kornform	kubisch
Ungleichförmigkeit	6,25
lockerste Lagerung [g/cm ³]	n. b.
dichteste Lagerung [g/cm ³]	n. b.
kf gemessen [m/s]	$1,08 \cdot 10^{-4}$
Dichte bei kf-Messung [g/cm ³]	1,52
kf berechnet nach Hazen [m/s]	n. b., da $U > 5$
kf berechnet nach Beyer [m/s]	$3,53 \cdot 10^{-4}$
Wasseraufnahmefähigkeit [%]	12

n. b. = nicht bestimmt

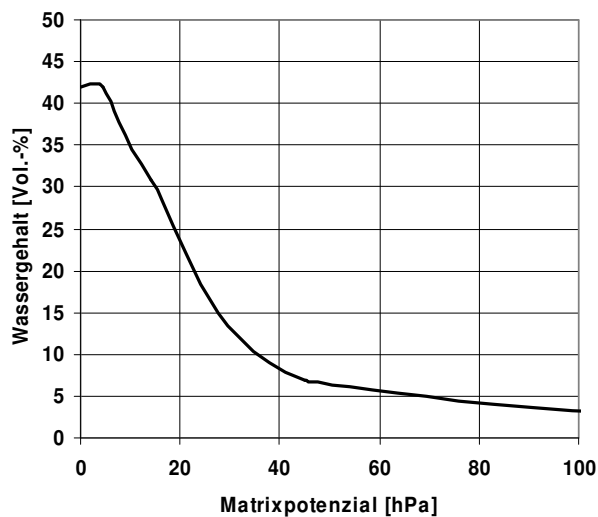


Abbildung A 2.2: Wasserretentionsbeziehung für R-KS-0,71/2

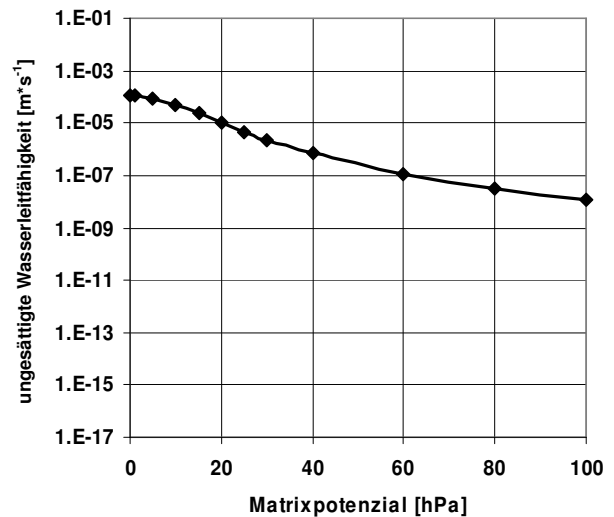


Abbildung A 2.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für R-KS-0,71/2

Tabelle A 2.2: van-Genuchten-Parameter von R-KS-0,71/2 (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 2.2)

van Genuchten-Parameter	θ_s [Vol.-%]	θ_r [Vol.-%]	α [1/cm]	n [-]
R-KS-0,71/2	42,37	3,50	0,05988	2,74522

Physikalische Materialcharakteristik: R-KS-Q-0/3

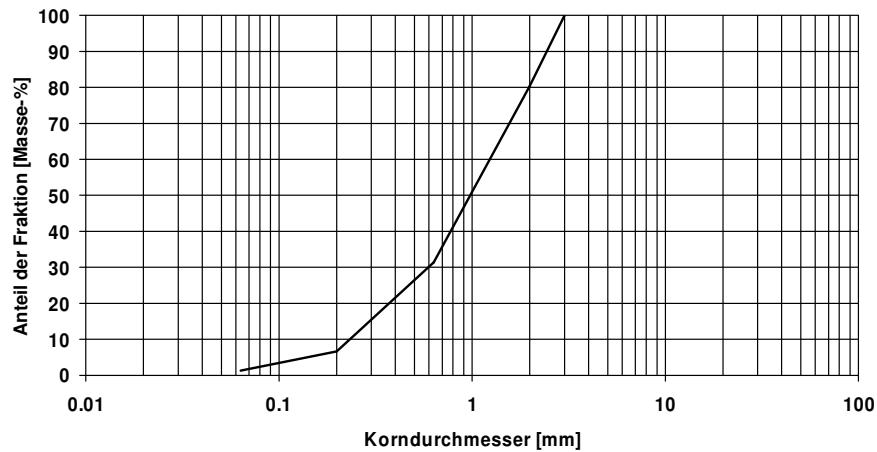


Abbildung A 3.1: Korngrößenverteilung von R-KS-Q-0/3

Tabelle A 3.1: Materialeigenschaften von R-KS-Q-0/3

Parameter	R-KS-Q-0/3
Korndichte [g/cm ³]	2,6
Kornform	kubisch
Ungleichförmigkeit	5,26
lockerste Lagerung [g/cm ³]	1,5
dichteste Lagerung [g/cm ³]	1,66
kf gemessen [m/s]	8,06*10 ⁻⁵
Dichte bei kf-Messung [g/cm ³]	1,56
kf berechnet nach Hazen [m/s]	n. b., da U>5
kf berechnet nach Beyer [m/s]	4,05*10 ⁻⁴
Wasseraufnahmefähigkeit [%]	10,5

n. b. = nicht bestimmt

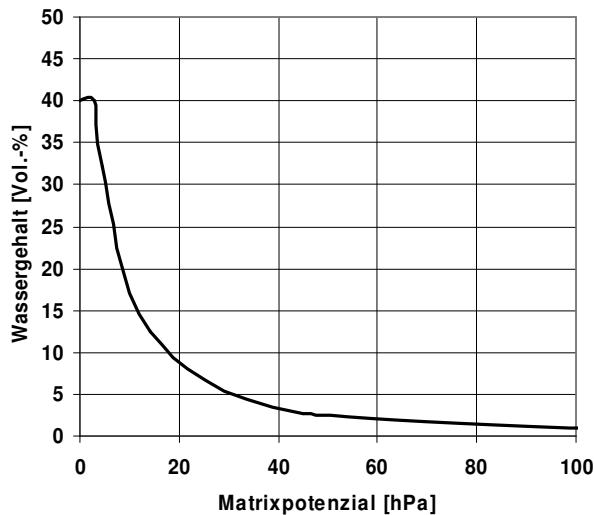


Abbildung A 3.2: Wasserretentionsbeziehung für R-KS-Q-0/3

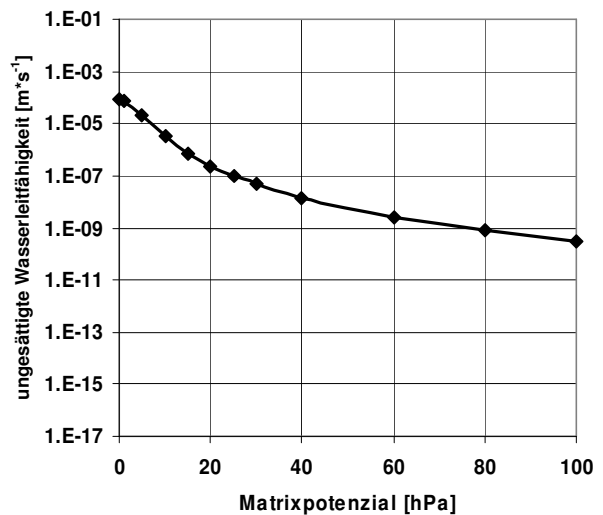


Abbildung A 3.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für R-KS-Q-0/3

Tabelle A 3.2: van-Genuchten-Parameter von R-KS-Q-0/3 (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 3.2)

van Genuchten-Parameter	θ_s [Vol.-%]	θ_r [Vol.-%]	α [1/cm]	n [-]
R-KS-Q-0/3	40,94	0,27	0,15274	2,47076

Physikalische Materialcharakteristik: R-KS-Q-0/2

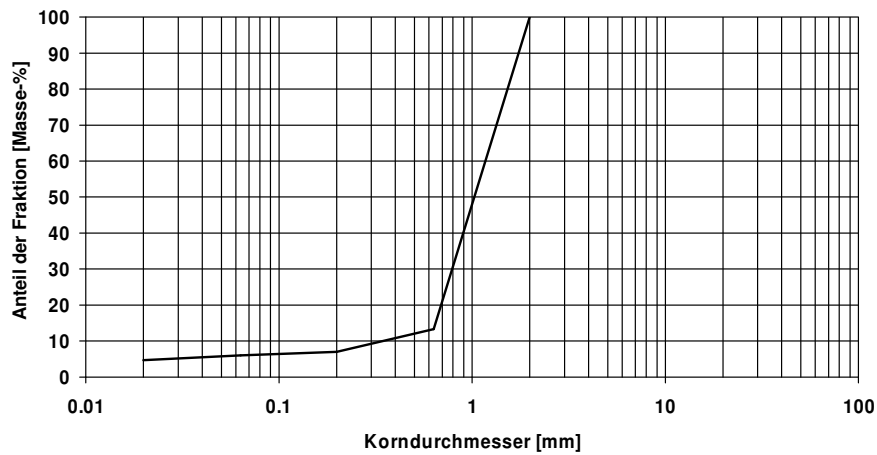


Abbildung A 4.1: Korngrößenverteilung von R-KS-Q-0/2

Tabelle A 4.1: Materialeigenschaften von R-KS-Q-0/2

Parameter	R-KS-Q-0/2
Korndichte [g/cm ³]	2,6
Kornform	kubisch
Ungleichförmigkeit	3,5
lockerste Lagerung [g/cm ³]	1,29
dichteste Lagerung [g/cm ³]	1,53
kf gemessen [m/s]	9,9*10 ⁻⁵
Dichte bei kf-Messung [g/cm ³]	1,41
kf berechnet nach Hazen [m/s]	1,86*10 ⁻³
kf berechnet nach Beyer [m/s]	1,44*10 ⁻³
Wasseraufnahmefähigkeit [%]	12,3

n. b. = nicht bestimmt

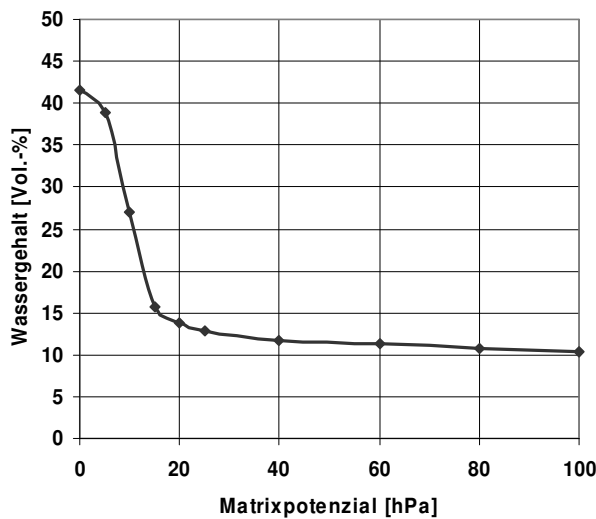


Abbildung A 4.2: Wasserretentionsbeziehung für R-KS-Q-0/2

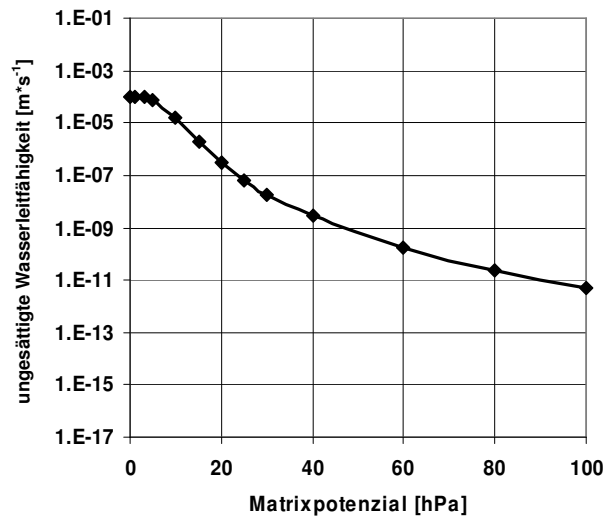


Abbildung A 4.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für R-KS-Q-0/2

Tabelle A 4.2: van-Genuchten-Parameter von R-KS-Q-0/2 (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 4.2)

van Genuchten-Parameter	θ_s [Vol.-%]	θ_r [Vol.-%]	α [1/cm]	n [-]
R-KS-Q-0/2	39,40	0,35	0,1395	5,80642

Physikalische Materialcharakteristik: N-KS-0/1(Rhein/Main)

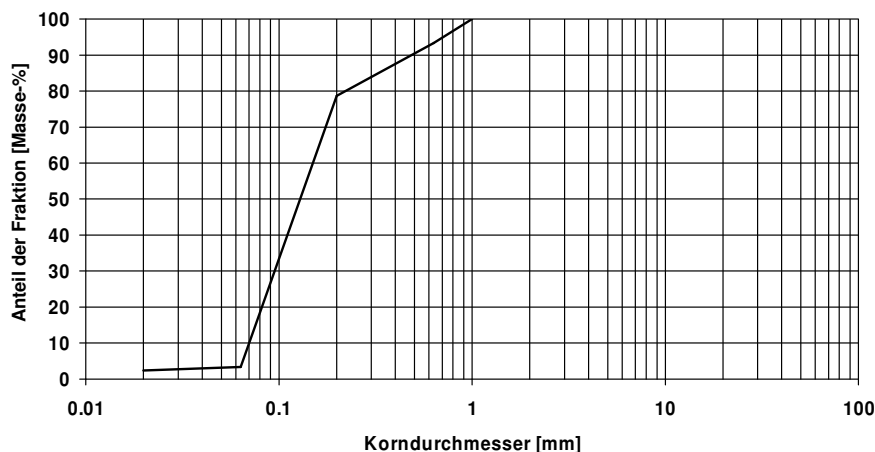


Abbildung A 5.1: Korngrößenverteilung von N-KS-0/1(Rhein/Main)

Tabelle A 5.1: Materialeigenschaften von N-KS-0/1(Rhein/Main)

Parameter	N-KS-0/1(Rhein/Main)
Korndichte [g/cm ³]	2,65
Kornform	n. b.
Ungleichförmigkeit	2,13
lockerste Lagerung [g/cm ³]	n. b.
dichteste Lagerung [g/cm ³]	n. b.
kf gemessen [m/s]	2,93*10 ⁻⁵
Dichte bei kf-Messung [g/cm ³]	1,46
kf berechnet nach Hazen [m/s]	7,42*10 ⁻⁵
kf berechnet nach Beyer [m/s]	6,4*10 ⁻⁵
Wasseraufnahmefähigkeit [%]	n. b.

n. b. = nicht bestimmt

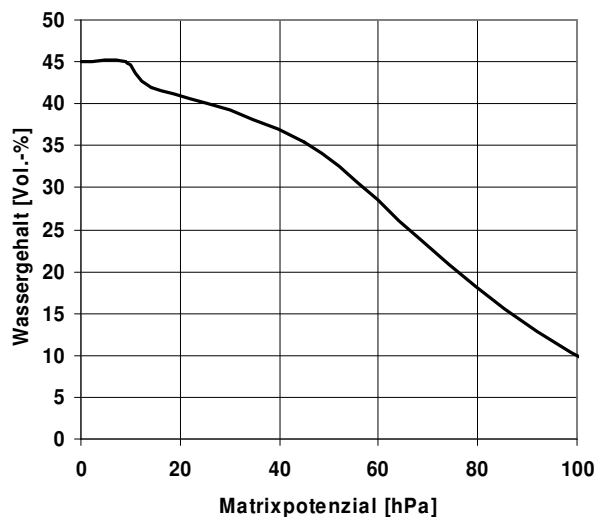


Abbildung A 5.2: Wasserretentions-
beziehung für N-KS-0/1(Rhein/Main)

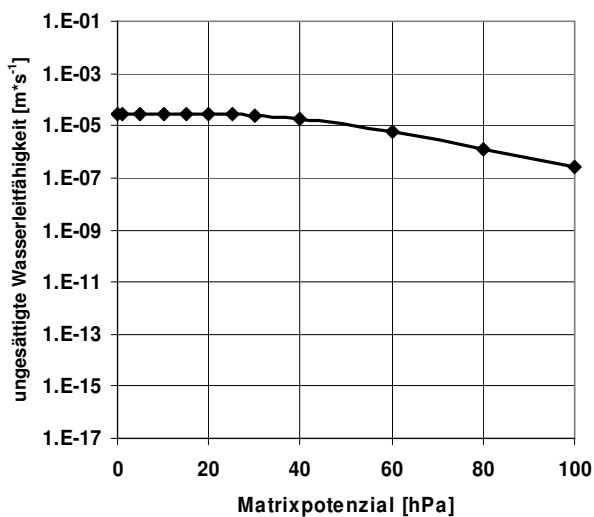


Abbildung A 5.3: Hydraulische Leitfähigkeit in
Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für
N-KS-0/1(Rhein/Main)

Tabelle A 5.2: van-Genuchten-Parameter von N-KS-0/1(Rhein/Main) (berechnet mit RETC mittels
Daten aus Abb. A 5.2)

van Genuchten- Parameter	θ_s [Vol.-%]	θ_r [Vol.-%]	α [1/cm]	n [-]
N-KS-0/1(R/M)	44	2	0,01734	4,6

Physikalische Materialcharakteristik: N-KS-0/2(Rhein/Main)

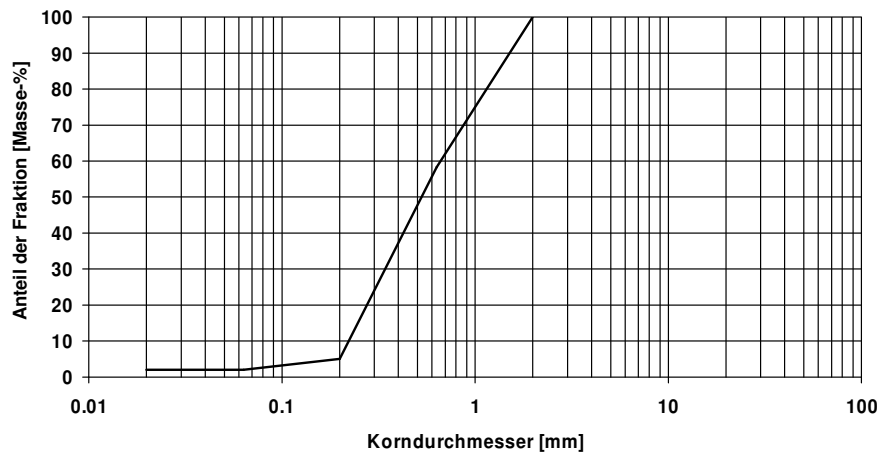


Abbildung A 6.1: Korngrößenverteilung von N-KS-0/2(Rhein/Main)

Tabelle A 6.1: Materialeigenschaften von N-KS-0/2(Rhein/Main)

Parameter	N-KS-0/2(Rhein/Main)
Korndichte [g/cm ³]	2,65
Kornform	n. b.
Ungleichförmigkeit	2,9
lockerste Lagerung [g/cm ³]	1,48
dichteste Lagerung [g/cm ³]	1,81
kf gemessen [m/s]	7,5*10 ⁻⁵
Dichte bei kf-Messung [g/cm ³]	1,64
kf berechnet nach Hazen [m/s]	6,68*10 ⁻⁴
kf berechnet nach Beyer [m/s]	5,76*10 ⁻⁴
Wasseraufnahmefähigkeit [%]	1

n. b. = nicht bestimmt

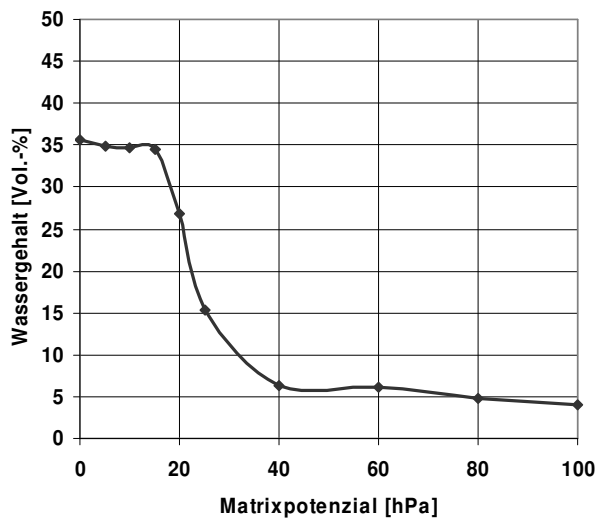


Abbildung A 6.2: Wasserretentionsbeziehung für N-KS-0/2(Rhein/Main)

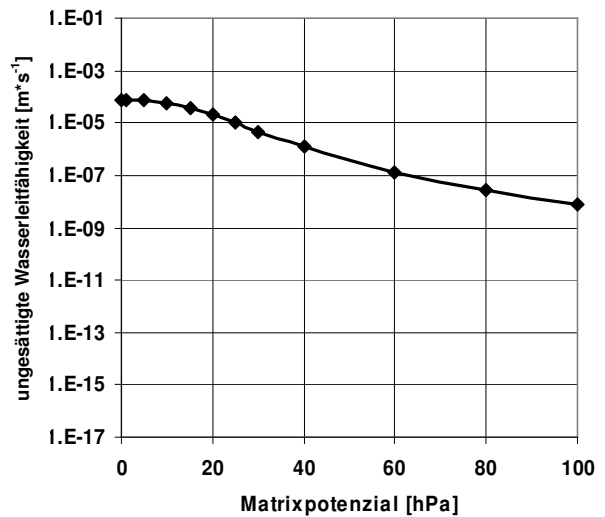


Abbildung A 6.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für N-KS-0/2(Rhein/Main)

Tabelle A 6.2: van-Genuchten-Parameter von N-KS-0/2(Rhein/Main) (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 6.2)

van Genuchten-Parameter	θ_s [Vol.-%]	θ_r [Vol.-%]	α [1/cm]	n [-]
N-KS-0/2(R/M)	36,34	4	0,04468	3,44614

Physikalische Materialcharakteristik: N-KS-0/2(Ems)

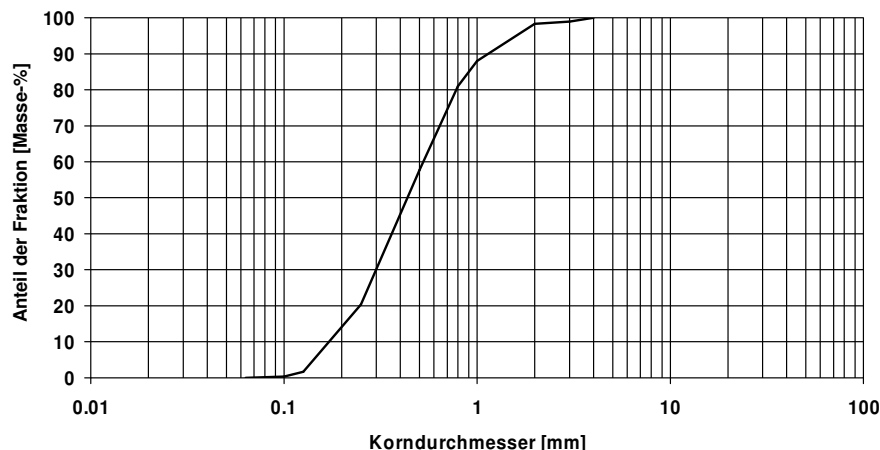


Abbildung A 7.1: Korngrößenverteilung von N-KS-0/2(Ems)

Tabelle A 7.1: Materialeigenschaften von N-KS-0/2(Ems)

Parameter	N-KS-0/2(Ems)
Korndichte [g/cm ³]	2,65
Kornform	n. b.
Ungleichförmigkeit	2,74
lockerste Lagerung [g/cm ³]	1,54
dichteste Lagerung [g/cm ³]	1,79
kf gemessen [m/s]	8,8*10 ⁻⁵
Dichte bei kf-Messung [g/cm ³]	1,6
kf berechnet nach Hazen [m/s]	3,76*10 ⁻⁴
kf berechnet nach Beyer [m/s]	3,24*10 ⁻⁴
Wasseraufnahmefähigkeit [%]	1

n. b. = nicht bestimmt

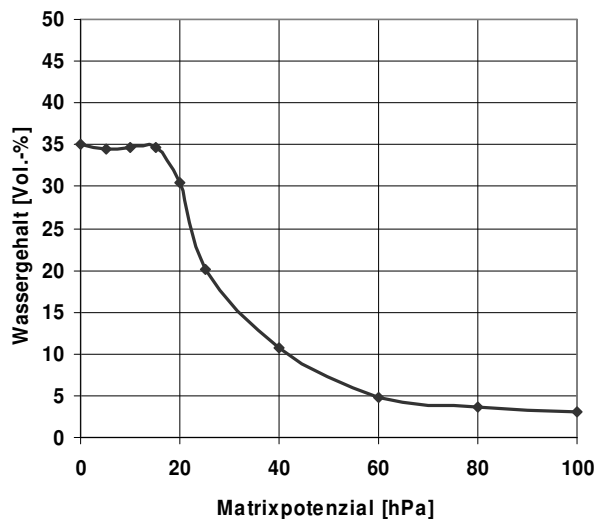


Abbildung A 7.2: Wasserretentionsbeziehung für N-KS-0/2(Ems)

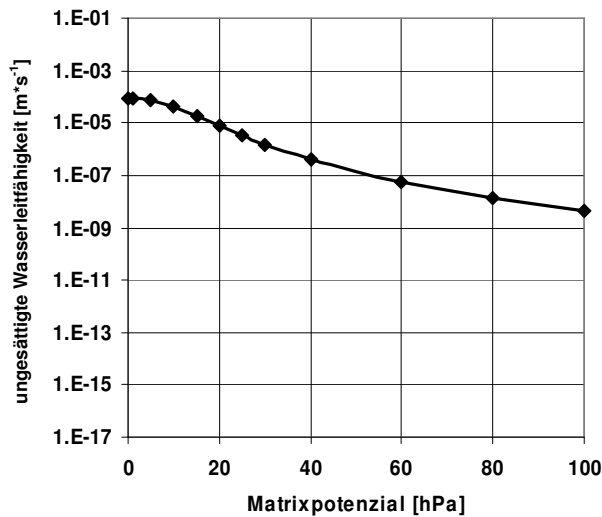


Abbildung A 7.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für N-KS-0/2(Ems)

Tabelle A 7.2: van-Genuchten-Parameter von N-KS-0/2(Ems) (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 7.2)

van Genuchten-Parameter	θ_s [Vol.-%]	θ_r [Vol.-%]	α [1/cm]	n [-]
N-KS-0/2(Ems)	39,94	4	0,06108	3,0309

Physikalische Materialcharakteristik: R-KB-2/11

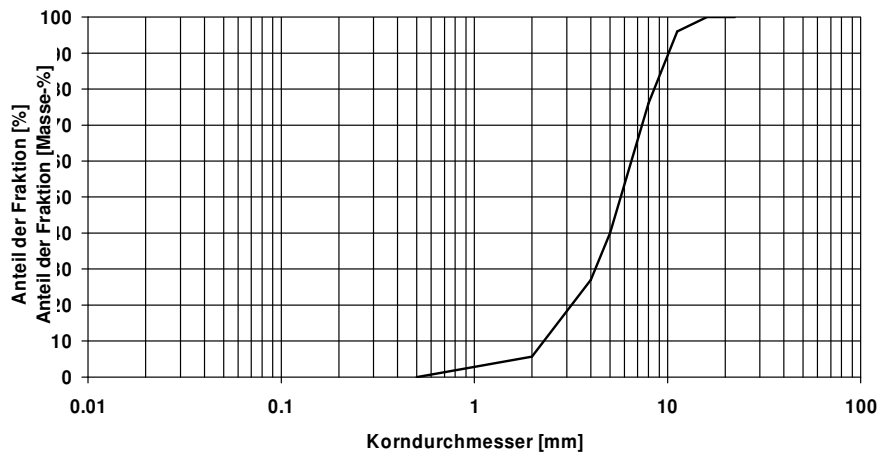


Abbildung A 8.1: Korngrößenverteilung von R-KB-2/11

Tabelle A 8.1: Materialeigenschaften von R-KB-2/11

Parameter	R-KB-2/11
Korndichte [g/cm ³]	2,4
Kornform	kubisch
Ungleichförmigkeit	2,75
lockerste Lagerung [g/cm ³]	n. b.
dichteste Lagerung [g/cm ³]	n. b.
kf gemessen [m/s]	n. b.
Dichte bei kf-Messung [g/cm ³]	n. b.
kf berechnet nach Hazen [m/s]	$6,68 \cdot 10^{-2}$
kf berechnet nach Beyer [m/s]	$3,61 \cdot 10^{-2}$
Wasseraufnahmefähigkeit [%]	8,58

n. b. = nicht bestimmt

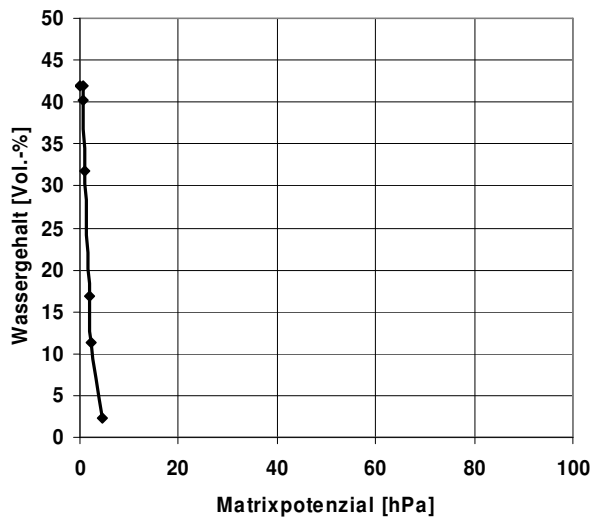


Abbildung A 8.2: Wasserretentions-
beziehung für R-KB-2/11

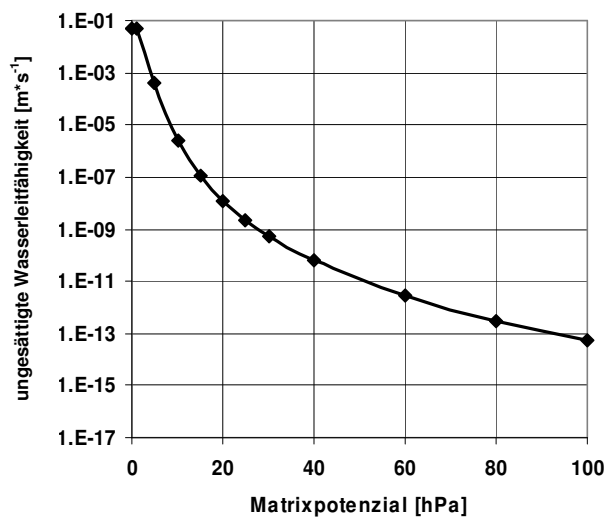


Abbildung A 8.3: Hydraulische Leitfähigkeit in
Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für R-KB-2/11

Tabelle A 8.2: van-Genuchten-Parameter von R-KB-2/11 (berechnet mit RETC mittels
Daten aus Abb. A 8.2)

van Genuchten- Parameter	θ_s [Vol.-%]	θ_r [Vol.-%]	α [1/cm]	n [-]
R-KB-2/11	42,49	2,32	0,67258	4,01345

Physikalische Materialcharakteristik: R-KB-5/22

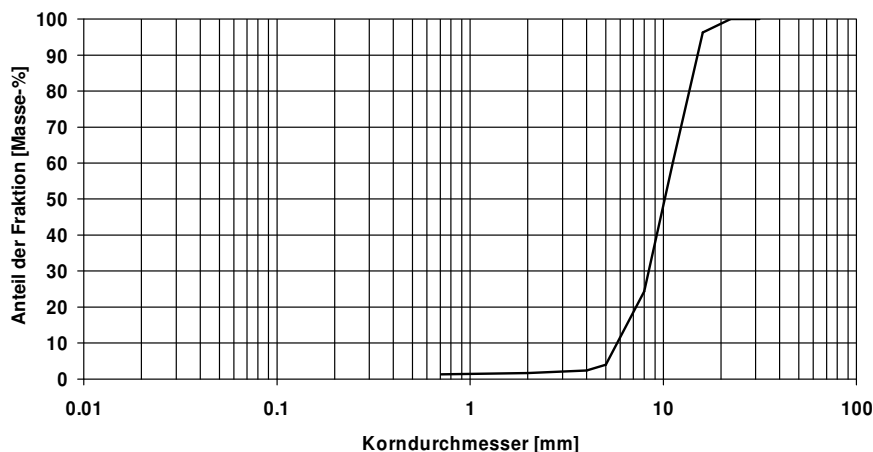


Abbildung A 9.1: Korngrößenverteilung von R-KB-5/22

Tabelle A 9.1: Materialeigenschaften von R-KB-5/22

Parameter	R-KB-5/22
Korndichte [g/cm ³]	2,4
Kornform	kubisch
Ungleichförmigkeit	1,85
lockerste Lagerung [g/cm ³]	n. b.
dichteste Lagerung [g/cm ³]	n. b.
kf gemessen [m/s]	n. b.
Dichte bei kf-Messung [g/cm ³]	n. b.
kf berechnet nach Hazen [m/s]	$3,97 \cdot 10^{-2}$
kf berechnet nach Beyer [m/s]	$5,63 \cdot 10^{-2}$
Wasseraufnahmefähigkeit [%]	9,2

n. b. = nicht bestimmt

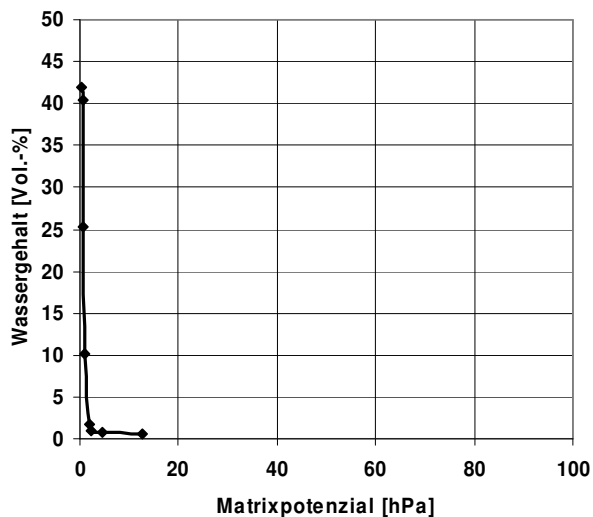


Abbildung A 9.2: Wasserretentions-
beziehung für R-KB-5/22

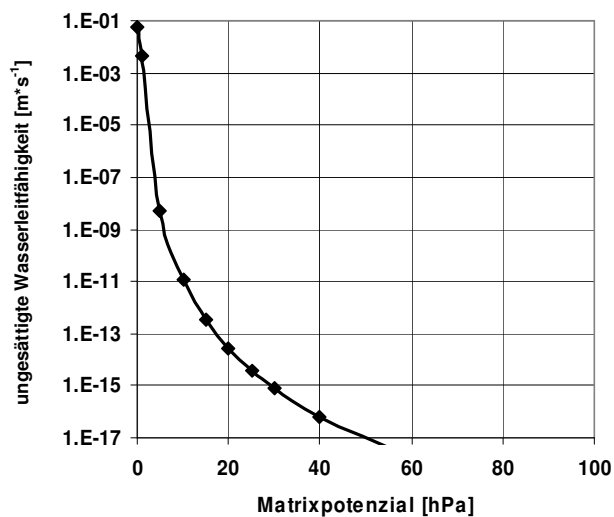


Abbildung A 9.3: Hydraulische Leitfähigkeit in
Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für R-KB-5/22

Tabelle A 9.2: van-Genuchten-Parameter von R-KB-5/22 (berechnet mit RETC mittels
Daten aus Abb. A 9.2)

van Genuchten- Parameter	θ_s [Vol.-%]	θ_r [Vol.-%]	α [1/cm]	n [-]
R-KB-5/22	43,4	0,6	1,2	5,5

Physikalische Materialcharakteristik: R-KB-Q-2/10

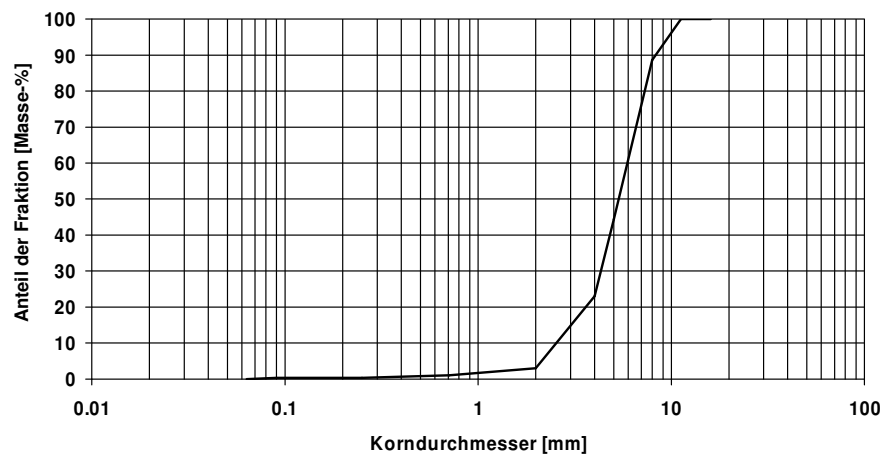


Abbildung A 10.1: Korngrößenverteilung von R-KB-Q-2/10

Tabelle A 10.1: Materialeigenschaften von R-KB-Q-2/10

Parameter	R-KB-Q-2/10
Korndichte [g/cm ³]	2,6
Kornform	kubisch
Ungleichförmigkeit	1,97
lockerste Lagerung [g/cm ³]	n. b.
dichteste Lagerung [g/cm ³]	n. b.
kf gemessen [m/s]	n. b.
Dichte bei kf-Messung [g/cm ³]	n. b.
kf berechnet nach Hazen [m/s]	$1,15 \cdot 10^{-1}$
kf berechnet nach Beyer [m/s]	$3,25 \cdot 10^{-2}$
Wasseraufnahmefähigkeit [%]	3,7

n. b. = nicht bestimmt

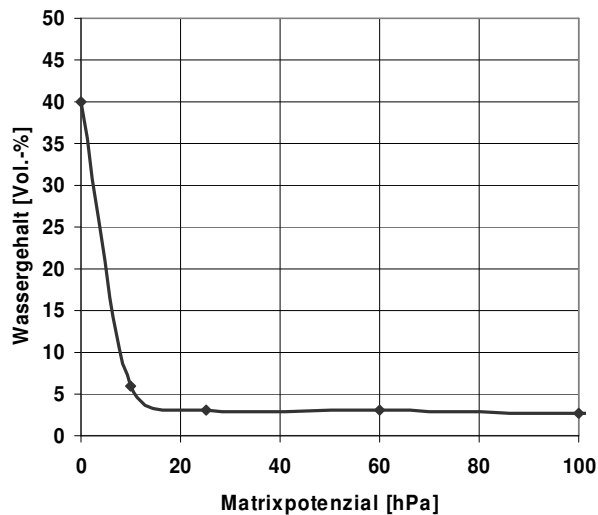


Abbildung A 10.2: Wasserretentionsbeziehung für R-KB-Q-2/10

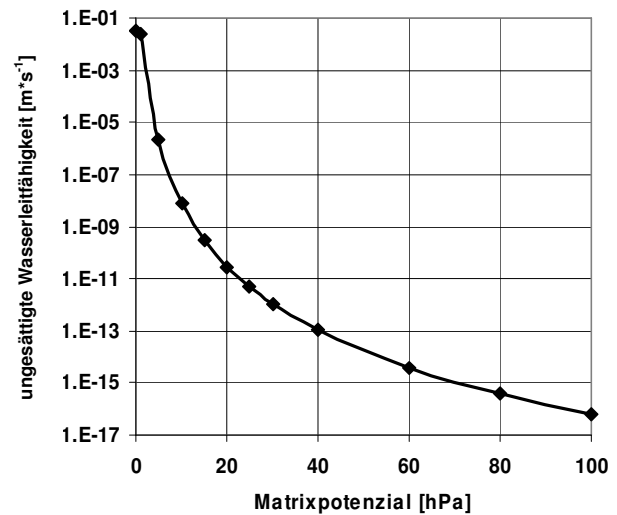


Abbildung A 10.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für R-KB-Q-2/10

Tabelle A 10.2: van-Genuchten-Parameter von R-KB-Q-2/10 (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 10.2)

van Genuchten-Parameter	θ_s [Vol.-%]	θ_r [Vol.-%]	α [1/cm]	n [-]
R-KB-Q-2/10	42,33	2,03	0,62312	5,06069

Physikalische Materialcharakteristik: N-KB-2/5

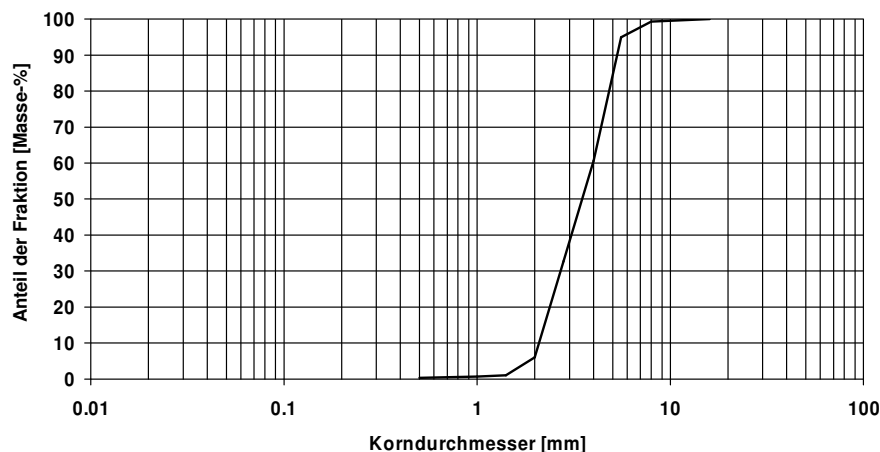


Abbildung A 11.1: Korngrößenverteilung von N-KB-2/5

Tabelle A 11.1: Materialeigenschaften von N-KB-2/5

Parameter	N-KB-2/5
Korndichte [g/cm ³]	2,65
Kornform	n. b.
Ungleichförmigkeit	1,91
lockerste Lagerung [g/cm ³]	n. b.
dichteste Lagerung [g/cm ³]	n. b.
kf gemessen [m/s]	n. b.
Dichte bei kf-Messung [g/cm ³]	n. b.
kf berechnet nach Hazen [m/s]	5,12*10 ⁻²
kf berechnet nach Beyer [m/s]	4,85*10 ⁻²
Wasseraufnahmefähigkeit [%]	n. b.

n. b. = nicht bestimmt; die nötigen Materialeigenschaften von N-KB-2/5 wurden durch eine mineralogische Untersuchung bestimmt

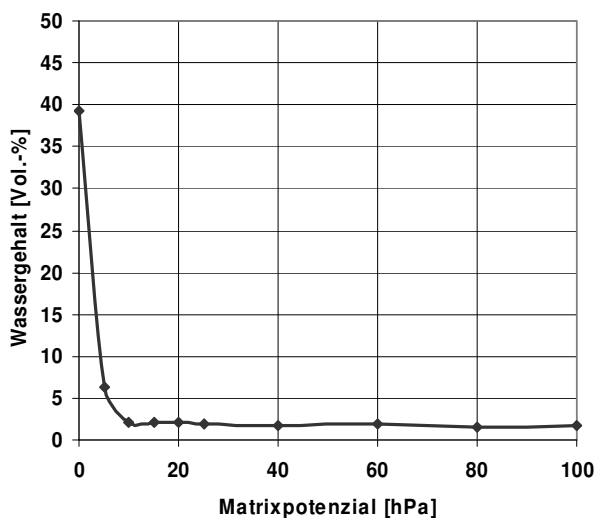


Abbildung A 11.2: Wasserretentionsbeziehung für N-KB-2/5

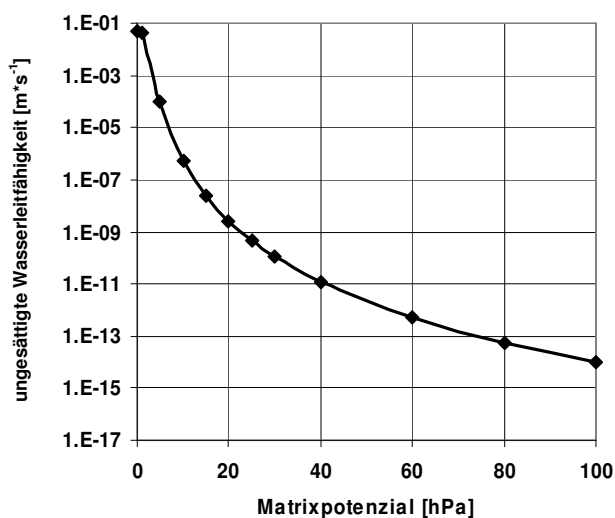


Abbildung A 11.3: Hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial für N-KB-2/5

Tabelle A 11.2: van-Genuchten-Parameter von N-KB-2/5 (berechnet mit RETC mittels Daten aus Abb. A 11.2)

van Genuchten-Parameter	θ_s [Vol.-%]	θ_r [Vol.-%]	α [1/cm]	n [-]
N-KB-2/5	39,83	1	0,41717	4,79358

Anhang B

Mineralogische Untersuchungen

Tabelle B 1: Charakterisierung des Natur-Kapillarschichtmaterials N-KS-0/2(Ems) anhand stereomikros-kopischer und polarisationsmikroskopischer Untersuchungen (aus STRÜBEL 2003)

Gestein bzw. Mineralart	Anzahl der Körner	Eigenporosität [Vol.-%]	Wasserlöslichkeit	Quellfähigkeit	Eigenspannungsfreiheit	Kornstabilität
Quarz	95	keine	unlöslich	keine	frei	sehr stabil
Feldspäte	5	keine	unlöslich	keine	frei	stabil

Tabelle B 2: Charakterisierung des Natur-Kapillarblockmaterials N-KB-2/5 anhand stereomikros-kopischer und polarisationsmikroskopischer Untersuchungen (aus STRÜBEL 2003)

Gestein bzw. Mineralart	Anzahl der Körner	Eigenporosität [Vol.-%]	Wasserlöslichkeit	Quellfähigkeit	Eigenspannungsfreiheit	Kornstabilität
Quarz	553	keine	unlöslich	keine	frei	sehr stabil
Quarzit	33	keine	unlöslich	keine	frei	sehr stabil
Granit	149	1	unlöslich	keine	frei	stabil
Feldspäte	111	keine	unlöslich	keine	frei	stabil
Vulkanische Gesteinspartikel (Quarzporphyr)	74	5	unlöslich	keine	frei	stabil
Schiefer	63	2	unlöslich	keine	frei	stabil
Sandstein	14	4	unlöslich	keine	frei	weniger stabil
Siltstein	3	8	unlöslich	?	frei	nicht stabil

Anhang C

Feststoffgehalte der Kapillarsperrenmaterialien

Tabelle C 1: Gegenüberstellung der Feststoffuntersuchung der Kapillarschichtmaterialien mit den LAGA-Zuordnungswerten für Recyclingbaustoffe (1997)

Chemische Parameter Feststoff	LAGA Zuordnungswerte Feststoff für Recyclingbaustoffe	Material					
		R-KS-0/3	R-KS-0,71/2	R-KS-Q-0/3	R-KS-Q-0/2	N-KS-0/2 (Ems)	N-KS-0/2 (R/M)
Arsen [mg*kg ⁻¹]	20	6,1	6,2	2,9	11	1,34	n. n.
Blei [mg*kg ⁻¹]	100	39,6	32,6	21	14,7	1,1	1,7
Cadmium [mg*kg ⁻¹]	0,6	0,13	0,27	n. n.	0,07	0,04	n. n.
Chrom [mg*kg ⁻¹]	50	138,7	83,1	211,3	26	1	1,5
Kupfer [mg*kg ⁻¹]	40	16,4	18,1	22,6	21,6	1,5	1,0
Nickel [mg*kg ⁻¹]	40	95,7	63,4	205,9	33,4	0,9	1,7
Thallium [mg*kg ⁻¹]	-	0,13	0,15	n. n.	0,03	n. b.	n. n.
Quecksilber [mg*kg ⁻¹]	0,3	n. b.	n. b.	n. b.	n. n.	0,016	n. n.
Zink [mg*kg ⁻¹]	120	76,4	82	57,1	49,3	2,7	2,4

n.n. = nicht nachweisbar; n. b. = nicht bestimmt

Tabelle C 2: Gegenüberstellung der Feststoffuntersuchung der Kapillarblockmaterialien mit den LAGA-Zuordnungswerten für Recyclingbaustoffe (1997)

Chemische Parameter Feststoff	LAGA Zuordnungswerte Feststoff für Recyclingbaustoffe	Material		
		R-KB-2/11	R-KB-5/22	R-KB-Q-2/10
Arsen [mg*kg ⁻¹]	20	4,4	4,9	1,7
Blei [mg*kg ⁻¹]	100	42,8	21,2	11,3
Cadmium [mg*kg ⁻¹]	0,6	0,17	0,13	n. n.
Chrom [mg*kg ⁻¹]	50	416,2	350,7	480,8
Kupfer [mg*kg ⁻¹]	40	32,5	16,7	34
Nickel [mg*kg ⁻¹]	40	297,9	227,2	373,9
Thallium [mg*kg ⁻¹]	-	0,13	0,12	n. n.
Quecksilber [mg*kg ⁻¹]	0,3	n. b.	n. b.	0,15
Zink [mg*kg ⁻¹]	120	91,1	55	69,5

n.n. = nicht nachweisbar; n. b. = nicht bestimmt

Anhang D

Quellcode des regressionsanalytischen Modellansatzes zur Bestimmung der potenziellen lateralen Dränkapazität

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>

void indexx(int, double[], int[]);

void indexx(n, arrin, indx)
int n,indx[];
double arrin[];
{
  int l,j,ir,indxt,i;
  double q;
  /* Nach Num. Recs.: Die Werte in arrin werden nicht geaendert;
  die Indizes in indx werden so vergeben, dass arrin[ind]
  fuer i=1,2,...,n in aufsteigender Reihenfolge steht. */
  for (j=1;j<=n;j++) indx[j]=j;
  l=(n >> 1) + 1;
  ir=n;
  for (;;)
  {
    if (l > 1)
      q=arrin[(indxt=indx[--l])];
    else
      {
        q=arrin[(indxt=indx[ir])];
        indx[ir]=indx[1];
        if (--ir == 1)
          {
            indx[1]=indxt;
            return;
          }
      }
    i=l;
    j=l << 1;
    while (j <= ir)
      {
        if (j < ir && arrin[indx[j]] < arrin[indx[j+1]]) j++;
        if (q < arrin[indx[j]])
          {
            indx[i]=indx[j];
            j += (i=j);
          }
        else j=ir+1;
      }
    indx[i]=indxt;
  }
}

```

```

main()
{
int i, n, j;
int ind[500];
double x[500],y[500];
double xa, ya, rqmin, sumx, sumy, sxx, sxy, syy, rsq, b , meanx, meany;
double xam, yam;
scanf("%i %f\n", &n, &rqmin);
/*printf("%i %f", n, rqmin);*/
for( i=1; i<=n; i++)
{
scanf("%f%f\n",&x[i], &y[i]);
/* printf("%f %f\n", x[i], y[i]);*/
}
indexx(n,x,ind);
for(i = 2; i<=n-1; i++)
{
sumx = 0;
sumy = 0;
sxx = 0;
sxy = 0;
syy = 0;

for (j=1; j<=i; j++)
{
xa = x[ind[n-j]];
ya = y[ind[n-j]];
sumx = sumx + xa;
sumy = sumy + ya;
/* sxx = sxx + xa*xa;
sxy = sxy + xa*ya;
syy = syy + ya*ya;*/
}
b = (sumy -sumx)/i;
meanx = sumx/i;
meany = sumy/i;

for(j=1;j<=i;j++)
{
xam = x[ind[n-j]] - meanx;
yam = y[ind[n-j]] - meany;
/* printf("%f %f\n", xam, yam);*/
sxx =sxx + xam*xam;
sxy = sxy + xam*yam;
syy = syy + yam*yam;
}
rsq = sxy*sxy/(sxx*syy);
/* rsq = (sxy -sumx*sumy/i)*(sxy - sumx*sumy/i);
rsq = rsq/((sxx - sumx*sumx/i)*(sxy - sumy*sumy/i));*/
printf("%i %f %f \n", i, b, rsq);
}
}

```

