

**Die Wirksamkeit der Kapillarsperre als
Deponieoberflächenabdichtung
Feldversuche auf der Deponie Bayreuth**

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

Christoph Barth

15. September 2003

1. Berichtstatter: Prof. Dr. Stefan Wohnlich
2. Berichtstatter: Prof. Dr. Reinhard Nießner

Tag der mündlichen Prüfung: 22.12.2003

Kurzfassung

Die grundsätzliche Wirkungsweise der Kapillarsperre ist bereits aus zahlreichen Laborversuchen bekannt. Darüber hinaus gibt es auch schon praktische Anwendungen, vor allem zur Abdichtung von Altlasten und Bauschuttdeponien. In der vorliegenden Arbeit wurde die Eignung der Kapillarsperre zur Oberflächenabdichtung einer Hausmülldeponie untersucht.

Nachdem durch Laboruntersuchungen die prinzipielle Eignung der ausgewählten Materialien bestätigt wurde, erfolgte die Prüfung der Kapillarsperrenwirkung der Materialkombination anhand mehrwöchiger Großrinnenversuche mit stufenförmig gesteigerter Belastung und zwei unterschiedlichen Neigungen. Die daraus resultierenden Dränkapazitäten zeigten, dass die ausgewählte Materialkombination über wirksame Kapillarsperreigenschaften verfügt.

Für die Langzeituntersuchung unter natürlichen Witterungsverhältnissen wurden auf der Deponie Bayreuth unter baupraktischen Bedingungen zwei Versuchsfelder mit integrierten Großlysimetern mit Hangneigungen von 10 % und 26 % errichtet. Für die Auswertung der Lysimeterabflüsse standen drei Messjahre zur Verfügung. Der Oberflächenabfluss war nach der Ausbildung einer durchgehenden Pflanzendecke vernachlässigbar. Er überschritt nur bei überdurchschnittlichen Niederschlagsjahren 2 % des gesamten Jahresniederschlags. Die Evapotranspiration lag in den Jahren 2000 und 2001 zwischen 55 % und 65 %. Im sehr niederschlagsreichen Jahr 2002 sank sie allerdings erheblich unter 50 %. Der überwiegende Teil der Lysimeterabflüsse wurde von der Kapillarschicht abgeführt. Lediglich bei sehr starken Niederschlagsereignissen traten auch im Kapillarblock nennenswerte Abflussmengen auf. Der Wirkungsgrad des Gesamtsystems übertraf, abgesehen vom flachen Versuchsfeld im sehr niederschlagsreichen Messjahr 2002, immer 95 % des Jahresniederschlags. Der Wirkungsgrad des steilen Versuchsfeldes betrug erwartungsgemäß noch deutlich mehr als 95 %.

Um zu prüfen, ob sich der versuchstechnische Aufwand für die Bestimmung der Effektivität einer Kapillarsperre durch numerische Simulationen verringern lässt, wurde versucht die gemessenen Ergebnisse mit Simulationsmodellen für die Wasserhaushaltsschicht und die Kapillarsperre nachzurechnen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine realitätsnahe Simulation grundsätzlich möglich ist. Die Messergebnisse waren jedoch nur mit durch inverse Modellierung bestimmten Parametern für die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit zuverlässig vorhersagbar. Aufgrund der großen Sensitivität der Modelle führten Berechnungen mit durch Standardmethoden bestimmten Parametern zu unplausiblen Ergebnissen. Die Effektivität der Kapillarsperre wurde damit überschätzt. Von einem Verzicht auf Großrinnenversuche zugunsten der numerischen Modellierung muss deshalb abgeraten werden.

Obwohl die Kapillarsperre an sich nicht gasdicht ist, kann durch den zusammenhängenden Wasserfilm über der Grenze zum Kapillarblock die Gaswegsamkeit stark eingeschränkt werden. In Laborversuchen wurde gezeigt, dass die Gasdurchlässigkeit in einer wasserführenden Kapillarsperre gering ist. Gasmessungen auf den Versuchsfeldern ergaben, dass die Entgasung an der Oberfläche im Vergleich zu den nicht mit der Kapillarsperre abgedeckten Bereichen erheblich reduziert wurde. Geringe Deponiegasaustritte sind jedoch, vor allem unter ungünstigen Luftdruckeinwirkungen, noch messbar.

Nach den vorliegenden Untersuchungen ist die Kapillarsperre als kostengünstige und sichere Alternative, vor allem für die unter Umständen risseempfindliche mineralische Abdichtung gut geeignet. Für Deponieklasse I kann sie als einfaches Dichtungssystem eingesetzt werden. Für Deponieklasse II, wie sie in der untersuchten Deponie Bayreuth vorliegt, wird die Kombination mit einem weiteren Dichtungselement, z. B. einer Kunststoffdichtungsbahn, empfohlen.

Abstract

The principles of capillary barriers are well known from many laboratory studies. A limited number of large-scale applications are known, in particular for the sealing of past pollution and demolition waste. This study investigates the suitability of a capillary barrier for the sealing of a municipal landfill.

Laboratory tests have shown the fundamental applicability of the selected materials. The sealing effect of the material combination as a capillary barrier was examined in a large scale tipping trough under step increasing hydraulic load and two differential slopes. The materials showed drain capacities suitable for an effective capillary barrier.

For a long-term study under natural weather conditions, two experimental fields with integrated large scale lysimeters and slopes of 10 % and 26 % have been constructed on site at the landfill. The lysimeter data of three subsequent years were used for the analysis. After the growth of a closed cover of vegetation the surface runoff was negligible. Only in wet years it exceeded 2 % of the annual precipitation. In 2000 and 2001 the evapotranspiration was between 55 % and 65 %. In the very wet year 2002, however, it was significantly below 50 %. The predominant part of the lysimeter runoff was drained by the capillary layer. Only heavy precipitation caused a relevant drain into the capillary block. Except for the very wet year 2002 the effectiveness of the whole system exceeded 95 % of the annual precipitation. As expected the efficiency of the steeper lysimeter clearly surpassed 95 %.

In order to verify the possibility to reduce the effort for the experimental determination of the efficacy of the capillary barrier by numerical simulations, it was tried to calculate the measured results by numerical models for the water balance layer and the capillary barrier. The results show that in principle a realistic prediction is possible. However, a reliable prediction of the measured results can only be achieved by using parameters that were calculated by inverse modeling for the unsaturated hydraulic conductivity. Because of the high sensitivity of the model, calculations with parameters predicted by standard methods did not lead to plausible results, but overestimated the effectiveness of the capillary barrier. Therefore it is not advised to substitute large scale tipping experiments by numerical modeling.

Although the capillary barrier is not gas proof, the closed water coating above the boundary to the capillary block largely restricts the movement of gas. Laboratory experiments resulted in very low permeability for gas through an aqueous capillary barrier. Measurements at the experimental fields showed that the capillary barrier significantly reduces the emission of gas at the surface compared to the non-sealed landfill surface. However, under adverse air pressure conditions low gas emissions are still measurable.

Considering the present investigations, the capillary barrier is a competitive and secure alternative especially for the fracture-prone clay liner. For demolition waste it can be used as single sealing. For municipal waste, as in the underlying landfill of Bayreuth, the combination with an additional sealing element, e. g. a synthetic liner is recommended.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
Abstract	4
Inhaltsverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	11
Danksagungen	13
1 Einleitung	15
1.1 Zielsetzung	15
1.2 Standortbeschreibung	16
1.2.1 Die Deponie Heinersgrund	16
1.2.2 Geologie und Hydrogeologie	16
1.2.3 Klimatische Bedingungen	17
1.2.4 Gegenwärtige Sicherungsmaßnahmen an der Deponie	18
1.3 Rechtslage	19
2 Theoretische Grundlagen	21
2.1 Begriffsdefinitionen	21
2.2 Wasserbilanz	21
2.3 Wasser in teilgesättigten porösen Medien	23
2.3.1 Die Kapillarität des Porenwassers	23
2.3.2 Potentiale in der ungesättigten Zone	24
2.3.3 Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Matrixpotential	24
2.3.4 Wasserbewegung	25
2.4 Funktionsprinzip der Kapillarsperre	26
2.5 Stand der Forschung	28
2.6 Vorteile der Kapillarsperre	30
3 Voruntersuchung der Kapillarsperrenmaterialien	31
3.1 Materialparameter	31
3.1.1 Korngrößenverteilung	31
3.1.2 Filterstabilität	32
3.1.3 Korndichte	32
3.1.4 Lagerungsdichte	32
3.1.5 Gesättigte hydraulische Durchlässigkeit	33
3.1.6 Saugspannungs-Wassergehaltsbeziehung	33
3.1.6.1 Kapillarer Aufstieg	33
3.1.6.2 Wasserretentionsverhalten	34
3.1.7 Ungesättigte hydraulische Durchlässigkeit	34
3.2 Direkte Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Durchlässigkeit	36
3.2.1 Versuchsaufbau	37
3.2.2 Versuchsergebnis	37

3.3	Großrinnenversuch	40
3.3.1	Dimensionierung des Großrinnenversuchs	41
3.3.2	Messdatenerfassung	42
3.3.3	Bewässerung	42
3.3.4	Dränkapazität	43
4	Bau der Versuchsfeldanlage	46
4.1	Konstruktion der Versuchsfelder	46
4.1.1	Untergrund der Versuchsfeldstandorte	46
4.1.2	Einrichtung des Versuchsfelduntergrundes	46
4.1.3	Kapillarblock	47
4.1.4	Geotextil	48
4.1.5	Kapillarschicht	48
4.1.6	Wasserhaushaltsschicht	49
4.1.7	Wurzelboden	50
4.1.8	Lysimeter	51
4.1.9	Abmessungen der Versuchsfeldanlage	53
4.2	Messdatenerfassung	55
4.2.1	Abflussmessung	55
4.2.2	Klimamessung und Wasserhaushalt	56
4.2.3	Datenerfassung und -speicherung	59
5	Ergebnisse der Feldversuche	60
5.1	Niederschlagsmessungen	60
5.2	Abflussmessungen	61
5.2.1	Oberflächenabfluss	61
5.2.2	Kapillarschichtabfluss	65
5.2.3	Kapillarblockabfluss	65
5.3	Verlauf von extremen Niederschlags- und Abflussereignissen	66
5.4	Wasserbilanz	68
5.5	Übertragbarkeit der Ergebnisse der Wasserbilanz auf andere Standorte	69
5.6	Setzungsvermessung	69
6	Modellierung des Dichtungssystems	71
6.1	Simulation der Wasserhaushaltsschicht	71
6.1.1	Randbedingungen für das Modell	71
6.1.1.1	Meteorologische Daten	71
6.1.1.2	Schichtaufbau	72
6.1.2	Simulationsergebnisse	73
6.2	Simulation der Kapillarsperre	75
6.2.1	Simulation des Großrinnenversuches	76
6.2.1.1	Modellaufbau	76
6.2.1.2	Simulationsergebnisse	77
6.2.2	Simulation der Feldversuche	79

6.2.2.1	Modellaufbau	79
6.2.2.2	Simulationsergebnisse	80
7	Untersuchungen zur Gasdurchlässigkeit	82
7.1	Laborversuche zur Gasdurchlässigkeit	82
7.2	Feldmessungen zur Gasdurchlässigkeit	83
7.2.1	Durchführung der Gasmessungen	83
7.2.2	Messergebnisse	85
8	Das Verhalten der Kapillarsperre im Bereich von Durchdringungen	87
8.1	Versuchsaufbau	87
8.2	Messergebnisse	88
9	Zusammenfassung	91
10	Literaturverzeichnis	94
11	Anhang	101
11.1	Skript zum Errechnen der VAN-GENUCHTEN-Parameter	101
11.2	Fotodokumentation der Baumaßnahmen	103
11.3	Abmessungen der Versuchsfelder	106
11.4	Atmosphärische Messungen	107
11.4.1	Tagesmittelwerte der Lufttemperatur	107
11.4.2	Tagesmittelwerte der Globalstrahlung	107
11.4.3	Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit	108
11.4.4	Tagesmittelwerte des Luftdrucks	108
11.5	Ergebnisse der Setzungsvermessung	109
11.5.1	Setzungen Versuchsfeld 1	109
11.5.2	Setzungen Versuchsfeld 2	110
11.6	Messungen der Gasemission auf den Versuchsfeldern	113
11.7	Auf den Versuchsfeldern eingesetzte Feldmessgeräte	119
11.8	Kalibrierung der Durchflusszähler	119

Abbildungsverzeichnis

1	Lageplan der Deponie Heinersgrund und der beiden Versuchsfelder.	16
2	Luftaufnahme der Deponie Heinersgrund aus dem Jahr 1999 während des Baus der Versuchsfeldanlage.	17
3	Langjährige Mittelwerte aus den Jahren 1961-1990 der Monatssummen des Niederschlags und der Monatsmittel der Lufttemperatur für Bayreuth	18
4	Aufbau von Deponieoberflächenabdichtungen nach TA-Siedlungsabfall (aus BERGS et al. 1997).	20
5	Günstige Kornverteilungskurven für Kapillarschicht (KS) und Kapillarblock (KBS) (aus BAUER 2001).	27
6	Schematische Ansicht der Schichtgrenze zwischen Kapillarschicht (oben) und Kapillarblock (unten) mit teilweise wassererfüllten Poren.	28
7	Summenlinien der Kornverteilung der Kapillarsperrenmaterialien.	31
8	Aufstiegskurve der Wassergehalts-Saugspannungsbeziehung.	34
9	Saugspannungs-Wassergehaltsbeziehung für das Kapillarschichtmaterial KS aus dem Entwässerungsversuch und für das Kapillarblockmaterial KB aus dem Säulenversuch mit angepassten VAN GENUCHTEN-Funktionen.	35
10	Nach VAN GENUCHTEN ermittelter Verlauf der ungesättigten hydraulischen Durchlässigkeit für das Kapillarschichtmaterial KS und das Kapillarblockmaterial KB. . . .	36
11	Versuchsaufbau zur Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. . . .	37
12	Verlauf der Wassersättigung und der Saugspannungen während des Versuches.	38
13	Modellanpassung an die gemessenen Werte für Tensiometer 1 mit $\alpha = 5,0 \text{ 1/m}$ und $n = 2,1$	39
14	Modellanpassung an die gemessenen Werte für Tensiometer 2 mit $\alpha = 5,0 \text{ 1/m}$ und $n = 2,1$	39
15	Die verwendete Großversuchsrinne mit 6,0 m Länge.	40
16	Skizze des Schichtaufbaus mit Lage der Messfühler am Beispiel der Neigung von 10 %.	42
17	Häufigkeiten der Tagesmengen von Niederschlag und Durchsickerung durch die Wasserhaushaltsschicht als Ergebnis der HELP-Modellierung.	43
18	Dichtwirkung der Kapillarsperre im Versuchstank bei 10 % Neigung.	44
19	Dichtwirkung der Kapillarsperre im Versuchstank bei 25 % Neigung.	44
20	Kornsummenverteilung des eingebauten Kapillarblockmaterials.	48
21	Kornsummenverteilung des eingebauten Kapillarschichtmaterials.	49

22	Kornsummenverteilung von Proben aus der Wasserhaushaltsschicht.	50
23	pF-Kurven verschiedener Proben der Wasserhaushaltsschicht.	51
24	Aufsicht auf ein Versuchsfeld.	52
25	Längsschnitt durch Versuchsfeld 1 mit integriertem Lysimeter (Sollmaße).	54
26	Das Abflusssystem im Messcontainer.	56
27	Mast mit Schalensternanemometer, Sternpyranometer, Gehäuse mit Lufttemperatur-/Luftfeuchtemessung und Windrichtungsgeber	56
28	Nach RICHTER (1995) korrigierte Tages- und Monatssummen der Niederschläge für den gesamten Versuchszeitraum.	60
29	Oberflächenabfluss von Lysimeter 1.	62
30	Kapillarschichtabfluss von Lysimeter 1.	62
31	Kapillarblockabfluss von Lysimeter 1.	62
32	Oberflächenabfluss von Lysimeter 2.	63
33	Kapillarschichtabfluss von Lysimeter 2.	63
34	Kapillarblockabfluss von Lysimeter 2.	63
35	Abflüsse beim Starkniederschlagsereignis vom 20.03.02 aus Lysimeter 1.	66
36	Abflüsse beim Starkniederschlagsereignis vom 20.03.02 aus Lysimeter 2.	67
37	Kumulierte Abflüsse der HELP-Simulation im Vergleich zu den Messwerten für Lysimeter 1.	74
38	Kumulierte Abflüsse der HELP-Simulation im Vergleich zu den Messwerten für Lysimeter 2.	75
39	Aufbau des finite Element Netzes aus 7814 Elementen mit 4123 Knoten für die Simulation des Großrinnenversuchs mit 10 % Neigung (3-fach überhöht).	76
40	Simulierte und gemessene Abflüsse aus dem Kapillarblock für den Versuchsaufbau mit 10 % Neigung.	77
41	Simulierte und gemessene Abflüsse aus dem Kapillarblock für den Versuchsaufbau mit 25 % Neigung.	78
42	Simulierte relative Wassersättigung in der Kapillarsperre bei 10 % Hangneigung nach 65 Versuchstagen (3-fach überhöht).	78
43	Simulierte und gemessene Abflüsse aus der Kapillarsperre von Lysimeter 1.	80
44	Simulierte und gemessene Abflüsse aus der Kapillarsperre von Lysimeter 2.	81
45	Simulierte und gemessene Abflüsse aus der Kapillarsperre von Lysimeter 2 mit 10 cm tiefer Setzungsmulde in der Kapillarblockoberfläche.	81
46	Großsäulenanlage zur Bestimmung der Gasdurchlässigkeit.	82

47	Differenzdruck und intrinsische Permeabilität (untere Grafik) in Abhängigkeit vom Wassergehalt in der Kapillarschicht (obere Grafik).	84
48	Versuchstank mit eingebauter Kapillarsperre und 26 % Neigung.	87
49	Einbau des Durchdringungskörpers in die Kapillarsperre	88
50	Durchgang durch die Kapillarsperre für den Versuchsaufbau ohne Durchdringungskörper.	89
51	Durchgang durch die Kapillarsperre für den Versuchsaufbau mit Durchdringungskörper.	89
52	Versuchsfelduntergrund mit Sandschutzschicht für die Lysimeterbasis.	103
53	Basis des Lysimeters aus sandrauher Kunststoffdichtungsbahn.	103
54	Feinarbeiten zum Angleichen der Kapillarblockoberfläche.	103
55	Aufbringen des Kapillarschichtmaterials auf das Geotextil.	104
56	Entwässerungsgraben mit Dränrohr für die Kapillarschicht.	104
57	Angleichen der Kapillarschichtoberfläche.	104
58	Aufbringen der Rekultivierungsschicht, im Vordergrund die Lysimetergrenze.	105
59	Oberfläche von Lysimeter 1 mit kiesgefülltem Entwässerungsgraben kurz nach der Fertigstellung.	105

Tabellenverzeichnis

1	Haude-Faktoren f zur Berechnung der potentiellen Verdunstung von Gras für mittlere Tageswerte.	22
2	Gütekriterien für die Auswahl von Kapillarsperrenmaterialien (aus BAUER 2001). . .	27
3	Vergleich der in Deutschland betriebenen Lysimeterversuche mit Kapillarsperrensystemen und langjährigen Messreihen.	29
4	Ermittelte Kenngrößen für die beiden Kapillarsperrenmaterialien.	33
5	VAN GENUCHTEN-Parameter der Kapillarsperrenmaterialien.	35
6	Aufbau des Großbrinnenversuches.	41
7	Abmessungen der Versuchsfelder	53
8	Korrekturkoeffizienten für die Niederschlagsmessung in freier Stationslage nach RICHTER (1995).	58
9	Monatswerte des Niederschlages und der Abflusshöhen aus den Schichtentwässerungen.	64
10	Abflusswerte nach Kalenderjahren.	68
11	Parameter der im HELP-Modell eingesetzten Schichten in den benötigten Einheiten.	72
12	Ergebnisse der HELP-Simulation der Wasserhaushaltschicht mit Durchlässigkeiten aus Laborversuchen für den Versuchszeitraum und Differenzen zu den gemessenen Werten.	73
13	Ergebnisse der HELP-Simulation der Wasserhaushaltschicht mit aus dem Abflussverhalten abgeschätzten Durchlässigkeiten für den Versuchszeitraum.	74
14	Aufbau des numerischen Modells zur Simulation der Feldversuche.	79
15	Gemessene und simulierte Abflusssummen aus Kapillarschicht und Kapillarblock. . .	80

Dieses Dokument ist online abrufbar unter <http://edoc.ub.uni-muenchen.de/>

Danksagungen

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1998 bis 2002 auf Anregung von Herrn Prof. Dr. Stefan Wohnlich in der Arbeitsgruppe Hydrogeologie und Umweltgeologie an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Ihm danke ich ganz besonders für die Möglichkeit zur Bearbeitung des Themas sowie für seine wissenschaftliche Unterstützung und die stete Diskussionsbereitschaft.

Dem Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Hubert Miller danke ich für die Möglichkeit der Nutzung der Einrichtungen des Lehrstuhls für Allgemeine und Angewandte Geologie.

Ermöglicht wurde diese Arbeit erst mit finanzieller Unterstützung durch das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen im Rahmen des Entwicklungsprojektes E54. Der Stadt Bayreuth, dem Bauherrn der Versuchsfeldanlage, danke ich für die gute Zusammenarbeit sowie die Übernahme eines großen Teils der Baukosten.

Mein besonderer Dank gebührt Herrn Martin Brühl für die Hilfe bei der Planung der Baumaßnahmen, sowie für zahlreiche Diskussionen und Anregungen. Den Bauleitern, Herrn Tino Hoffman und Herrn Bernd Amann, sowie Ihrem Team von der Fa. Markgraf danke ich für die motivierte und tatkräftige Umsetzung der wissenschaftlichen Vorgaben in die Praxis auf der Baustelle.

Herrn Dr. Markus Aufleger von der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München und seinen Mitarbeitern danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung der Großrinnenversuche.

Den Herren Dr. Klaus Dorsch und Kai Zosseder gebührt ein besonderer Dank für die unverzagte Mitarbeit unter teilweise widrigen Umständen beim Aufbau der Feldversuchsanlage. Herrn Dr. Dmitrij Rudakov danke ich für die fruchtbare Zusammenarbeit bei Fragen zur numerischen Modellierung.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen Holger Alstetter, Katrin Balz, Dr. Steffen Bender, Dr. Berhanu Gizaw, Thomas Hanauer, Dr. Adrian Huber, Dr. Stefan Hülmeyer, Barbara Kainzmaier, Bernd Kottke, Dr. Thomas Rude, Christine Vornehm und Monika Witt bedanke ich mich für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre, sowie für stete Hilfs- und Diskussionsbereitschaft.

1 Einleitung

Niederschlagswasser, das ungehindert in den Müllkörper einer Deponie eindringen kann, wird von dem dort vorhandenen Stoffgemenge mit löslichen, teilweise toxischen Stoffen befrachtet. Das Sickerwasser muss mit erheblichem Aufwand aus der Deponie geleitet und gereinigt werden. Ansonsten kann es das Grundwasser im Deponiebereich kontaminieren. Um dies zu verhindern, werden zeitgemäße Deponien an ihrer Oberfläche mit einer Abdichtung versehen. Das dort gesammelte Wasser ist unbelastet und kann direkt in die Umgebung abgeleitet werden. Gültige Verwaltungsvorschriften sehen für die Abdichtung eine mineralische Dichtungsschicht (z. B. Ton oder Bentonit), meist kombiniert mit einer Kunststoffdichtungsbahn vor. Aus technischen oder finanziellen Gründen ist es jedoch oft wünschenswert von diesem Regelsystem abzuweichen und statt dessen ein alternatives Abdichtungssystem einzusetzen.

Die Kapillarsperre ist eines dieser alternativen Dichtungssysteme. Die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen zeigten, dass Kapillarsperren zur Sicherung von Deponien und Altlasten, insbesondere bei ungünstigen Geländebedingungen, eine kostengünstige Alternative zum Regelsystem darstellen können (AKADEMIE FÜR BAUEN UND UMWELT E. V. 1999, V. D. HUDE & MÖCKEL 1997, JELINEK 1993, JELINEK & VON DER HUDE 1994, WOHNLICH 1991, ZISCHAK 1997). Vor Beginn der Untersuchungen zu dieser Arbeit wurden am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität München bereits zahlreiche Laboruntersuchungen mit Kapillarsperrensystemen durchgeführt. Sie dienten vor allem dazu, die Materialauswahl für Kapillarsperren zu optimieren (BALZ et al. 1999, BRUNSCHLIK et al. 1994, WOHNLICH 1991, WOHNLICH & BAUER 1999).

1.1 Zielsetzung

Zunächst war von der Materialauswahl über Eignungsuntersuchungen bis zum Bau der Versuchsfelder und deren Qualitätskontrolle eine Vorgehensweise zu schaffen, die auch auf künftige Baumaßnahmen umgesetzt werden kann.

An den Versuchsfeldern sollte dann die Wirkungsweise der Kapillarsperre im Langzeitversuch unter natürlichen Witterungseinflüssen untersucht werden. Dabei war das Verhalten der Kapillarsperre bei geringer Hangneigung von besonderem Interesse.

Ein weiteres Ziel war, durch numerische Simulation die Beobachtungen aus den Versuchsfeldern nachzubilden. Dadurch sollte geprüft werden, ob sich bei zukünftigen Planungen und Baumaßnahmen der Aufwand für die Voruntersuchungen durch numerische Modelle verringern lässt.

Darüberhinaus waren auch spezielle Fragestellungen, wie das Verhalten der Kapillarsperre im Bereich von Durchdringungskörpern sowie die Durchlässigkeit der Kapillarsperre für Deponiegas zu klären.

Wichtige Teilergebnisse wurden bereits im Verlauf der Forschungsarbeiten publiziert (BARTH 2001, BARTH & WOHNLICH 1999, 2001a,b, WOHNLICH et al. 2000).

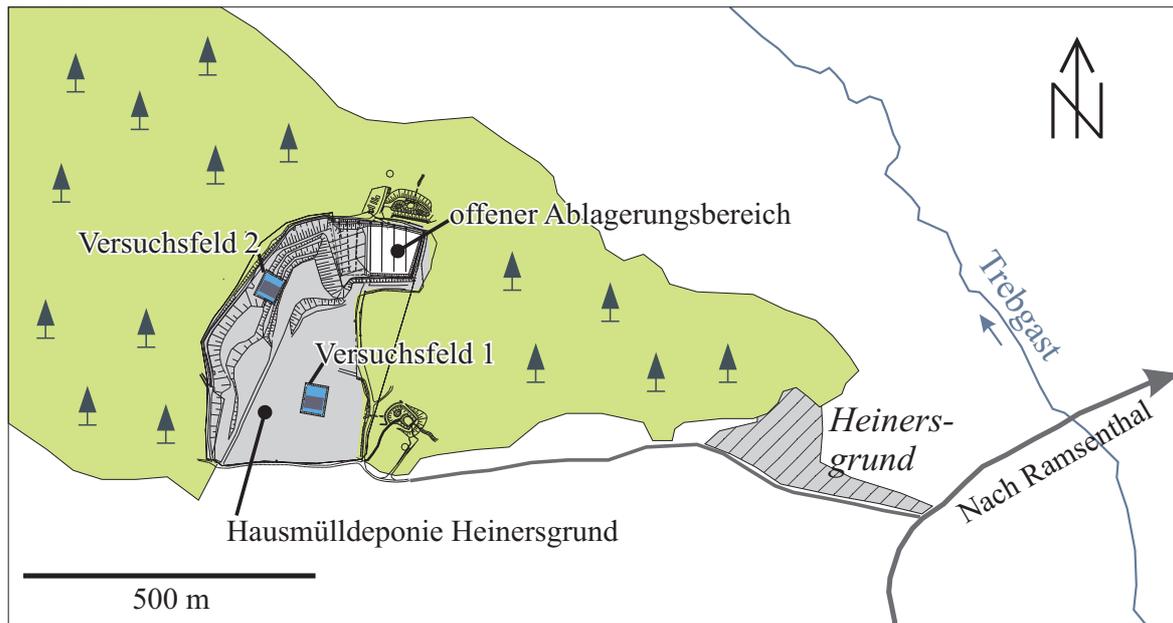


Abb. 1: Lageplan der Deponie Heinersgrund und der beiden Versuchsfelder.

1.2 Standortbeschreibung

1.2.1 Die Deponie Heinersgrund

Die Hausmülldeponie Heinersgrund liegt beim gleichnamigen Weiler auf einer bewaldeten Anhöhe nahe der Ortschaft Ramsenthal nordwestlich der Stadt Bayreuth (Abb. 1). Die geographischen Koordinaten betragen $11^{\circ} 34' 10''$ östlicher Länge und $50^{\circ} 00' 30''$ nördlicher Breite. Das Gelände liegt auf dem Gebiet der Gemeinde Bindlach im Landkreis Bayreuth. Die Deponie ist eine gemeinsame Einrichtung der Stadt und des Landkreises Bayreuth. Für den Betrieb ist der Stadtbauhof Bayreuth zuständig.

Seit 1965 wurden hier die Abfälle der Stadt und des Landkreises eingelagert. Die Deponie entstand auf dem Gelände einer aufgelassenen Sandgrube, die in EMMERT & WEINELT (1962) noch als Aufschluss von Rhätsandstein beschrieben ist. Die Deponie ist weit über die ehemalige Geländeoberfläche hinausgewachsen. Mit einem Volumen von $1\,000\,000\text{ m}^3$ bedeckt sie eine Fläche von $130\,000\text{ m}^2$. Mittlerweile wird der größte Teil der anfallenden Abfälle in Schwandorf verbrannt. Auf der Deponie werden deshalb nur noch kleine Mengen in einem derzeit noch offenen Bauabschnitt abgelagert (Abb. 1). In einigen Jahren soll die Deponie mit einer Oberflächenabdichtung versehen und endgültig abgeschlossen werden. Die Deponiebetreiber interessieren sich für eine Kapillarsperre als innovatives Oberflächenabdichtungssystem, da diese eine hohe Kostenersparnis gegenüber herkömmlichen Abdichtungen ermöglicht.

1.2.2 Geologie und Hydrogeologie

Heinersgrund liegt im Keuper des Obermainischen Bruchschollenlandes (RUTTE 1992). Die Fränkische Linie, die das Bruchschollenland vom paläozoischen Frankenwald trennt, ist ca. 1 km entfernt.

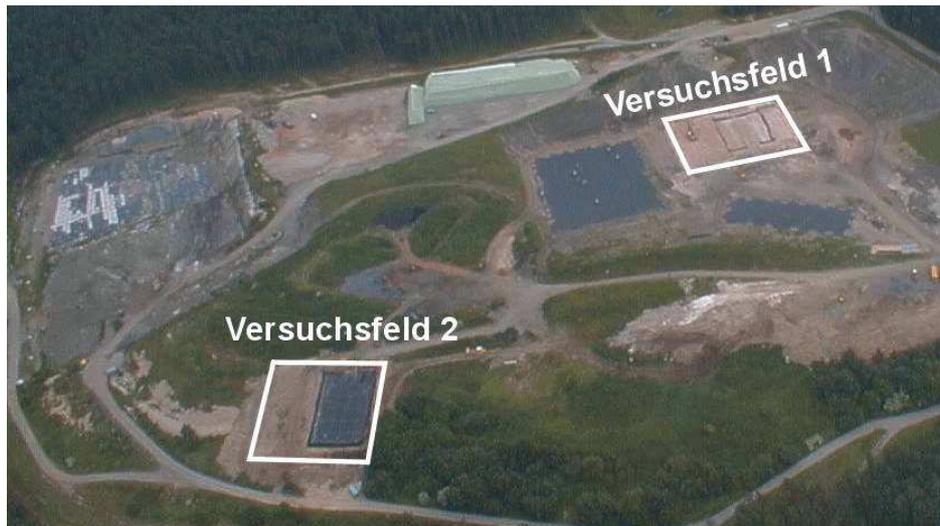


Abb. 2: Luftaufnahme der Deponie Heinersgrund aus dem Jahr 1999 während des Baus der Versuchsfeldanlage.

Sie verläuft hier durch das Trebgasttal und ist von quartären Sedimenten überdeckt (EMMERT & WEINELT 1962).

Die Anhöhe, auf der die Deponie Heinersgrund liegt, wird aus Rhätsandstein gebildet, der über den tonigen Feuerletten, aufgrund geringerer Verwitterungsanfälligkeit, verbreitet steil ansteigende Geländestufen bildet. Der Rhät besteht in der Gegend überwiegend aus grauem bis gelblichbraunem meist mittelkörnigem Sandstein, der untergeordnet von einigen tonigen Bändern durchzogen ist. Aufgrund seiner tonigen Matrix ist der Sandstein in Oberflächennähe meist mürbe. Er wird deshalb oft zur Sandgewinnung abgebaut. Die Mächtigkeit des Rhät beträgt etwa 35 m. Nach der Geologischen Karte ist der Deponiestandort noch von ca. 20 m Rhät unterlagert (EMMERT & WEINELT 1962).

Im Liegenden lagern die Feuerletten. Eine gleichförmige Folge aus rotem bis violetter Ton mit Mächtigkeiten von ca. 45-50 m. Ihre Untergrenze ist in der Umgebung des Deponiestandortes nicht aufgeschlossen. Die Schichtpakete fallen flach nach Südost ein (EMMERT & WEINELT 1962).

Bedeutende Grundwasservorkommen treten in den genannten Gesteinsschichten nur regional begrenzt, über der Schichtgrenze zu den sehr gering durchlässigen Tonen der Feuerletten auf. Vor allem in stärker zerklüfteten Bereichen, die in der Nähe der Fränkischen Linie häufig sind, wird dieses Grundwasser auch zur Versorgung kleinerer Gemeinden genutzt. An den Hängen kann es oberhalb dieser Schichtgrenze auch zum Austritt von Quellen kommen (EMMERT & WEINELT 1962).

1.2.3 Klimatische Bedingungen

Die Umgebung von Bayreuth gehört dem Klimabezirk Obermaingebiet an. Die Aufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes aus den Jahren 1961-1990 für die Station Bayreuth (11° 33' E, 49° 48' N, 330 m NN) ergeben eine durchschnittliche jährliche Niederschlagshöhe von 709 mm und eine Jahresmitteltemperatur von 7,7 °C (ENDERS 1996). Der für Nordbayern und für die geringe Seehöhe von 330 m relativ hohe Jahresniederschlag ist durch die Staulage am Westrand des Fichtelgebirges bedingt. Die Jahresmitteltemperatur ist typisch für Hügellagen in der Region (ENDERS 1996).

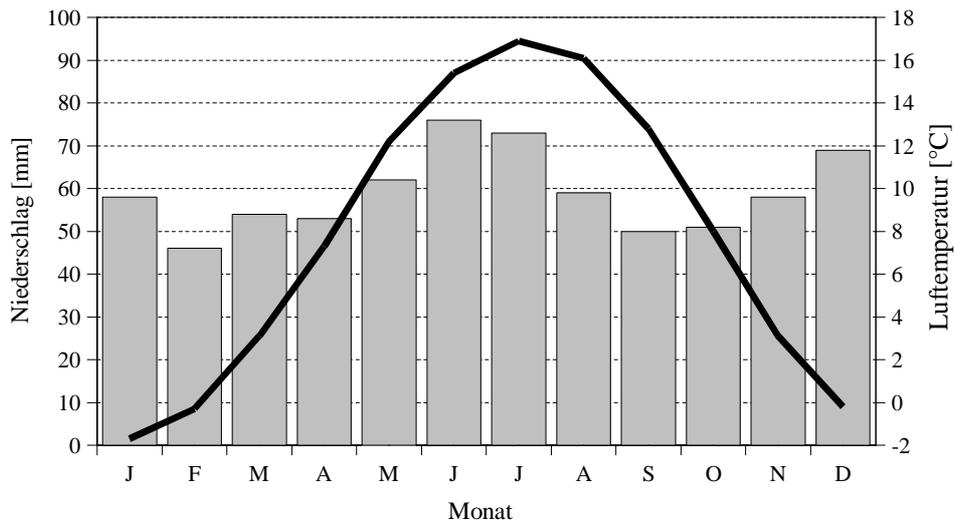


Abb. 3: Langjährige Mittelwerte aus den Jahren 1961-1990 der Monatssummen des Niederschlags (Balken) und der Monatsmittel der Lufttemperatur (Linie) für Bayreuth (ENDERS 1996).

Der mittlere Sommerniederschlag von Mai bis Oktober beträgt 372 mm, der mittlere Winterniederschlag von November bis April 338 mm. Die Niederschlagsverteilung ist damit über das Jahr hinweg relativ ausgeglichen mit geringen Anstiegen in den Sommer- und Wintermonaten (Abb. 3). Die Standardabweichung der Jahressummen ist aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität beim Niederschlag besonders groß. Sie beträgt in Bayern etwa 150 mm (ENDERS 1996). Deutlich wird diese Schwankungsbreite, wenn man das Nassjahr 1966 mit 900 mm Jahresniederschlag an der Station Bayreuth mit dem Trockenjahr 1976 mit 444 mm Jahresniederschlag vergleicht. Bei der Bewertung kurzer Zeitreihen von wenigen Jahren muss deshalb die statistische Schwankungsbreite von langjährigen Messungen beachtet werden.

KANZ & SCHNITZER (1978) ermittelten aus Niederschlags- und Abflussmessungen der Jahre 1961–1970 für das Wassereinzugsgebiet Obermain eine durchschnittliche Evapotranspiration von 465 mm/a.

1.2.4 Gegenwärtige Sicherungsmaßnahmen an der Deponie

Die ältesten Abschnitte der Deponie wurden ohne Basisabdichtung angelegt. Unterhalb der neueren Bauabschnitte befindet sich eine mineralische Basisabdichtung. Nachdem, aufgrund der unzureichenden Abdichtung von Teilen der Deponiebasis, Kontaminationen in den Grundwasservorkommen im Abstrombereich festgestellt wurden, ist eine zusätzliche Sicherungsmaßnahme notwendig geworden. Der Deponiebetreiber entschied sich deshalb, die Deponie komplett bis in die Tiefe der Feuerlettentone einzuspunden. Die Feuerlettentone eignen sich aufgrund ihrer geringen hydraulischen Durchlässigkeit, ihrer Ionenaustauschkapazität und der relativ großen Mächtigkeit gut als geologische Barriere. Es wurde somit ein Kontrollraum geschaffen, der die Rhätsandsteinschichten unterhalb der Deponie mit einschließt. Die weitere Kontamination des umgebenden Grundwassers konnte dadurch verhindert werden. Da die Deponie an kein Kanalsystem angeschlossen ist, muss das austretende Deponiesickerwasser regelmäßig mit Tanklastwagen in die städtische Kläranlage transportiert werden. Das jährliche Sickerwasseraufkommen liegt in Abhängigkeit von den Witterungsverhältnissen zwi-

schen 20 000 und 30 000 m³, was bei der genannten Fläche einer Sickerwasserhöhe von etwa 150 bis 230 mm/a entspricht.

Die Deponie ist mit einer Deponiegasabsauganlage ausgestattet. Das anfallende Deponiegas wird über einen Gasmotor vor Ort zur Stromerzeugung verwendet.

Die Oberfläche der nicht mehr genutzten Deponieabschnitte, die den weitaus größten Teil der Gesamtfläche ausmacht, ist mit einer temporären begrünten Abdeckung aus unqualifiziertem Erdaushubmaterial versehen (Abb. 2). Die temporäre Abdeckung stellt einen Schutz vor unkontrollierter Entgasung, Erosion oder Verwehung des Mülls dar. Sie verhindert jedoch nicht das Eindringen von Sickerwasser und ist nicht vollständig gasdicht. Die Menge des eindringenden Sickerwassers liegt in der Größenordnung der in der Gegend üblichen Grundwasserneubildung in Höhe von 30 – 40 % des Niederschlagswassers (KANZ & SCHNITZER 1978). Zwei Abschnitte, in denen schadstoffbelastetes Aushubmaterial irrtümlich für die temporäre Abdeckung verwendet wurde, sind mit einer temporären Abdichtung aus Kunststoffdichtungsbahn versehen worden. Sie sind im Luftbild (Abb. 2) als schwarze Flächen zu erkennen. Eine endgültige Oberflächenabdichtung gibt es derzeit, abgesehen von den Versuchsfeldern, noch nicht.

1.3 Rechtslage

Zur EU-weiten Regelung des Betriebes von Deponien wurde am 26.04.1999 die Richtlinie 1999/31/EG des Rates der Europäischen Union, kurz EU-Deponierichtlinie, erlassen. Zur Umsetzung dieser Richtlinie in nationales Recht dienen die Abfallablagerungsverordnung vom 20.02.2001 (BGBl I 2001, 305) und die Deponieverordnung vom 24.07.2002 (BGBl I 2002, 2807). Vor der Einführung dieser Verordnungen wurden Errichtung und Betrieb der Deponien durch die Verwaltungsvorschriften Technische Anleitung (TA) Abfall vom 12.03.1991 und TA Siedlungsabfall vom 13.05.1993 geregelt. Die neuen Verordnungen unterscheiden sich von den wesentlich älteren Verwaltungsvorschriften nur in wenigen Punkten. Die Verwaltungsvorschriften sind deshalb zum großen Teil weiterhin gültig.

Insbesondere für die Ausführung des Oberflächenabdichtungssystems ergeben sich keine Änderungen. Die Deponieverordnung gibt ebenso wie die TA Siedlungsabfall für den Bau einer Oberflächenabdichtung ein Regelsystem explizit vor. Es besteht für eine Deponie der Klasse II, zu denen die Deponie Heinersgrund zählt, von unten nach oben aus Ausgleichsschicht, falls erforderlich Gasdränsschicht, mineralischer Dichtungsschicht (Tonschicht mit einer Durchlässigkeit von $k_f \leq 10^{-9}$ m/s), Kunststoffdichtungsbahn, Schutzschicht, Entwässerungsschicht und Rekultivierungsschicht (Abb. 4).

Wie schon bisher die TA Siedlungsabfall unter Punkt 10.4.1.1, erlaubt auch die neue Deponieverordnung im Punkt 2 des Anhangs 1 den Einsatz eines alternativen Abdichtungssystems unter der Vorgabe, dass es in seiner Funktion gleichwertig zum oben genannten Regelsystem sein muss. Zahlreiche Forschungsergebnisse, die seit Inkrafttreten der Verwaltungsvorschriften publiziert wurden, lassen sowohl Schwächen im Regelsystem, insbesondere in der mineralischen Dichtungsschicht, als auch Vorteile von alternativen Dichtungssystemen klar erkennen (BREH & HÖTZL 2000, GEBISSA & BOHNE 1998, HORN et al. 1996, MELCHIOR 1993). Diese Erkenntnisse fanden jedoch keine Beachtung in den aktuellen Deponieverordnungen. Ein alternatives System wird nach wie vor nur über den Nachweis der Gleichwertigkeit zum Regelsystem erlaubt. Richtlinien für die Beurteilung der Gleichwertigkeit liegen vor (DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK 1997, KINDSMÜLLER

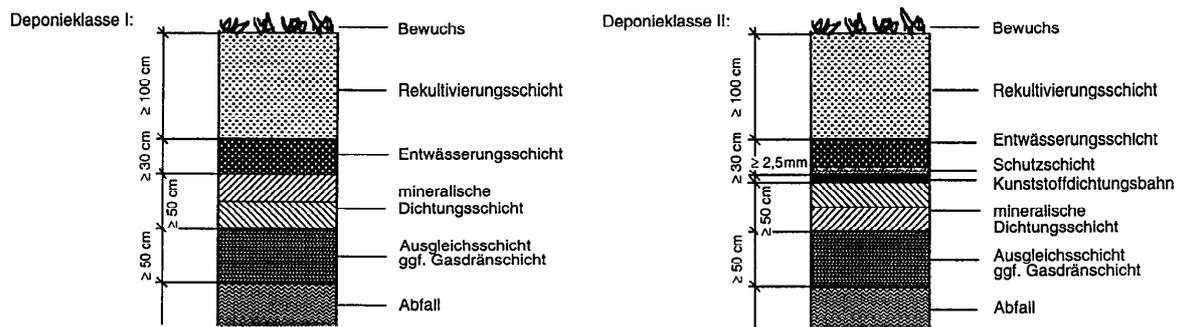


Abb. 4: Aufbau von Deponieoberflächenabdichtungen nach TA-Siedlungsabfall (aus BERGS et al. 1997).

1999). Auch hier wird jedoch die Qualität des Dichtungselementes in erster Linie durch den k_f -Wert definiert, der systembedingt für eine Kapillarsperre nicht direkt bestimmbar ist.

Über die Gleichwertigkeit entscheidet die zuständige Genehmigungsbehörde, meist die Bezirksregierung, in Zusammenarbeit mit der Landesumweltbehörde. Insbesondere bei alternativen Systemen, bei denen sich, wie bei der Kapillarsperre, keine eindimensionale vertikale hydraulische Durchlässigkeit bestimmen lässt, ist diese Entscheidung schwierig. Deshalb ist bisher der zeit- und kostenintensive Betrieb einer Großlysimeteranlage auf der Deponie erforderlich, um die Funktion des kompletten Alternativsystems unter den klimatischen Bedingungen vor Ort zu erproben (ZISCHAK 1997). Anhand der Ergebnisse wird dann entschieden, ob das Alternativsystem als gleichwertig eingesetzt werden kann. Die vorliegende Arbeit soll auch als Entscheidungshilfe für Behörden zur Beurteilung der Gleichwertigkeit des Kapillarsperrensysteams zur herkömmlichen Deponieoberflächenabdichtung dienen.

BURKHARDT & EGLOFFSTEIN (2001) beschreiben ein Beispiel, in dem von Seiten der Bezirksregierung die Genehmigung nach Punkt 2.4 der TA Siedlungsabfall (BERGS et al. 1997) erteilt wurde. Punkt 2.4 ermöglichte der zuständigen Genehmigungsbehörde, ohne Berücksichtigung von weitergehenden Vorschriften aus der TA Siedlungsabfall, wie etwa dem Gleichwertigkeitsnachweis aus Punkt 10.4.1.1, nach eigenem Ermessen eine Ausnahmeregelung zu erteilen, wenn nachgewiesen ist, dass durch andere geeignete Maßnahmen das Wohl der Allgemeinheit nicht gefährdet ist. Diese „Hintertür“ wurde jedoch mit Inkrafttreten der Abfallablagereungsverordnung vom 20.02.2001 geschlossen (RADDE 2001).

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Begriffsdefinitionen

Boden bezeichnet in den Ingenieurwissenschaften sämtliche für Baumaßnahmen relevanten Lockergesteinsschichten im Untergrund (DIN 18196 1988, PRINZ 1997). In dieser Arbeit wird jedoch, wie im naturwissenschaftlichen Gebrauch üblich, mit Boden nur die oberste belebte Zone der Erdkruste bezeichnet, die als Pflanzensubstrat dient (DIN 4047-3 2002, HARTGE & HORN 1999, SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998).

Feldkapazität bezeichnet die Menge an Wasser, die ein Substrat gegen die Schwerkraft festhalten kann. Sie stellt sich etwa ein bis zwei Tage nach Beendigung der Wasserzufuhr, z.B. durch Niederschlag ein (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998). Dieser Wert ist jedoch nicht exakt bestimmbar, da der Boden dann immer noch, wenn auch sehr langsam, Wasser verliert (HARTGE & HORN 1999). Deshalb hat sich für die experimentelle Bestimmung aus ungestörten Proben in Deutschland die Angabe des Wassergehaltes bei pF 1,8 durchgesetzt (AG BODEN 1994). In den USA dagegen wird unter Feldkapazität der Wassergehalt bei pF 2,5 verstanden.

Nutzbare Feldkapazität ist der Teil der Feldkapazität, der für Pflanzen zur Verfügung steht. Sie berechnet sich aus der Differenz der Feldkapazität und dem Wassergehalt am permanenten Welkepunkt bei pF 4,2 (AG BODEN 1994).

Kapillarblock ist mittlerweile der am weitesten verbreitete Begriff für die untere grobkörnige Schicht des Kapillarsperrensystems (HARTGE 1998, V. D. HUDE 1999, JELINEK 1997, KÄMPF 2000, MELCHIOR 1993, STEINERT et al. 1998). Er wird deshalb auch in der vorliegenden Arbeit verwendet. Daneben werden noch die Bezeichnungen Kapillarbruchschicht (BAUER 2001) oder kapillarbrechende Schicht (ZISCHAK 1997) eingesetzt.

2.2 Wasserbilanz

Ein wichtiges Kriterium für die Betrachtung der Funktionsweise einer Deponieoberflächenabdichtung ist deren Wasserhaushalt. Für den Wasserhaushalt, auch Wasserbilanz genannt, in einem System das nur durch Niederschlag gespeist wird, gilt die Wasserhaushaltsgleichung:

$$N = ET + A_o + A_u + \Delta W \quad (1)$$

mit: N Wasserzufuhr durch Niederschlag
 ET Verdunstung
 A_o oberirdischer Abfluss
 A_u unterirdischer Abfluss
 ΔW Änderung des gespeicherten Wasservorrates

Für die Betrachtung längerer Perioden ist die Vorratsänderung ΔW vernachlässigbar, wenn sich die hydrogeologische Gesamtsituation des Systems nicht ändert (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL

1998). Der unterirdische Abfluss kann in einem geeigneten Lysimeter weiter in separate Schichtwasserabflüsse unterteilt werden. Damit wird die Wasserhaushaltsgleichung erweitert zu:

$$N = ET + A_o + \Sigma A_{1...n} + \Delta W \quad (2)$$

mit: n Zahl der getrennt erfassten Schichtwasserabflüsse

Zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration stehen mehrere Methoden zur Verfügung. In Deutschland ist das einfache empirische Verfahren nach HAUDE (1955) weit verbreitet (DIN 19685 1997, DVWK 1996):

$$ET_{pHaude} = f \cdot e_s(T_{14}) \left(1 - \frac{U_{14}}{100} \right) \leq 7 \text{ mm/d} \quad (3)$$

mit: f Haude-Faktor in mm/hPa nach Tab. 1
 T Lufttemperatur in °C
 T_{14} Lufttemperatur in °C zum Mittagstermin 14.30 Uhr MEZ
 $e_s(T_{14})$ Sättigungsdampfdruck zum Mittagstermin 14.30 Uhr MEZ in hPa nach Gl. 4 bzw. 5
 U_{14} rel. Luftfeuchte in % zum Mittagstermin 14.30 Uhr MEZ

$$e_s(T) = 6,11 \cdot 10^{\frac{17,62T}{243,12+T}} \quad (4)$$

$$e_s(T) = 6,11 \cdot 10^{\frac{22,46T}{272,62+T}} \text{ für } T < 0 \quad (5)$$

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
f [mm/hPa]	0,22	0,22	0,22	0,29	0,29	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,22	0,22

Tab. 1: Haude-Faktoren f zur Berechnung der potentiellen Verdunstung von Gras für mittlere Tageswerte.

Da eine Verdunstung von mehr als 7 mm/d aus energetischen Gründen unrealistisch ist, wurde in Gl. 3 eine Obergrenze eingesetzt. Der Vorteil des Haudeverfahrens ist es, dass nur die für viele Standorte verfügbaren Werte für T und U aus der Mittagsablesung benötigt werden. Es zeigt gute Übereinstimmungen bei der Betrachtung längerer Zeiträume, ist jedoch für die Berechnung der Verdunstung einzelner Tage ungenau (DVWK 1996).

Bei ausreichender Verfügbarkeit von meteorologischen Grunddaten ist deshalb das Verfahren nach PENMAN (1956) vereinfacht nach DVWK (1996) vorzuziehen. Es ermöglicht auch die Verwendung von zeitlich hochaufgelösten Messwerten aus automatischen Wetterstationen. Für kurze Messintervalle lautet die Gleichung:

$$ET_{pPenm} = 2,3 \frac{T+22}{T+123} \frac{t}{L^*} \left[0,6R_G + 37,6(1+1,8v_2) \left(1 - \frac{U_{14}}{100} \right) \right] \text{ kg/m}^2 \quad (6)$$

mit: t	Zeitschritt in s bei der Erfassung der Messwerte
R_G	Globalstrahlung in W/m^2 , Mittel über die Zeit t
L^*	spezifische Verdunstungswärme von Wasser in Ws/kg
T	Lufttemperatur in $^\circ\text{C}$, Mittel über die Zeit t
v_2	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe in m/s , Mittel über die Zeit t
U	rel. Luftfeuchte in %, Mittel über die Zeit t

Die spezifische Verdunstungswärme L^* ist temperaturabhängig und ergibt sich für Wasser aus:

$$L^* = (2,498 - 0,00242T) 10^6 \text{ Ws/kg} \quad (7)$$

2.3 Wasser in teilgesättigten porösen Medien

Während die wassergesättigte Zone der Erdrinde vom Zweiphasensystem aus Wasser und Feststoff geprägt ist, herrscht in der teilgesättigten oder wasserungesättigten Zone das Dreiphasensystem aus Wasser, Feststoff und Luft vor. Aufgrund der Oberflächenspannung folgt die Wasserbewegung hier zusätzlichen Gesetzmäßigkeiten.

Unterirdisches Wasser bezeichnet das Wasser in den Hohlräumen der Lithosphäre. Folgende Erscheinungsformen unterirdischen Wassers lassen sich nach DIN 4049-3 in der ungesättigten Zone unterscheiden:

Sickerwasser ist „unterirdisches Wasser, das sich durch Überwiegen der Schwerkraft abwärts bewegt, soweit es kein Grundwasser ist“ (DIN 4049-3: 49). Dazu gehört also das gesamte sich abwärts bewegende Wasser der ungesättigten Zone. Dafür wird der Begriff im Folgenden auch verwendet. In der Deponietechnik versteht man unter Sickerwasser häufig jedoch kontaminiertes Wasser, das bereits den Müllkörper durchflossen hat. Dafür wird der eindeutige Begriff *Deponiesickerwasser* verwendet.

Haftwasser ist das Wasser, das in der ungesättigten Zone gegen die Schwerkraft gehalten wird. Dazu gehört hygroskopisches Wasser, Adsorptionswasser und Porenwinkelwasser.

Kapillarwasser ist unterirdisches Wasser, das durch Kapillarkräfte gehoben oder gehalten wird.

2.3.1 Die Kapillarität des Porenwassers

Wegen seiner hohen Oberflächenspannung tendiert Wasser dazu, die Grenzfläche zur Luft möglichst klein zu halten. Da die Grenzflächenspannung des Wassers gegenüber den Bodenpartikeln kleiner als seine Oberflächenspannung ist, werden die Körner vom Wasser benetzt. Dadurch wird ein niedrigerer energetischer Zustand erreicht und die Grenzfläche zur Luft bzw. zum Wasserdampf auf die verbleibenden Luftporen im Korngefüge verringert (HARTGE & HORN 1999).

Um die Berührungsstellen der Körner bildet das Porenwasser ringförmige Menisken. Die Menisken vergrößern sich bei Wasserzufuhr solange, bis das Wasser nicht mehr gegen die Schwerkraft gehalten werden kann. Es fließt dann als Sickerwasser nach unten ab. Da das Wasser in den unregelmäßigen Poren eines porösen Mediums den gleichen Gesetzmäßigkeiten wie in einer Kapillarröhre folgt, spricht man beim frei beweglichen Wasser in der ungesättigten Zone von Kapillarwasser (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998).

2.3.2 Potentiale in der ungesättigten Zone

Das Gesamtpotential in der ungesättigten Zone (ψ) setzt sich aus mehreren Teilpotentialen zusammen (TINDALL & KUNKEL 1999):

$$\psi = \psi_Z + \psi_m + \psi_o + \psi_g \quad (8)$$

mit: ψ_Z Gravitationspotential
 ψ_m Matrixpotential
 ψ_o Osmotisches Potential
 ψ_g Auflastpotential

Die Teilpotentiale addieren sich im Gleichgewichtszustand zu 0. Das negative Matrixpotential wird häufig mit Saugspannung bezeichnet.

Für hydraulische Betrachtungen sind ψ_o und ψ_g im allgemeinen vernachlässigbar klein (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998). Die Wasserbewegung wird dann vom *hydraulischen Potential* (ψ_H) dominiert. Gl. 8 vereinfacht sich damit zu:

$$\psi_H = \psi_Z + \psi_m \begin{cases} > 0 & \text{abwärtsgerichtete Wasserbewegung (Infiltration)} \\ = 0 & \text{keine Wasserbewegung} \\ < 0 & \text{aufwärtsgerichtete Wasserbewegung (kapillarer Aufstieg)} \end{cases} \quad (9)$$

Bei der abwärtsgerichteten Wasserbewegung handelt es sich im allgemeinen um Versickerungsvorgänge in Folge von Niederschlagsereignissen, während die aufwärtsgerichtete Wasserbewegung in Form von kapillarem Aufstieg die Folge von Evaporation an der Oberfläche und Wasserentzug durch Pflanzen ist (HARTGE & HORN 1999).

2.3.3 Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Matrixpotential

Der Wassergehalt eines porösen Mediums hängt eng mit dem Matrixpotential ψ_m zusammen. Für die Betrachtungen der ungesättigten hydraulischen Verhältnisse wird entweder der dimensionslose volumetrische Wassergehalt θ als Volumenanteil vom Gesamtprobenvolumen oder die ebenfalls dimensionslose relative Sättigung Θ (Gl. 10) als Anteil vom Gesamtporenvolumen angegeben.

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (10)$$

mit: Θ relativer Wassergehalt
 θ volumetrischer Wassergehalt
 θ_s volumetrischer Sättigungswassergehalt
 θ_r volumetrischer residualer Wassergehalt

Der Sättigungswassergehalt θ_s ist das maximale Wasservolumen, das der Probenkörper in seinem Porenraum aufnehmen kann. Er ist bei idealer Sättigung ohne Lufteinschlüsse gleich der Porosität. Zur Vermeidung von Lufteinschlüssen wird langsam von unten her mit entgastem Wasser bewässert. Der residuale Wassergehalt θ_r ist der minimale Wassergehalt, der sich durch Wasserentzug in flüssiger Phase einstellt. Ein geringerer Wassergehalt kann nur noch durch Wasserentzug in der Gasphase (Verdunstung) eingestellt werden.

Die Θ - ψ_m Beziehung wurde von VAN GENUCHTEN (1980) mit folgender, empirisch ermittelten Funktion beschrieben:

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi_H)^n} \right]^m \quad (11)$$

mit: α VAN GENUCHTEN-Parameter [1/m]
 m VAN GENUCHTEN-Parameter [-]
 n VAN GENUCHTEN-Parameter [-]

Die VAN GENUCHTEN-Parameter α , m und n haben keine physikalische Bedeutung. Sie wurden durch zahlreiche Versuche an unterschiedlichen Bodenproben empirisch bestimmt (VAN GENUCHTEN 1980).

Durch Einsetzen von Gl. 10 kann auch die θ - ψ_m Beziehung ausgedrückt werden:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi_m)^n]^m} \quad (12)$$

Die meisten Sättigungsverläufe erlauben nach VAN GENUCHTEN (1980) die Einschränkung von Gl. 12 durch:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (13)$$

θ_s und θ_r lassen sich direkt experimentell bestimmen. Gl. 11 hat damit noch zwei unabhängige Parameter (α , n). Bei sehr feinkörnigem Material sind die, für die Bestimmung von θ_r notwendigen, hohen Saugspannungen allerdings versuchstechnisch schwer herzustellen. Es kann deshalb notwendig sein, die θ - ψ_m -Kurve in Richtung sehr niedriger Wassergehalte zu extrapolieren (VAN GENUCHTEN 1980). Durch Anpassen der Kurve, die Gl. 12 beschreibt, an die experimentell ermittelte θ - ψ_m -Beziehung, lassen sich dann die freien Parameter α und n rechnergestützt iterativ ermitteln.

2.3.4 Wasserbewegung

Ist der Gradient des hydraulischen Potentials $\psi_H \neq 0$ so findet Wasserbewegung entlang des Potentialgefälles statt. Während die Richtung der Wasserbewegung bereits in Gl. 9 definiert ist, lässt sich der Volumenstrom Q für den wassergesättigten Fall bei stationärem, laminarem, eindimensionalem Fluss nach DARCY (1856) beschreiben:

$$Q = k_f \frac{\partial h}{\partial l} A \quad (14)$$

mit: Q Volumenstrom [m^3/s]
 k_f Durchlässigkeitskoeffizient [m/s]
 A Durchströmte Querschnittsfläche [m^2]
 h Druckhöhe [m]
 l Entfernung [m]
 $\frac{\partial h}{\partial l}$ hydraulischer Gradient [-]

Der Durchlässigkeitskoeffizient k_f ist im gesättigten Fall eine materialspezifische Konstante, die von der Porengröße und -geometrie abhängt. Da im ungesättigten Fall nur der wassererfüllte Teil der Poren für den flüssigen Wassertransport zur Verfügung steht, nimmt die hydraulische Durchlässigkeit bei abnehmender Wassersättigung ebenfalls ab. Das im deutschen Sprachraum weit verbreitete Kürzel k_u ist deshalb irreführend. Die ungesättigte Durchlässigkeit ist eine vom Wassergehalt Θ abhängige Funktion $k_u(\Theta)$. Nach BUCKINGHAM (1907) gilt dann auch im ungesättigten Fall für die Bewegung der flüssigen Phase das Gesetz von DARCY:

$$Q = k_u(\Theta) \frac{\partial \psi_H}{\partial l} A \quad (15)$$

mit: $k_u(\Theta)$ Funktion der ungesättigten Durchlässigkeit [m/s]
 Θ relativer Wassergehalt [-]
 $\frac{\partial \psi_H}{\partial l}$ hydraulischer Gradient [-]

Zur Beschreibung der ungesättigten Durchlässigkeit erweiterte VAN GENUCHTEN (1980) das $k_u(\Theta)$ -Modell von MUALEM (1976) mit dem Parametermodell für den Sättigungsverlauf (Gl. 11) zu:

$$k_u(\Theta) = k_f \Theta^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (16)$$

oder durch Einsetzen von Gl. 11 in der $k_u(\psi_m)$ Form:

$$k_u(\psi_m) = k_f \frac{\{ 1 - (\alpha \psi_m)^{n-1} [1 + (\alpha \psi_m)^n]^{-m} \}^2}{[1 + (\alpha \psi_m)^n]^{\frac{m}{3}}} \quad (17)$$

VAN GENUCHTEN (1980) liefert damit eine Methode, um den Verlauf der ungesättigten Durchlässigkeit indirekt zu bestimmen. Dazu müssen zunächst die VAN GENUCHTEN-Parameter durch Kurvenanpassung von Gl. 12 an die experimentelle θ - ψ_m -Beziehung iterativ ermittelt werden. Durch Einsetzen in Gl. 16 oder 17 wird damit die Funktion der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit definiert.

Diese indirekte Methode zur Bestimmung der ungesättigten Leitfähigkeit ist weit verbreitet (GUYMON 1994, HARTGE & HORN 1999), da ihre direkte versuchstechnische Bestimmung sehr aufwendig ist (PLAGGE 1991, SCHEIBKE 1998).

2.4 Funktionsprinzip der Kapillarsperre

Die Kapillarsperre besteht aus zwei Schichten, dem grobkörnigen Kapillarblock und der darüberliegenden feinkörnigen Kapillarschicht. Geeignete Materialien dafür werden nach bekannten Kriteri-

Kriterium	Kapillarschicht	Kapillarbruchsicht
Körnung	0,06 – 2,0 mm	filterstabil entsprechend d. KS
Korndichte	$\geq 2,6 \text{ g/cm}^3$	$\geq 2,6 \text{ g/cm}^3$
Ungleichförmigkeit (d_{60}/d_{10})	≤ 3	≤ 3
Bodengruppe DIN 18 196	SE	GE
k_f -Wert berechnet nach BEYER [m/s]	$> 5 \times 10^{-5}$	10^{-3}
k_u -Wert bei $\Psi_M = -100 \text{ cmWS}$ nach BLOEMEN [m/s]	$> 10^{-8}$	$< 10^{-10}$
Lufttrittswert Ψ_a [cmWS]	$-44 < \Psi_a < -10 \text{ cmWS}$	1
Wasseraufnahmefähigkeit nach DIN 52 103 [Gew%]	1	1
Anteil schaumiger und glasiger Stücke (DIN 4301)	---	$\leq 5 \text{ Gew\%}$
Rundungsgrad	Gut bis sehr gut gerundet	Gut bis sehr gut gerundet
Zuordnungswerte nach LAGA bei Reststoffen	Z 0 bis Z 1.1	Z 1.2 bis Z 2
Mächtigkeit [cm]	ca. 40	ca. 25
Neigung		$> 10\%$

Tab. 2: Gütekriterien für die Auswahl von Kapillarsperrenmaterialien (aus BAUER 2001).

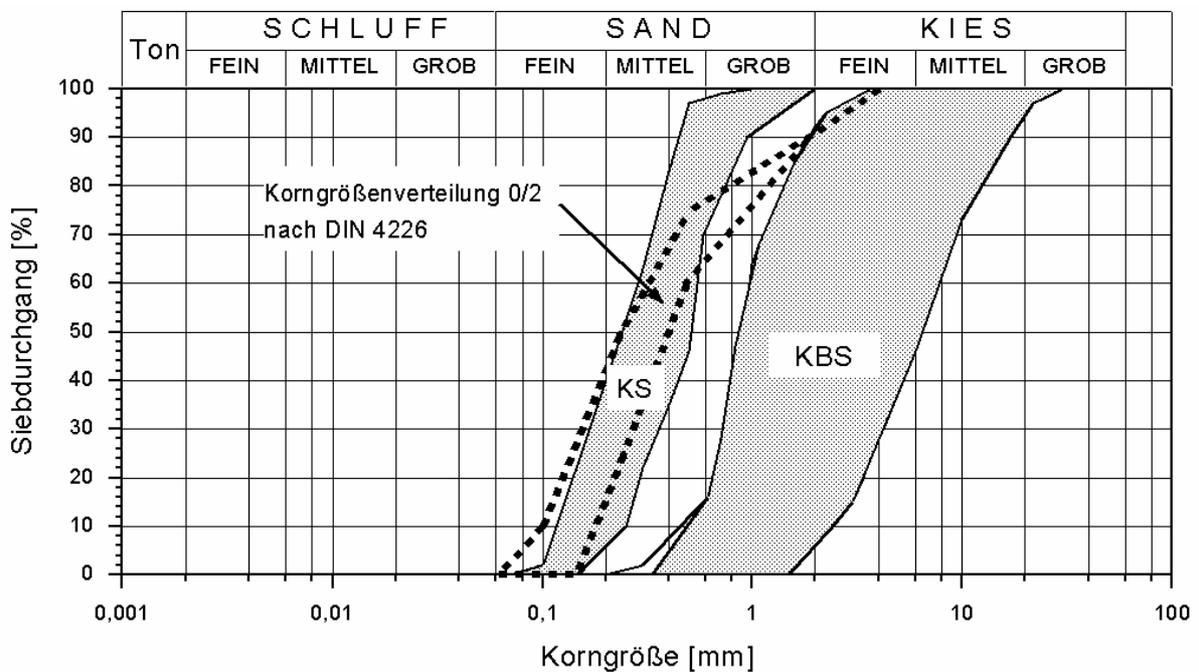


Abb. 5: Günstige Kornverteilungskurven für Kapillarschicht (KS) und Kapillarblock (KBS) (aus BAUER 2001).

en ausgewählt, die aus zahlreichen Laborversuchen abgeleitet wurden (BAUER 2001, KÄMPF 2000, WOHLNICH & BAUER 1999). Die wichtigsten Kriterien für die Auswahl von Kapillarsperrenmaterialien sind in Tab. 2 zusammengestellt. Die Vorgaben für die Kornverteilungen zeigt Abb. 5. Eine typische Kombination ist z.B. ein Kapillarblock aus Feinkies und eine Kapillarschicht aus Mittelsand. Voraussetzung für die Funktion des Systems ist, dass die Schichtgrenze geneigt ist. Die Untergrenze für den sinnvollen Einsatz der Kapillarsperre liegt nach derzeitigem Kenntnisstand bei einer Hangneigung von etwa 10 % (SCHNATMEYER & WAGNER 1996), die Obergrenze ergibt sich aus der Standsicherheit der verwendeten Materialien.

Die Kapillarsperre erfüllt ihre Funktion nur bei ungesättigten hydraulischen Verhältnissen. Aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers und der hydrophilen Oberflächen der Körner des Schichtaufbaus stellt sich dann eine Saugspannung (Matrixpotential $\psi_m < 0$) ein. Während bei geeigneter Materialabstimmung der grobkörnige Kapillarblock mit seinen relativ großen Poren schon bei geringen

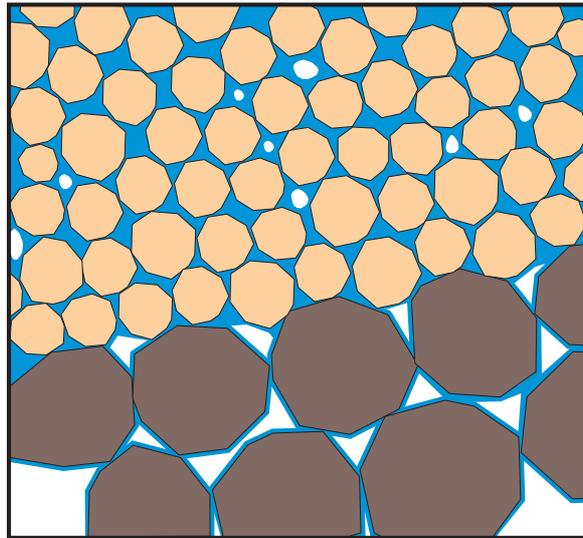


Abb. 6: Schematische Ansicht der Schichtgrenze zwischen Kapillarschicht (oben) und Kapillarblock (unten) mit teilweise wassererfüllten Poren.

Saugspannungen einen großen Teil seines Porenwassers verliert, haben die kleinen Poren der feinkörnigeren Kapillarschicht, aufgrund der Kapillarkraft des Wassers, noch relativ hohe Wassergehalte und halten das Porenwasser gegen die Schwerkraft. In einem ebenen System würde weiterer Sickerwasserzutritt von oben solange zu einer Verringerung der Saugspannung führen, bis das Wasser tiefer in den Kapillarblock versickern würde. In einem geneigten System jedoch, kann das Wasser in den, auch bei geringer Saugspannung, weitgehend gefüllten Poren der Kapillarschicht oberhalb der geneigten Grenzfläche zum Kapillarblock der Schwerkraft folgend hangabwärts fließen. Dagegen bleibt im Kapillarblock schon bei Saugspannungen von wenigen hPa, nur noch ein wenig mobiler Wasserfilm um die Körner haften, der nicht für den Wassertransport zur Verfügung steht (Abb. 6). Die Belastbarkeit der Kapillarsperre erhöht sich systembedingt mit der Hangneigung.

Das in der Kapillarschicht abfließende Wasser wird dann am Hangfuß in einer Dränung gesammelt, als unbelastetes Wasser abgeführt und somit vom Deponiekörper ferngehalten. Das Sickerwasseraufkommen im Deponiekörper wird dadurch dauerhaft stark verringert. Somit reduziert sich die Gefahr von Schadstoffaustragungen durch einen geringeren hydraulischen Druck auf die Barriersysteme an der Basis und an den Seitenwänden der Deponie. Außerdem fällt weniger Deponiesickerwasser an der Basisentwässerung an, wodurch erhebliche Kosten bei dessen Entsorgung eingespart werden.

Ziel der Dimensionierung eines Kapillarsperrensystems ist es, eine geeignete Materialkombination auszuwählen und die maximalen Abstände zwischen den Dränungen bei den durch die Deponiegeometrie vorgegebenen Hangneigungen zu ermitteln.

2.5 Stand der Forschung

Die Forschung an Oberflächenabdichtungen mit Kapillarsperren in Feldversuchen konzentriert sich in Deutschland derzeit auf fünf Standorte. Einen Überblick über die durchgeführten Lysimeteruntersuchungen gibt Tab. 3. Daneben entstanden mittlerweile auch einige rein baupraktisch errichtete

Betreiber	Universität Hamburg	TU Darmstadt		Universität Karlsruhe	Universität München
Standort	Hamburg	Marburg	Frankfurt a.M.	Karlsruhe	Bayreuth
Deponie	Georgswerder	Am Stempel	Monte Scherbelino	Karlsruhe West	Heinersgrund
Deponietyp	Sondermüll	Altdeponie, Hausmüll /Bauschutt	Altdeponie, Hausmüll	Hausmüll	Hausmüll
Lysimeteranzahl	1	4	4	1	2
Beobachtungszeit	1988-1995	1992-	1994-	1994-	2000-
Hangneigung	11,3°	10°; 16°	11°	23,5°	5,7°; 14,6°
Hanglänge	50 m	20 m; 30 m	40 m	40 m	30 m
Lysimeterbreite	10 m		15 m		20 m
Wasserhaushaltsschicht	0,75 m	2,00 m	1,40 m; 1,70 m; 2,30 m	1,00 m	1,50 m
weitere Dichtelement	min. Dichtung mit Flächendrä- nung	-	mit und ohne min Dichtung teilw. mit Flä- chendränung	min. Dichtung mit Flächendrä- nung	-
Kapillarschicht	0,60 m	0,40 m	0,40 m	0,30 m	0,50 m
Kapillarblock	0,25 m	0,30 m	0,30 m	0,15 m	0,30 m

Tab. 3: Vergleich der in Deutschland betriebenen Lysimeterversuche mit Kapillarsperrensystemen und langjährigen Messreihen.

Kapillarsperrensysteme ohne Einrichtungen für wissenschaftliche Untersuchungen (BURKHARDT & EGLOFFSTEIN 2001, GROSSMANN et al. 2001).

Die bisher durchgeführten Felduntersuchungen an Kapillarsperrensystemen unterscheiden sich sowohl in den Abmessungen als auch in der Ausführung vom Feldversuch in Bayreuth, Heinersgrund. Die bedeutendsten Unterschiede sind, dass bei vielen bisherigen Aufbauten der Sickerwasserandrang in der Kapillarsperre durch ein darüberliegendes mineralisches Dichtungselement verringert wurde und dass bisher kaum das Verhalten der Kapillarsperre bei kritischen geringen Hangneigungen von weniger als 10° untersucht wurde.

Die verschiedenen Lysimeterversuche ergaben erwartungsgemäß sehr heterogene Ergebnisse bezüglich der Funktionalität der Kapillarsperre. Das Lysimeter auf der Deponie Georgswerder besteht aus einer Kombinationsabdichtung aus mineralischer Dichtung und darunterliegender Kapillarsperre sowie einer auf 0,75 m reduzierten Wasserhaushaltsschicht. Es entstand in den ersten Versuchsjahren aufgrund der guten Dichtwirkung der mineralischen Dichtung nur geringer Sickerwasserandrang auf die Kapillarsperre und kein messbarer Abfluss aus dem Kapillarblock. Ab dem fünften Betriebsjahr waren, aufgrund abnehmender Dichtwirkung der mineralischen Abdichtung, auch im Kapillarblock Abflüsse messbar (MELCHIOR 1993).

Ähnliche Ergebnisse zeigt auch die stark geneigte Kombinationsabdichtung im Lysimeter auf der Deponie Karlsruhe West. Dort ließ ebenfalls die Wirkung der mineralischen Abdichtung mit der Fortdauer des Versuches stark nach und die Kapillarsperre übernahm immer mehr die Aufgabe des primären Dichtungssystems (BREH & HÖTZL 2000, ZISCHAK 1997). Der Kapillarblockabfluss lag trotzdem immer unter 1 % des Jahresniederschlags, was auf die gute Wirksamkeit der Kapillarsperre bei großen Hangneigungen zurückzuführen ist.

Die Feldversuche der TU Darmstadt erbrachten bisher sehr gute Ergebnisse für Kombinationsabdichtungen aus mineralischer Dichtung und Kapillarsperre. Im einfachen Kapillarsperrensystem ergaben sich Durchsickerungen von 10 – 20 mm pro Jahr. Experimente mit einem doppelten Kapillarsperrensystem brachten keine signifikante Verbesserung der Dichtwirkung (JELINEK 1997)

2.6 Vorteile der Kapillarsperre

An der Oberfläche einer Deponie herrschen folgende, für ein Dichtungssystem relevante Bedingungen:

- große Variabilität in der Temperatur und im Wassergehalt
- Setzungserscheinungen
- Durchwurzelung
- Durchdringungen in Form von Gasbrunnen und Sickerwasserschächten

Ein Dichtungselement in einer Oberflächenabdichtung darf auf diese Umwelteinflüsse nicht mit einer signifikanten Verschlechterung seiner Dichtwirkung reagieren.

Da in der Kapillarsperre, im Gegensatz zur Mineralischen Abdichtung, keine quellfähigen Materialien zum Einsatz kommen, ist sie absolut unempfindlich gegen Austrocknung oder Schwankungen im Wassergehalt, sowie gegen Frosteinwirkung. Großräumige Setzungserscheinungen führen nicht zu einem Versagen der Kapillarsperre, solange die Mindestneigung für das Gesamtsystem nicht zu gering wird. Kleinräumige Setzungen und sogar kleinere Scherverformungen in der Schichtgrenze führen bei der prinzipbedingten ungesättigten Strömung nicht zu einem Versagen des Systems. Schlimmstenfalls wären lokale Schwachstellen durch geringe Saugspannungen in Setzungsmulden zu befürchten. Aufgrund der ungesättigten hydraulischen Bedingungen dringt das Porenwasser auch nicht bevorzugt in größere Hohlräume ein und fließt nicht entlang von Störkörpern nach unten ab. Wurzeln, Grabgänge oder Rohrleitungen aus dem Deponiebau haben deshalb keinen nachteiligen Einfluss auf die Dichtwirkung der Kapillarsperre. Das Kapillarsperrensystem bietet in seinem Aufbau keine bevorzugten Gleitflächen. Es kann deshalb auch auf sehr steilen Böschungen eingesetzt werden (AMANN & MENDOZA 1999). Da die Kapillarsperre nur aus natürlichen inerten Materialien besteht, ist sie nahezu unbegrenzt haltbar.

Während der Baumaßnahmen ist die Kapillarsperre nicht witterungsempfindlich. Die Qualitätskontrolle während des Einbaus ist einfach und beschränkt sich im Wesentlichen auf das Überprüfen der Kornzusammensetzung.

Die Kapillarsperre konkurriert derzeit vor allem mit den in der TA-Siedlungsabfall (BERGS et al. 1997) vorgesehenen Dichtungssystemen Mineralische Abdichtung und Kunststoffdichtungsbahn.

3 Voruntersuchung der Kapillarsperrenmaterialien

Um einen möglichst wirtschaftlichen Einsatz der Kapillarsperre und kurze Transportwege zu gewährleisten, müssen die erforderlichen Materialien für Kapillarschicht und Kapillarblock vor Ort verfügbar sein. Anhand von Siebkurven wurde aus den in der Umgebung der Deponie Heinersgrund verfügbaren Vorkommen eine Materialkombination ausgewählt.

Das Kapillarschichtmaterial besteht aus einem fluviatil umgelagerten Granitzersatz aus dem Fichtelgebirge. Da in der Umgebung von Bayreuth keine ausgedehnten Kieslagerstätten vorkommen, wurde für den Kapillarblock Basaltbruchmaterial verwendet. Vor dem Einsatz in einem Kapillarsperrensystem wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm durchgeführt, das die Eignung der ausgewählten Materialkombination sicherstellen soll (BAUER 2001).

3.1 Materialparameter

3.1.1 Korngrößenverteilung

Eine erste Beurteilung der Eignung einer Materialkombination für die Verwendung in einer Kapillarsperre kann bereits anhand der Korngrößenzusammensetzung vorgenommen werden. Dazu werden Proben der beiden Kapillarsperrenmaterialien nach DIN 18 123 (1996) trocken gesiebt. Das Ergebnis für das ausgewählte Material ist in Abb. 7 als Kornsummenlinien dargestellt.

Der Verlauf der Kornverteilungskurve des Kapillarblocks deckt sich gut mit den von WOHLNICH & BAUER (1999) und BAUER (2001) nach zahlreichen Laborexperimenten empfohlenen Spannbreiten für Kapillarblockmaterialien und kommt dabei auf der Seite der grobkörnigeren Materialien zu liegen. Die von BAUER (2001) geforderte Ungleichförmigkeit von ≤ 3 ist mit 3,1 nur unwesentlich

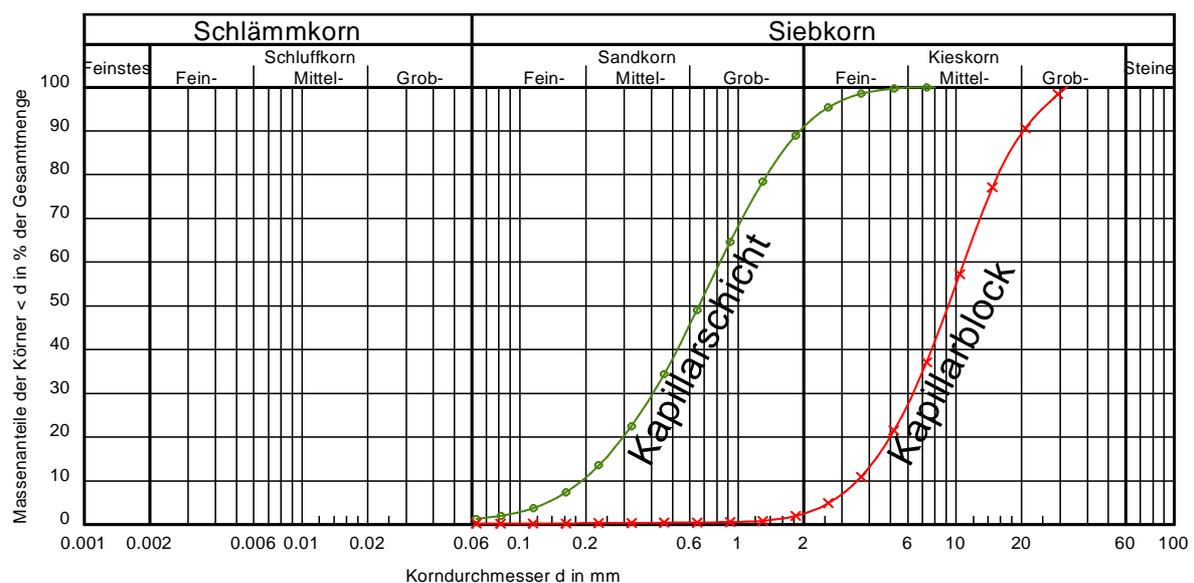


Abb. 7: Summenlinien der Kornverteilung der Kapillarsperrenmaterialien.

überschritten. KÄMPF (2000) ermittelte als maßgebliche Eigenschaft für Kapillarblockmaterialien den Korngrößenanteil von $< 0,5$ mm. Dieser sollte unter 4 % liegen. Beim ausgewählten Kapillarsperrenmaterial liegt dieser Anteil deutlich unter 1 %.

Der Sieblinienverlauf der Kapillarschicht deckt sich ebenfalls gut mit der grobkörnigen Seite der Vorgaben von WOHNLICH & BAUER (1999) für Kapillarschichtmaterialien. Nach neuesten Erkenntnissen, die zur Zeit des Materialauswahlprozesses 1998 noch nicht zur Verfügung standen, ließe sich das Kapillarschichtmaterial vermutlich noch weiter optimieren. Bei BAUER (2001) wurde die Spannbreite für gut geeignete Kapillarschichtmaterialien soweit eingengt, dass der Grobkornanteil des vorliegenden Sandes die Vorgaben übersteigt. Ebenso liegt der Ungleichförmigkeitsgrad von 4,3 über dem geforderten Wert von 3. KÄMPF et al. (2001) machte mittlerweile auch in mehreren Laborexperimenten die Erfahrung, dass weniger grobe Sande etwas höhere Dränkapazitäten ergeben und empfiehlt eine Zusammensetzung zwischen 0,2 und 1 mm Korngröße. Für zukünftige Maßnahmen sollte deshalb auf ein noch steileres Körnungsband mit etwas feinerer Korngrößenabstufung geachtet werden, um nach dem aktuellen Stand der Forschungen ein optimales Kapillarschichtmaterial auszuwählen.

3.1.2 Filterstabilität

Obwohl für spätere Baumaßnahmen der Einsatz eines Geotextils zwischen Kapillarschicht und Kapillarblock geplant war, ist wegen der zeitlich begrenzten Haltbarkeit des Geotextils eine filterstabile Abstimmung der Materialien für eine gesicherte Langzeitstabilität des Aufbaus wichtig. In der Praxis ist für eine filterstabile Dimensionierung die erweiterte Filterregel nach TERZAGHI & PECK (1961) gebräuchlich (PRINZ 1997), da sie auch die Ungleichförmigkeit berücksichtigt:

$$\begin{aligned} \text{Erosionssicherheit: } D_{15}/d_{85} &= 4,2/1,5 = 2,8 \leq \mathbf{4} \\ \text{Durchlässigkeit: } D_{15}/d_{15} &= 4,2/0,27 = 15,6 \geq \mathbf{4} \\ \text{Ungleichförmigkeit: } D_{50}/d_{50} &= 8,9/0,68 = 13,1 \sim \mathbf{10} \end{aligned}$$

mit: D_{XX} Korndurchmesser D bei XX % Massenanteil für die grobkörnigere Schicht
 d_{XX} Korndurchmesser d bei XX % Massenanteil für die feinkörnigere Schicht

Die ausgewählten Kapillarsperrenmaterialien sind somit nach TERZAGHI & PECK (1961) filterstabil.

3.1.3 Korndichte

Die Korndichte (ρ_s) bezeichnet die Masse der getrockneten Festsubstanz und wird zur Berechnung des Porenanteils von Lockergesteinen benötigt. Sie wurde, wegen der einfachen Handhabung, mit dem Luftpyknometer bestimmt. Das Luftpyknometer eignet sich für die Bestimmung der Korndichte von grobkörnigem Material ohne Feinbestandteile (PRINZ 1997). Die ermittelten Werte enthält Tab. 4.

3.1.4 Lagerungsdichte

Nach DIN 18 126 (1996) wurden die Trockendichten (ρ_d) für die lockerste und die dichteste Lagerung, sowie die dazugehörigen Porenanteile (n) bestimmt (Tab. 4).

		Kapillarschicht	Kapillarblock
Körnung	mm	0/4	4/16
Ungleichförmigkeit U		4,3	3,1
Korndichte ρ_s	g/cm ³	2,59	2,89
lockerste Lagerung min ρ_d	g/cm ³	1,46	1,48
größter Porenanteil max n		0,44	0,49
dichteste Lagerung max ρ_d	g/cm ³	1,77	1,81
kleinster Porenanteil min n		0,32	0,37
ges. Durchlässigkeit k_f	m/s	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-2}$

Tab. 4: Ermittelte Kenngrößen für die beiden Kapillarsperrenmaterialien.

3.1.5 Gesättigte hydraulische Durchlässigkeit

Die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit (k_f) für Kapillarschicht und Kapillarblock wurde nach DIN 18 130-1 (1998) in einer Versuchsanlage mit konstantem hydraulischem Druckgradienten bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4 aufgelistet.

3.1.6 Saugspannungs-Wassergehaltsbeziehung

3.1.6.1 Kapillarer Aufstieg

Eine einfache und schnelle Methode zur Bestimmung des kapillaren Aufstiegs ist die Durchführung von Säulenversuchen mit ofentrockenem Material und konstantem, von unten angelegtem, Wasserspiegel (BAUER 2001). Dazu wird in einer Plexiglassäule ein ca. 60 cm hoher Probenkörper lagenweise eingebaut und verdichtet. Anschließend wird die Probe von unten her bei konstantem Wasserstand bewässert. Nach acht Tagen kann nach BAUER (2001) von einem hydraulischen Gleichgewichtszustand ausgegangen werden. Die Probe wird dann in Lagen von 2 cm ausgegraben und der Wassergehalt durch Ofentrocknung ermittelt (DIN 18 121-1 1998). Das Ergebnis ist die Beziehung zwischen Wassergehalt und Saugspannung, wobei die Saugspannung im stationären Zustand gleich dem vertikalen Abstand zur Wasseroberfläche ist (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998). Die Ergebnisse aus Abschnitt 3.1.6.2 legen jedoch nahe, dass bei dem verwendeten Kapillarsperrenmaterial noch bis über 2 m Saugspannung zusammenhängende Kapillaren existieren. Deshalb kann mit dieser Methode nicht die komplette Aufstiegskurve für den Sand untersucht werden. Außerdem führt die Störung des Korngefüges beim Ausgraben der Proben nahe der Sättigung, also in den untersten Zentimetern, zu Wasserverlust (STEINERT 1999). Dieser Bereich ist jedoch für das Verhalten der Kapillarsperre besonders wichtig, da in der Kapillarschicht an der Schichtgrenze zum Kapillarblock häufig relativ starke Sättigung herrscht. Die Säulenversuche eignen sich deshalb vor allem zur schnellen Abschätzung der Kapillarsperreneigenschaften, nicht jedoch zur Parametrisierung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Kapillarschichtmaterials nach VAN GENUCHTEN (1980). Die Ergebnisse der Säulenversuche sind Abb. 8 dargestellt.

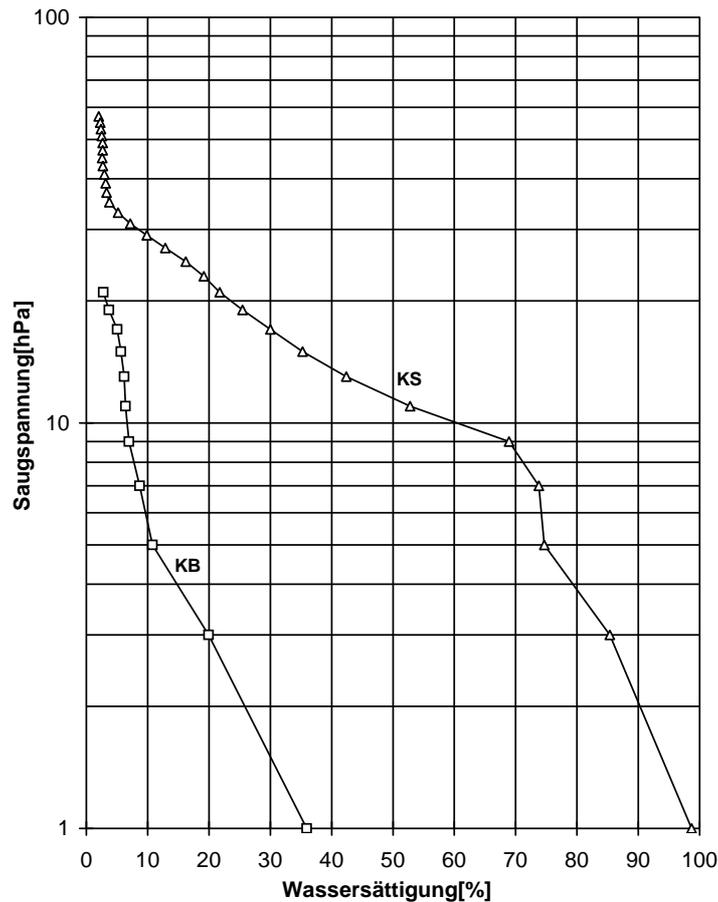


Abb. 8: Aufstiegskurve der Wassergehalts-Saugspannungsbeziehung.

3.1.6.2 Wasserretentionsverhalten

Das Wasserretentionsverhalten, auch pF-Kurve genannt, wird durch gezieltes Entwässern der Probe bestimmt. Dazu wird die Probe, ausgehend vom wassergesättigten Zustand, größer werdenden Saugspannungen ausgesetzt. Nach Erreichen des jeweiligen Gleichgewichtes wird die Probe gewogen und der dazugehörige Wassergehalt nach Versuchsende anhand des Trockengewichtes errechnet. Die verfügbare Versuchsanlage ist für Probenzylinder mit 100 cm^3 ausgelegt. Sie eignet sich deshalb nur für das feinkörnige Kapillarschichtmaterial. Beim Kapillarblock wurde deshalb für die weiteren Berechnungen auf die Ergebnisse aus Abb. 8 zurückgegriffen. Der Verlauf der Retentionskurve für das Kapillarschichtmaterial ist in Abb. 9 aufgetragen.

3.1.7 Ungesättigte hydraulische Durchlässigkeit

Die VAN GENUCHTEN-Parameter wurden, wie in Kap. 2.3.4 beschrieben, durch Kurvenanpassung der Gl. 12 an die Ergebnisse aus Kap. 3.1.6.2 für den Kapillarsand und Kap. 3.1.6.1 für den Kapillarblock ermittelt. Die Anpassung erfolgte rechnergestützt mit der Software Gnuplot 3.7 (WILLIAMS & KELLEY 1999) unter Verwendung der Methode der nichtlinearen kleinsten Quadrate nach MARQUARDT-LEVENBERG. Das für die Kurvenanpassung erstellte Skript ist in Anhang 11.1 aufgeführt. Die Ergebnisse zeigt Tab. 5.

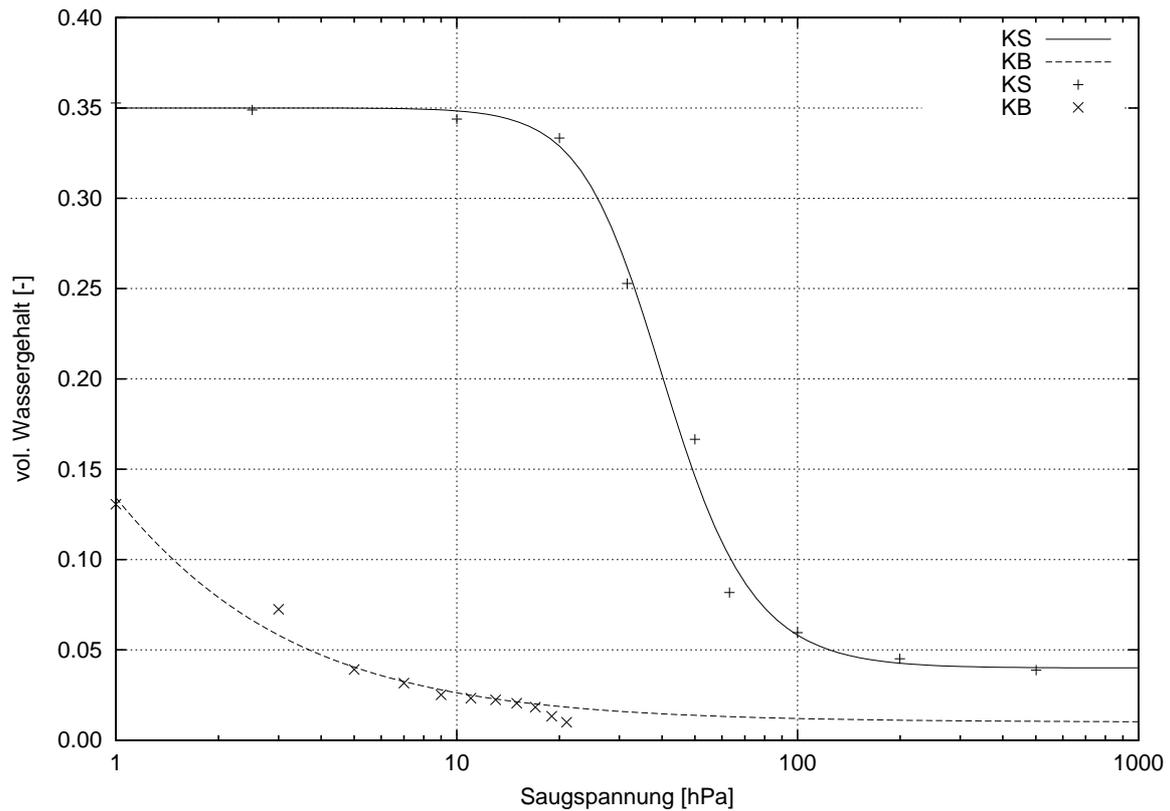


Abb. 9: Saugspannungs-Wassergehaltsbeziehung für das Kapillarschichtmaterial KS aus dem Entwässerungsversuch und für das Kapillarblockmaterial KB aus dem Säulenversuch mit angepassten VAN GENUCHTEN-Funktionen.

Parameter	Einheit	Kapillarschicht	Kapillarblock
θ_r	-	0,04	0,01
θ_s	-	0,35	0,36
α	1/m	2,73	294
n	-	3,81	1,91

Tab. 5: VAN GENUCHTEN-Parameter der Kapillarsperrenmaterialien.

Durch Einsetzen der Werte aus Tab. 5 in Gl. 17 ergeben sich die in Abb. 10 dargestellten Verläufe der ungesättigten hydraulischen Durchlässigkeiten für die beiden Materialien. Die Kurven verdeutlichen, dass nur bei nahezu wassergesättigten Verhältnissen bis zur Saugspannung von 2 hPa die hydraulische Leitfähigkeit des grobkörnigen Kapillarblockmaterials über der des Kapillarschichtandes liegt. Im weiteren Verlauf der Kurven liegt die ungesättigte Leitfähigkeit k_u des Sandes immer mehrere Dekaden über der des Kapillarblocks.

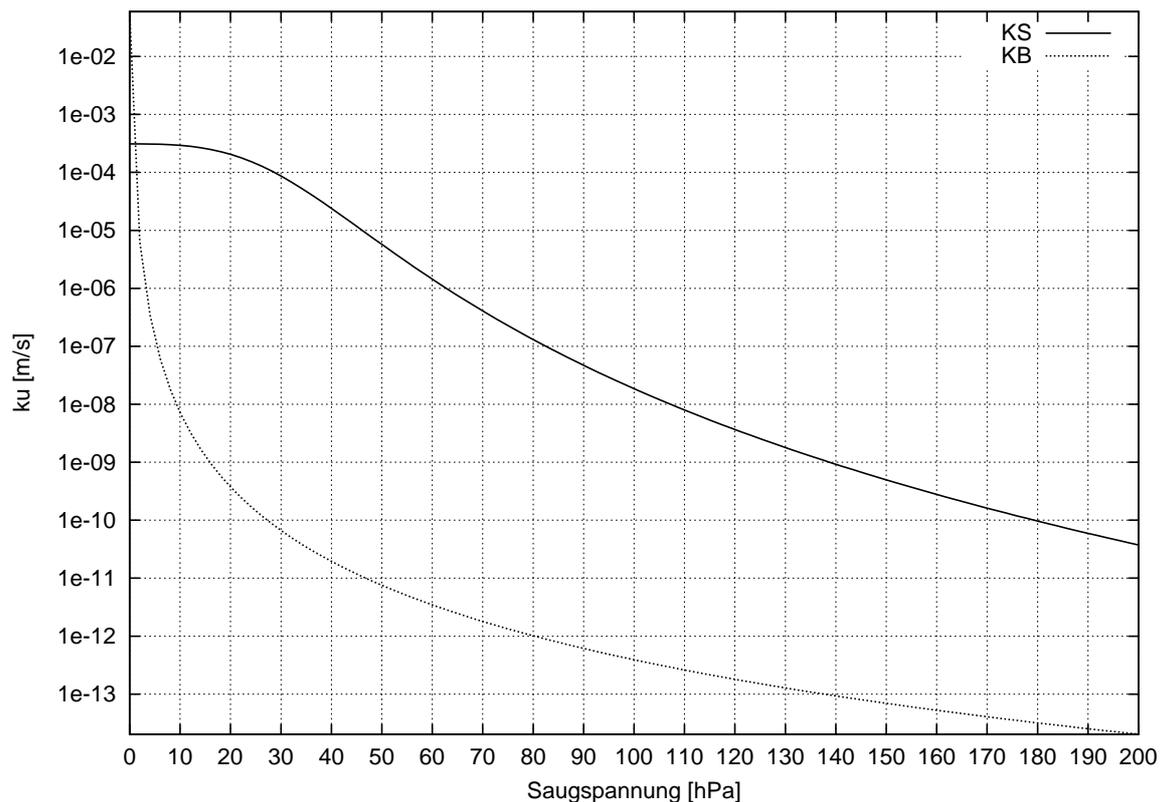


Abb. 10: Nach VAN GENUCHTEN ermittelter Verlauf der ungesättigten hydraulischen Durchlässigkeit für das Kapillarschichtmaterial KS und das Kapillarblockmaterial KB.

3.2 Direkte Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Durchlässigkeit

In Kap. 3.1.7 wurde die Parametrisierung der ungesättigten Durchlässigkeit anhand der Parameter aus der stationären Wasserretentionskurve nach dem empirischen Verfahren von VAN GENUCHTEN (1980) durchgeführt. Bei der Simulation der ungesättigten hydraulischen Strömung können diese rein statisch bestimmten Parameter zu großen Ungenauigkeiten führen (DURNER 1991). Bei der numerischen Modellierung der Kapillarsperre ist häufig eine Überschätzung der Kapillarsperrenwirkung die Folge (GRÄSLE & HORN 1998). Die hydraulischen Funktionen für die ungesättigte Strömung sollten deshalb in einem dynamischen Experiment bestimmt werden (DURNER 1991).

STEINERT et al. (1997) und KÄMPF (2000) parametrisierten die Materialien der Kapillarsperre durch inverse Modellierung von Großrinnenversuchen mit Kapillarsperrenaufbau. Diese Methode hat jedoch mehrere Schwachpunkte. Zum einen liegen nur für relativ große Wassersättigungen aussagekräftige Abflussmessungen vor zum anderen ist das System durch den zweischichtigen Aufbau für die Bestimmung von Basisparametern schon relativ komplex. Vor allem aber sollte eine Methode erarbeitet werden, um die Eignung einer Materialkombination bereits im Vorfeld von aufwendigen Großrinnenversuchen zu ermitteln. Die inverse Modellierung von bereits durchgeführten Großrinnenversuchen für die Parametrisierung kam daher nicht in Betracht.

Zur direkten Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit eignet sich ein instationärer Verdunstungsversuch (PLAGGE 1991).

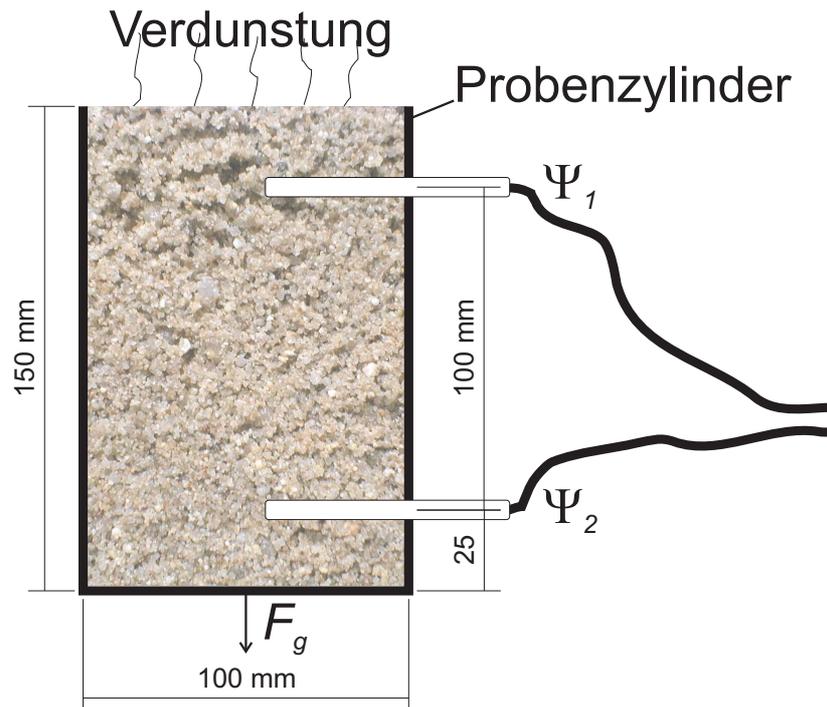


Abb. 11: Versuchsaufbau zur Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit.

3.2.1 Versuchsaufbau

Eine gestörte Kapillarschichtprobe wurde in einen oben offenen Zylinder eingebaut und durch Bewässern von unten her mit entlüftetem destilliertem Wasser aufgesättigt. Vom gesättigten Zustand ausgehend wurde der Probe anschließend durch Verdunstung an der Oberseite Wasser entzogen. Während des Versuches wurden im 10-min-Takt das Probengewicht F_g und die Saugspannungen an zwei Punkten im Probenkörper (ψ_1 und ψ_2) gemessen (Abb. 11). Somit wurden das Potential, das die Wasserbewegung verursacht und zeitgleich der Volumenstrom gemessen. Der Versuch wurde solange durchgeführt bis keine Gewichtsabnahme mehr messbar war. Die Intensität der Verdunstung wurde während des Versuchszeitraumes durch ein Gebläse erhöht.

3.2.2 Versuchsergebnis

Den Verlauf der Wassersättigung im Probenkörper und des Matrixpotentials an den Punkten ψ_1 und ψ_2 zeigt Abb. 12. Der Wassergehalt der Probe verringert sich während des ersten Drittels der Versuchsdauer durch die Verdunstung von Porenwasser relativ schnell. Da mit Abnahme des Wassergehaltes auch die hydraulische Leitfähigkeit abnimmt, wird der Wasseraufstieg zunehmend erschwert und die Verdunstungsrate geht zurück. Durch den abnehmenden Wassergehalt bedingt, verringert sich auch das Matrixpotential am oberliegenden Tensiometer (ψ_1) während das untere Tensiometer (ψ_2) relativ nahe am wassergesättigten Bereich bleibt.

Die Auswertung erfolgte durch inverse numerische Modellierung mit einem in der Arbeitsgruppe Hydrogeologie der Universität München entwickelten finite Element Modell (RUDAKOV 2000). Dabei wurden die Simulationsergebnisse durch Variation der VAN GENUCHTEN-Modellparameter α und n aus Gl. 17 anhand der Saugspannungskurven von Tensiometer 1 und 2 iterativ an die Versuchsergeb-

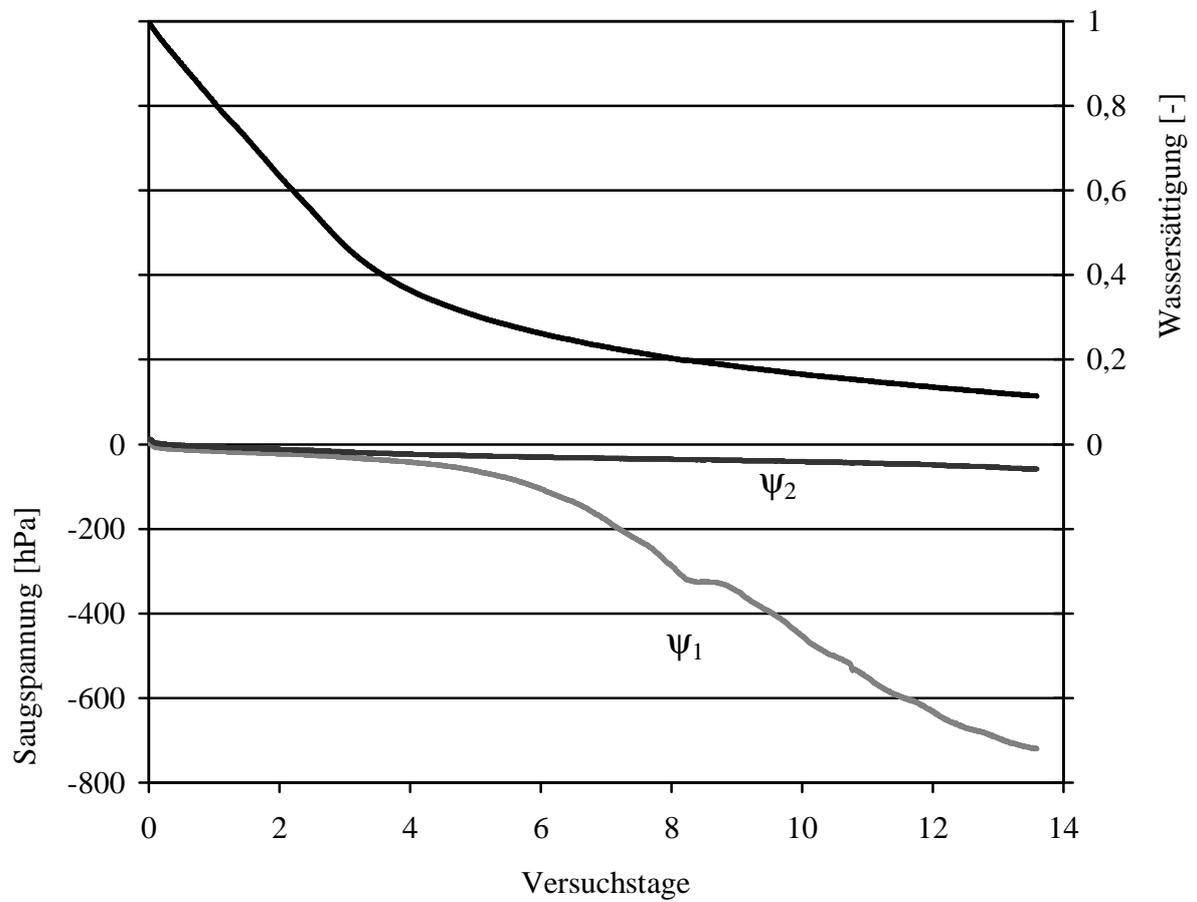


Abb. 12: Verlauf der Wassersättigung und der Saugspannungen während des Versuches.

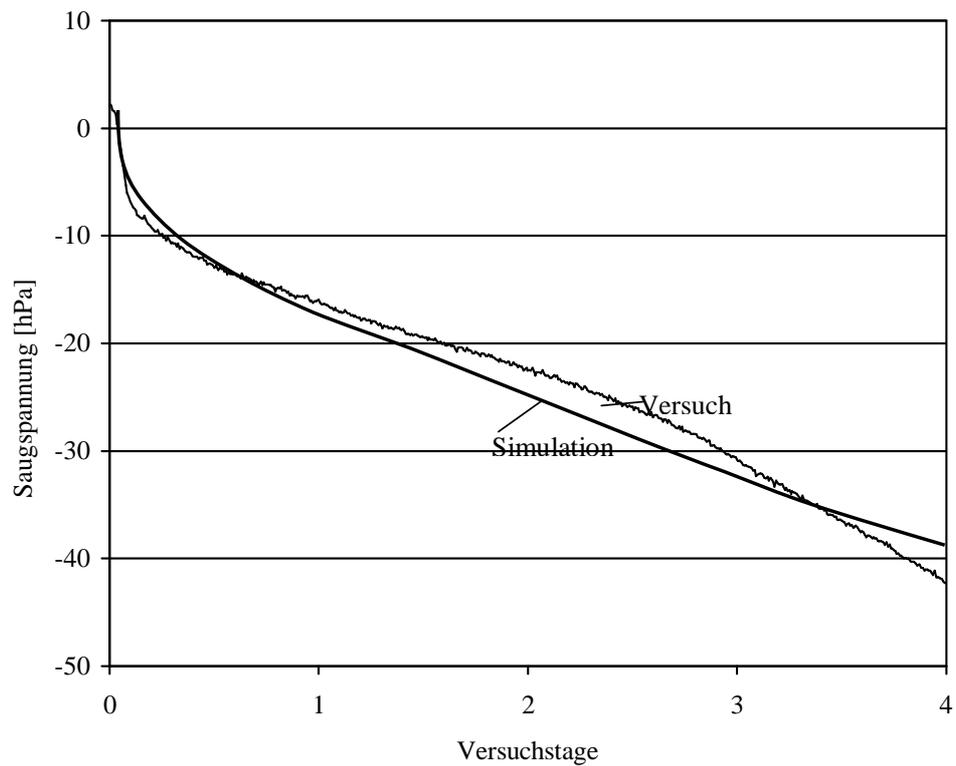


Abb. 13: Modellanpassung an die gemessenen Werte für Tensiometer 1 mit $\alpha = 5,0 \text{ 1/m}$ und $n = 2,1$.

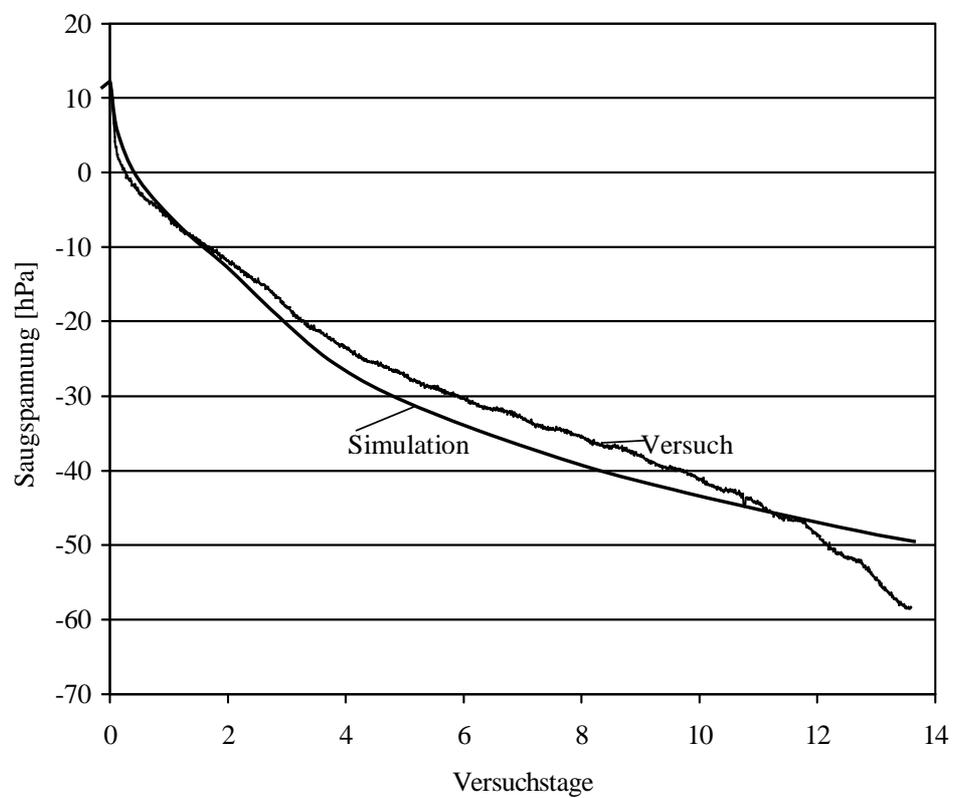


Abb. 14: Modellanpassung an die gemessenen Werte für Tensiometer 2 mit $\alpha = 5,0 \text{ 1/m}$ und $n = 2,1$.

nisse angepasst. Den Kurvenverlauf der Simulation im Vergleich zu den Messwerten zeigt Abb. 13 für Tensiometer 1 und Abb. 14 für Tensiometer 2. Der gesamte Versuchsverlauf konnte im Bereich des steil abfallenden Saugspannungsverlaufes am oberliegenden Tensiometer 1 mit einem Paar von VAN GENUCHTEN-Parametern nicht befriedigend angepasst werden. Deshalb erfolgte die Anpassung für Tensiometer 1 nur in dem, für das Fließverhalten in der Kapillarschicht besonders wichtigen Bereich nahe der hydraulischen Sättigung. Der Saugspannungsverlauf am Tensiometer 2 konnte über die gesamte Versuchsdauer angepasst werden. Die exakteste Kurvenanpassung wurde mit den Werten $\alpha = 5,0 \text{ 1/m}$ und $n = 2,1$ erzielt.

3.3 Großrinnenversuch

Da die Berechnung der Leistungsfähigkeit eines Kapillarsperrenaufbaus aus den in 3.1 bestimmten Eigenschaften der Materialien sowohl mit empirischen als auch mit numerischen Methoden derzeit noch mit einigen Unsicherheiten behaftet ist (GRÄSLE & HORN 1998, KÄMPF 2000), empfiehlt sich für eine genaue Ermittlung der Dränkapazität einer Materialkombination ein Laboraufbau. Dafür hat sich die Verwendung von Großkipprinnen mit mehreren Metern Länge bewährt (v. D. HUDE 1999, KÄMPF 2000, STEINERT 1999, STEINERT et al. 1997). Die Kipprinnenversuche dienen dazu, durch eine von oben aufgebraachte Sickerwassermenge die Belastbarkeit des Kapillarsperrenaufbaus bei einer bestimmten Hangneigung im stationären Fall zu ermitteln. Dazu wird die Sickerwassermenge nach der Einstellung stationärer Verhältnisse schrittweise erhöht, bis ein messbares Versagen der Kapillarsperre auftritt. Das Ergebnis ist die laterale Dränkapazität des verwendeten Kapillarsperrenaufbaus bei der eingestellten Hangneigung.

Die Testmaterialien wurden dazu in eine, der Arbeitsgruppe Hydrogeologie zur Verfügung stehende, Versuchsrinne eingebaut und beregnet. Die Versuchsrinne war aus Platzgründen in einer Halle der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU-München in Obernach, Lkr. Bad Tölz untergebracht. Einbau der Materialien und Betreuung des laufenden Versuches erfolgte in Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern der Versuchsanstalt.



Abb. 15: Die verwendete Großversuchsrinne mit 6,0 m Länge.

3.3.1 Dimensionierung des Großrinnenversuchs

Die Kapillarschicht wurde in den gleichen Abmessungen, wie sie für die endgültige Deponieoberflächenabdichtung vorgesehen war eingebaut. Sie liegt mit einer Mächtigkeit von 50 cm auf einem 15 cm mächtigen Kapillarblock. Die in den Versuchsfeldern eingebaute KB-Mächtigkeit von 30 cm wurde im Hinblick auf die Bauausführung gewählt, um auch bei lokalen Setzungsdifferenzen zusammenhängende Kapillaren zwischen der Kapillarschicht und dem Untergrund des Kapillarblocks auszuschließen. Eine Variation in diesem Bereich hat jedoch, wie Abb. 8 zeigt, kaum Auswirkungen auf die hydraulischen Eigenschaften der Schicht. Die Mächtigkeit konnte deshalb für den Laborversuch auf 15 cm verringert werden.

Die Materialien wurden nacheinander in drei Lagen eingebaut (eine Lage Kapillarblock, zwei Lagen Kapillarschicht). Jede Lage des Schüttgutes wurde mit einer Rüttelplatte verdichtet. Zwischen KS und KB lag ein 3 mm starkes Trenngeotextil in der gleichen Ausführung, wie es auch auf der Deponie zum Einsatz kam. Es wurde zur Verringerung von Randumläufigkeiten an die Rinnenwände angeklebt.

Zur Trennung der Abflüsse aus Kapillarschicht und Kapillarblock wurde im untersten Teil der Rinne durch eine Trennwand ein Entwässerungsgraben mit 15 cm Höhe für das Kapillarschichtmaterial ausgeführt und seitlich abgedichtet. Dadurch wird verhindert, dass die wassergesättigten Bedingungen, die sich an der freien Dränung am unteren Ende des Kapillarschichtsandens einstellen zu einem hydraulischen Durchbruch an der Grenze zum Kapillarblock führen.

Die Versuchsrinne wurde nach vollendetem Einbau der Materialien und der Messtechnik auf die für die Testfelder auf der Deponie vorgesehenen Hangneigungswinkel eingestellt. Einen Überblick über die Dimensionierung des Versuches gibt Tab. 6. Vor Beginn des Versuches wurde die Rinne mit einem Verdunstungsschutz abgedeckt.

Abmessungen der Versuchsrinne	
Länge	6,0 m
Breite	0,6 m
Höhe	1,0 m
Oberfläche	3,6 m ²
Hanglänge der Versuchsfelder	30 m
Neigung Versuch 1	10 % (5,7°)
Neigung Versuch 2	25 % (14,0°)
Kapillarschicht (KS)	
Mächtigkeit	0,5 m
Geotextil	
Dicke	3 mm
Kapillarblock (KB)	
Mächtigkeit	0,15 m

Tab. 6: Aufbau des Großrinnenversuches.

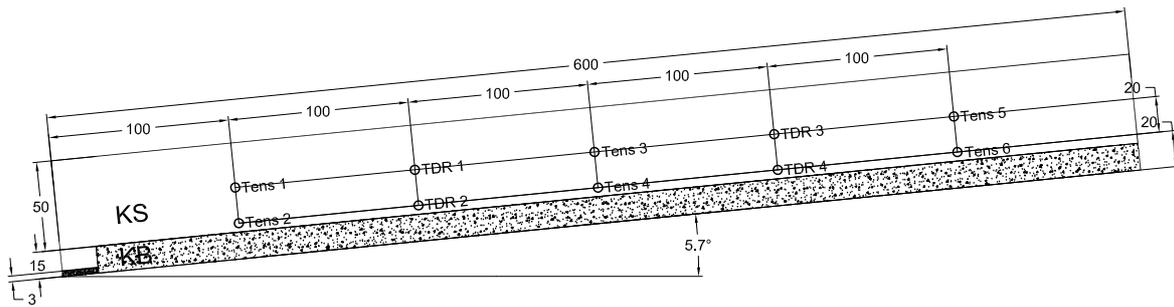


Abb. 16: Skizze des Schichtaufbaus mit Lage der Messfühler am Beispiel der Neigung von 10 %.

3.3.2 Messdatenerfassung

Die Beregnungsmenge wurde durch einen Durchflussmesser bestimmt. Ein Datenlogger zeichnete die Abflüsse aus der Kapillarschicht und dem Kapillarblock kontinuierlich über Wippenniederschlagsmesser als Impulse auf. In der Kapillarschicht sorgten sechs Tensiometer (Tens 1 – Tens 6) mit integriertem Temperaturfühler und vier TDR-Sonden (TDR 1 – TDR 4) für eine genaue Erfassung des Feuchteregimes. Ein weiterer Temperaturfühler zeichnete außerdem die Raumtemperatur auf.

Die Sonden wurden waagrecht durch die Rückwand der Versuchsrinne eingebaut. Die Aufzeichnung dieser Messdaten erfolgte in 15 min Intervallen über ein Bussystem der Firma IMKO auf einem PC. Die Lage der Messfühler im Kapillarsperrenmodell zeigt Abb. 16.

3.3.3 Bewässerung

Die Bewässerung dosierte ein automatisches Beregnungssystem der Firma Gardena, das direkt auf der Oberfläche der Kapillarschicht aufgebracht wurde. Die Bewässerungsmenge wurde für die gesamte geplante Hanglänge der Versuchsfelder auf der Deponie von 30 m berechnet, was bei einer Rinnenbreite von 0,6 m eine zu bewässernde Fläche von 18 m² ergibt. Die im Weiteren für die Versuchsauswertung verwendete Größe mm/d bezieht sich deshalb auf die Oberfläche von 18 m². Da von den 30 m Hanglänge nur die untersten 6 m im Versuch simuliert werden, wurden die Beregnungsdüsen verstärkt im obersten Teil der Rinne aufgebracht, um den Wasserzufluss aus den hangaufwärts liegenden Bereichen zu simulieren. Da für die Durchführung des Versuches die Schichtabfolge ohne die auf den Versuchsfeldern eingebaute Wasserhaushaltsschicht von 1,5 m Mächtigkeit aufgebaut wurde, ist der Einfluss der Wasserhaushaltsschicht rechnerisch ermittelt worden. Dazu diente das Simulationsmodell HELP (SCHROEDER et al. 1994), das speziell für die Berechnung des Wasserhaushaltes von Deponien entwickelt wurde. Es eignet sich auch für die Dimensionierung von Kapillarsperren (VON DER HUDE 2000). Eine genauere Beschreibung der Anwendung des HELP-Modells folgt im Kap. 6.1. Als Randbedingungen für das HELP-Modell werden die Klimadaten Niederschlag, Temperatur, Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit benötigt. Der Datensatz mit Tageswerten für die Jahre 1992 bis 1998 stammte von einer Messstation im Botanischen Garten in Bayreuth. Die Daten wurden vom Bayreuther Institut für Ökosystemforschung (BITÖK) zur Verfügung gestellt. Für die zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannten Eigenschaften der Wasserhaushaltsschicht wurde eine durchschnittliche Bodenart aus schluffigem Sand eingesetzt (Bodentyp 6 aus den HELP Voreinstellungen). Die so prognostizierten Sickerwassermengen stellt Abb. 17 dar.

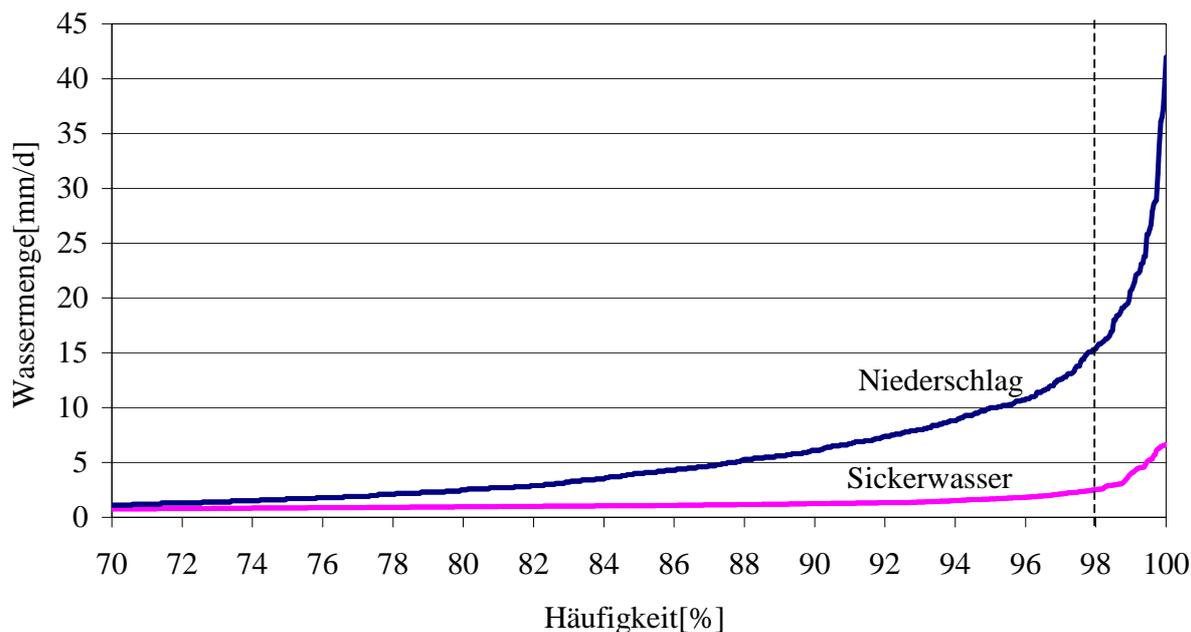


Abb. 17: Häufigkeiten der Tagesmengen von Niederschlag und Durchsickerung durch die Wasserhaushaltsschicht als Ergebnis der HELP-Modellierung.

Die Modellierung ergibt für die Deponie Heinersgrund einen maximalen Sickerwasserandrang von 6,6 mm/d unterhalb der 1,5 m mächtigen Wasserhaushaltsschicht. Es wird in der Praxis jedoch davon ausgegangen, dass das Dichtungssystem seinen Zweck erfüllt, wenn die maximale Durchsickerungsmenge von 98 % der Tage des meteorologischen Beobachtungszeitraumes vom System bewältigt werden. Für die Deponie Heinersgrund bedeutet das, wie Abb. 17 zeigt, dass an 98 % aller Tage des siebenjährigen Beobachtungszeitraumes die Sickerwassermenge von 2,5 mm/d nicht überschritten wird. Die Berechnungsmengen für die Versuche wurden jeweils stufenweise gesteigert. Der im HELP-Modell ermittelte maximale Sickerwasserandrang von 2,5 mm/d wurde dabei als Sicherheitszuschlag deutlich überschritten.

3.3.4 Dränkapazität

Zur Auswertung der Versuchsergebnisse wurde die auf die Kapillarschicht aufgebrauchte Sickerwassermenge in Relation zu der Wassermenge gesetzt, welche an der Basis des Kapillarsblocks abfließt. Das ist die Wassermenge, die in der Praxis bei einem einfachen Dichtsystem in den Deponiekörper eindringen würde. Sie ist in Abb. 18 und Abb. 19 prozentual als Durchgang aufgetragen und bezieht sich jeweils auf die rechte Achse. Zum Vergleich ist die an den unterschiedlichen Versuchstagen aufgebrauchte Sickerwassermenge in mm/d an der linken Achse abzulesen.

Abb. 18 zeigt die Dichtwirkung des ausgewählten Kapillarsperrenaufbaus für die flachere Hangneigung von 10 %, wie sie im Versuchsfeld 1 zum Einsatz kommt. Für die Bemessungsmenge von 2,5 mm/d beträgt die Dichtwirkung nahezu 100 %. Im weiteren Verlauf des Versuches bleibt, bis zu einer Sickerwassermenge von über 4,6 mm/d, der Durchgang durch die Kapillarsperre im Bereich von 1 %. Erst bei der Belastung von 6 mm/d stellen sich kurzfristig Durchgangsraten von über 3 % der Sickerwassermenge ein. Bei der, weit über der zu erwartenden Sickerwasserbelastung liegenden, maximalen Versuchsbelastung von 9,6 mm/d ist das System dann stark überlastet, und es können über

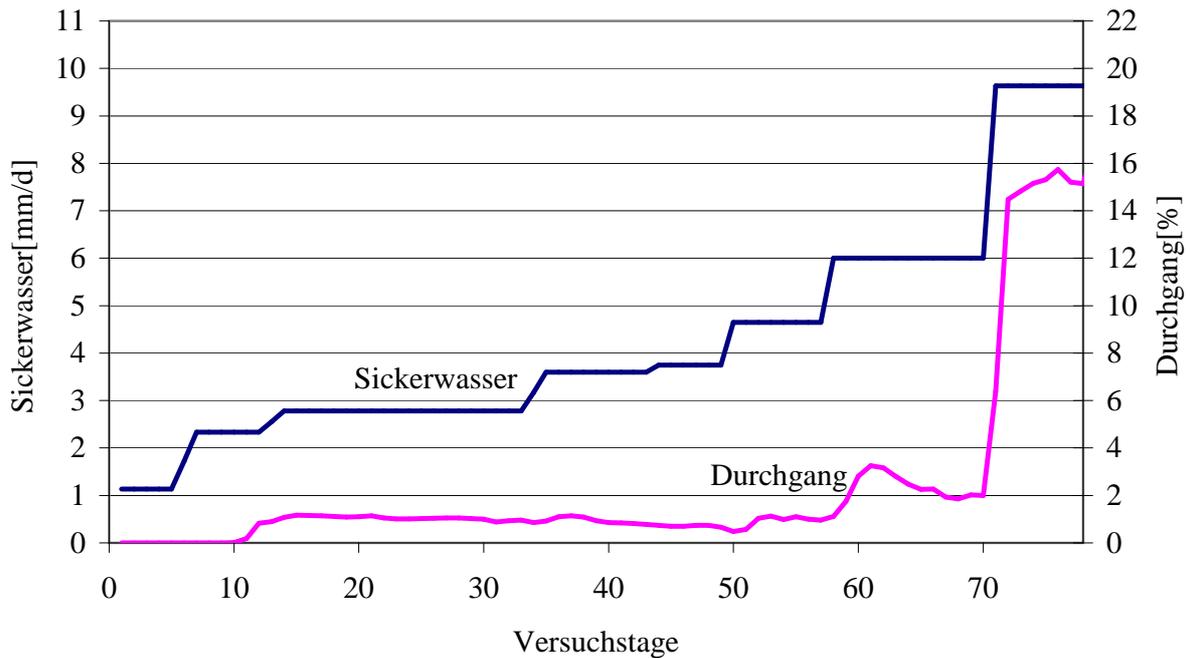


Abb. 18: Dichtwirkung der Kapillarsperre im Versuchstank bei 10 % Neigung.

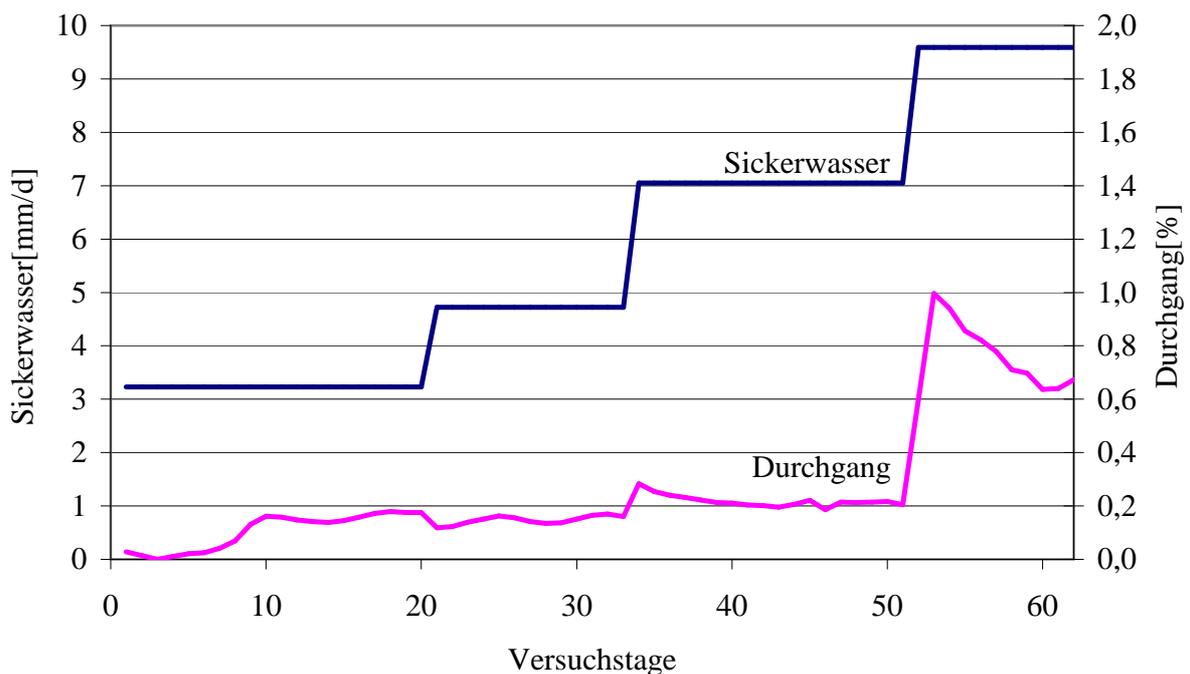


Abb. 19: Dichtwirkung der Kapillarsperre im Versuchstank bei 25 % Neigung.

15 % der aufgebracht Sickerwassermenge über die Schichtgrenze hinweg in den Kapillarblock eindringen.

Der Verlauf des Großrinnenversuches für die steilere Hangneigung von 25 %, wie sie im Versuchsfeld 2 eingesetzt wird, ist in Abb. 19 aufgetragen. Für die zu erwartenden Sickerwassermengen verfügt dieser Kapillarsperrenaufbau ebenfalls über eine Dichtwirkung von nahezu 100 %. Der steilere Aufbau erweist sich jedoch prinzipbedingt bei übersteigerten Sickerwassermengen als noch stabiler, als

der flachere Aufbau aus Abb. 18. Bis zu Sickerwassermengen von 7 mm/d ist der Durchgang von etwa 0,2 % praktisch vernachlässigbar. Erst bei 9,6 mm/d kann etwa 1 % der Sickerwassermenge durch die Kapillarsperre hindurchdringen.

Als einheitliches Maß für die Leistungsfähigkeit von Dränelementen hat sich in der Deponietechnik die Angabe der lateralen Dränkapazität durchgesetzt. Da auch die Kapillarsperre als Dränelement angesehen werden kann eignet sich auch hierfür die Angabe der lateralen Dränkapazität in der Maßeinheit Liter pro Tag und Meter Böschungsbreite ($l \cdot d^{-1} \cdot m^{-1}$). Der Wert der lateralen Dränkapazität ist abhängig von der Hangneigung und den Materialeigenschaften aber unabhängig von der Böschungslänge (GARTUNG & NEFF 2000). Die Abschlagslänge zwischen zwei Wasserfassungen bzw. zwischen der Wasserfassung und der Böschungsschulter, darf maximal so groß gewählt werden, dass an der Dränung die laterale Dränkapazität durch Akkumulation der Sickerwassermenge über die Böschungslänge nicht überschritten wird.

Unter der Annahme eines maximal zulässigen Sickerwasserübertrittes von 1 % des gesamten Sickerwassers in den Kapillarblock ergeben sich aus den Großrinnenversuchen folgende laterale Dränkapazitäten für die beiden Versuchsanordnungen:

Hangneigung 10 %: $140 \frac{l}{d \cdot m}$

Hangneigung 25 %: $290 \frac{l}{d \cdot m}$

Diese Ergebnisse liegen im Rahmen der Erfahrungen aus anderen Untersuchungen für gut abgestimmte Kapillarsperrenmaterialien (KÄMPF 2000, STEINERT 1999). Die Kapillarsperreneigenschaften der ausgewählten Materialkombination liegen somit über den Anforderungen für den Versuchsfeldbetrieb. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Kapillarsperre nach baustellenmäßigem Einbau diese Werte nicht mehr erreicht. Die beiden getesteten Kapillarsperrenaufbauten sollten aber auf jeden Fall geeignet sein, die am Standort Bayreuth zu erwartenden Niederschlagsmengen abzuführen. Darüberhinaus ist zu erwarten, dass das Dichtsystem noch über ausreichende Reserven verfügt, um auch die bei Extremereignissen auftretenden Wassermengen zu bewältigen.

4 Bau der Versuchsfeldanlage

Zur Durchführung der Feldversuche wurden im Zeitraum Frühjahr-Sommer 1999 zwei etwa 2000 m² große Versuchsfelder mit integrierten Großlysimetern mit je 20 m Breite und 30 m Hanglänge errichtet und anschließend mit den Einrichtungen zur Messdatenerfassung ausgestattet.

4.1 Konstruktion der Versuchsfelder

Die Deponie Heinersgrund wurde im Gelände als Erhebung aufgeschüttet. Ihre Oberfläche hat eine langgestreckte Form und kann grob in einen Nordwest- und einen Südostabhang unterteilt werden. Der Südostabhang des Deponiehügels ist mit einer Neigung von ca. 10 % relativ flach und hat eine Hanglänge von ca. 200–300 m (Abb. 1, Bereiche ohne Böschungsschraffur). Er wird durch das Versuchsfeld 1 repräsentiert. Für die Abdichtung mit einer Kapillarsperre wären hier mehrere Zwischendrains notwendig. Der Nordwestabhang ist mit einer Neigung von ca. 25 % relativ steil und hat eine Hanglänge von ca. 30–40 m (Abb. 1, Bereiche mit Böschungsschraffur). Er wird durch Versuchsfeld 2 repräsentiert und könnte später ohne Zwischendrains entwässert werden. Das Relief der Deponie kann sich allerdings bis zum Bau der endgültigen Abdichtung noch verändern.

4.1.1 Untergrund der Versuchsfeldstandorte

Um eine möglichst genaue Kenntnis von den Versuchsbedingungen zu erhalten, wurde zunächst die bereits vorhandene temporäre Oberflächenabdeckung vor Beginn der Bauarbeiten im Bereich der geplanten Versuchsfelder durch Sondierbohrungen erkundet. Die Abdeckung besteht aus schluffigem bis feinsandigem Erdaushub mit eingelagerten Bauschuttanteilen. Die Bohrprofile zeigen, dass die Mächtigkeit zwischen 0,5 m im Bereich von Versuchsfeld 2 und bis zu 7 m in der Umgebung von Versuchsfeld 1 variiert. Die hohe Mächtigkeit in diesem flachen Deponieabschnitt ist auf die Deponierung von größeren Mengen schwach kontaminierten Erdaushubs zurückzuführen, mit dem zusätzlich die Deponieoberfläche angeglichen wurde.

4.1.2 Einrichtung des Versuchsfelduntergrundes

Zuerst wurde der bereits auf der Oberfläche vorhandene Bewuchs entfernt. Danach wurden über die gesamten Flächen der Versuchsfelder einheitliche Neigungen hergestellt. Für die Funktion der Kapillarsperre ist eine konstante Hangneigung nicht erforderlich. Allerdings sollten dadurch möglichst reproduzierbare und auf andere Standorte übertragbare Versuchsbedingungen geschaffen werden. Das bereits beschriebene Untergrundmaterial konnte für das Anlegen einer Ausgleichsschicht weiterverwendet werden. Der Antransport von zusätzlichem Material war deshalb nicht erforderlich. Für das Versuchsfeld 1 wurden die ursprünglich geplanten 10 % Hangneigung eingehalten. Für das Versuchsfeld 2 jedoch musste aufgrund der Geländesituation von den geplanten und den Vorversuchen (Kap. 3.3) zugrundeliegenden 25 % auf 26 % Hangneigung ausgewichen werden. Im Bereich der beiden Großlysimeter wurde eine ca. 20 cm mächtige Feinsandschicht als Auflager aufgebracht. Dadurch wird die Kunststoffdichtungsbahn der Lysimeteruntergrenze vor Beschädigung durch scharfe Kanten im Untergrund geschützt.

4.1.3 Kapillarblock

Bei einem geringdurchlässigen Untergrund unter der Kapillarsperre, wie er hier vorliegt, muss mit Stauwasseransammlungen an der Untergrenze des Kapillarblocks gerechnet werden. Ein Kapillarkontakt zwischen dem Untergrund und der Kapillarschicht muss, zur Sicherstellung des Kapillarsperreneffektes, durch den Kapillarblock zuverlässig unterbrochen werden. Deshalb ist die Mindestmächtigkeit des Kapillarblocks größer als dessen kapillare Aufstiegshöhe.

Für den Kapillarblock ergab sich somit aus den Voruntersuchungen (Kap. 3.1.6.1) eine Mindestmächtigkeit von 15–20 cm. Um jedoch durch die geplanten Kontrolleinrichtungen im Lysimeterbereich, durch Toleranzabweichungen beim Planum sowie durch kleinräumige Setzungsdifferenzen die Funktion nicht zu gefährden, wurde die Schichtmächtigkeit auf 30 cm erhöht.

Aufgeschüttet wurde das Material mit einer Raupe vor Kopf. Ein Hydraulikbagger mit Teleskoparm und Böschungsschaufel verteilte das Material dann in der geforderten Einbaumächtigkeit. Um die Kapillarblockoberfläche nicht zu zerfurchen, wurde er mit breiten Ketten ausgestattet. Mit dem Bagger konnte die Kapillarblockoberfläche bereits relativ glatt abgezogen werden. Die Oberflächenlage wurde, wie auch bei allen weiteren Schichtoberflächen, durch lasergestütztes Nivellement kontrolliert. Letzte Unebenheiten wurden nach diesem Arbeitsschritt von Hand beseitigt (Abb. 54 im Anhang). Für die Genauigkeit der Oberfläche wurde eine Toleranz von ± 2 cm vorgegeben. Die Kontrolle der Oberflächengenauigkeit erfolgte durch die Nivellierung sowie durch Auflegen einer 3 m Messlatte. Das Aufbringen weiterer Schichten durfte erst nach einer Sichtkontrolle durch die Bauleitung oder die wissenschaftliche Begleitung erfolgen.

Für die Herstellung von größeren, über den Versuchsfeldmaßstab hinausgehenden Deponiebauabschnitten, ist das Nacharbeiten von Hand mit großem Zeitaufwand verbunden. Abhilfe kann ein oberflächenschonendes maschinelles Verfahren zum Angleichen der Kapillarblockoberfläche bieten. Der Einsatz von Pistenraupen (JELINEK 1997) oder das Abziehen mit einem, am langen Ausleger eines Löffelbaggers aufgehängten Schlitten (JELINEK & AMANN 2001) haben sich dafür bereits bewährt. Eine rationelle Verarbeitung vor Ort verspricht auch der Einsatz von Kapillarblockbahnen, ein in Kunststofffasern vernähtes Kapillarblockmaterial, das auf der Deponie ausgerollt werden kann (VON DER HUDE et al. 2001). Allerdings muss man sich dafür auf minimale Kapillarblockmächtigkeiten beschränken. Insbesondere nach altersbedingtem Verlust der Reißfestigkeit der Kunststofffasern ist bei Setzungen an der Deponieoberfläche die Unterbrechung des Kapillarblocks zu befürchten.

Die Verdichtung des Materials erfolgte bereits beim Einbau durch das Befahren mit dem Baugerät. Dadurch konnte eine ausreichende Tragfähigkeit und Stabilität der Schicht erreicht werden. Zusätzliches Verdichten mit einer Walze hat sich nicht bewährt, da das Material dann stark lateral ausweicht.

Während der Bauarbeiten musste sichergestellt werden, dass das angelieferte Material in seinen Eigenschaften nicht wesentlich von dem Material aus den Voruntersuchungen abweicht.

Die Qualität des angelieferten Materials wurde anhand von Siebanalysen kontrolliert. Dazu wurden Proben aus der Halde vor Ort entnommen. Um einbaubedingte Entmischungseffekte auszuschließen, wurde zudem der eingebaute Kapillarblock beprobt. In Abb. 20 sind die Kornverteilungskurven von Proben des eingebauten Kapillarblockmaterials dargestellt. Die Kornverteilungen zeigen eine geringe Streuung und geringfügig feinere Körnung als das Material aus den Voruntersuchungen (Abb. 7). Ein negativer Einfluss auf die Kapillarsperrenwirkung ist dadurch jedoch nicht zu befürchten.

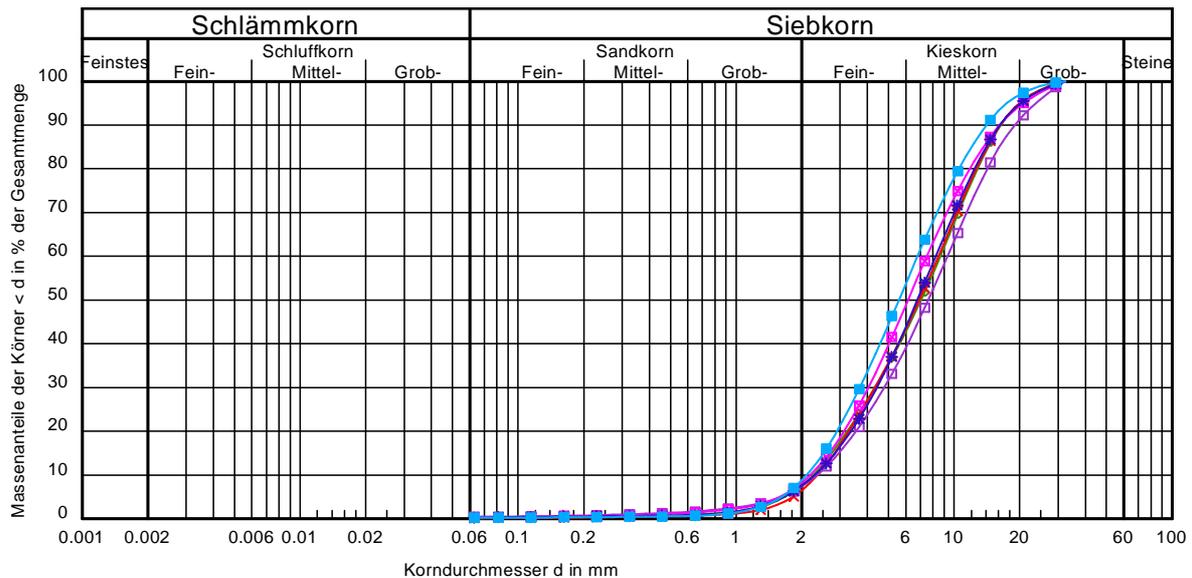


Abb. 20: Kornsummenverteilung des eingebauten Kapillarblockmaterials.

4.1.4 Geotextil

Eine geotextile Trennlage zwischen Kapillarschicht und Kapillarblock ist wegen der filterstabilen Abstimmung der Materialien (siehe 3.1.2) für die Funktion der Kapillarsperre nicht erforderlich. Sie beschleunigt allerdings den Baufortschritt, da damit weniger Sorgfalt auf eine sauber getrennte Schichtgrenze verwendet werden muss. Eine scharfe Trennung ist auf jeden Fall gewährleistet.

Nach den Untersuchungen von BALZ et al. (1999) und BAUER (2001) hat die Verwendung eines hydrophoben Geotextils zusätzlich den Vorteil, dass die Kapillarsperrenwirkung unterstützt wird. Dieser Effekt sollte vor allem in der kritischen Anfangsphase des Betriebes, solange sich noch keine Vegetation ausgebildet hat, von Nutzen sein. Bei der Auswahl des Geotextils wurde deshalb auf hydrophobes Verhalten geachtet.

Das Aufbringen des Geotextils erfolgte in Handarbeit durch Ausrollen auf der Kapillarblockoberfläche. An den Stößen wurde auf eine Überlappung von 15 bis 30 cm geachtet. Durch das Begehen entstandene Fußabdrücke im Kapillarblock mussten von Hand nachgebessert werden.

4.1.5 Kapillarschicht

Die Kapillarschicht wurde, wie der Kapillarblock, mit einer Raupe vor Kopf aufgeschüttet. Dabei war darauf zu achten, dass die Baufahrzeuge nur bereits aufgeschütteten Feinsand mit mindestens 10 cm Mächtigkeit befahren, um die Oberfläche des Kapillarblocks nicht zu beschädigen. Aufgrabungsversuche von JELINEK (1997) haben ergeben, dass die bereits überschüttete Kapillarblockoberfläche unempfindlich gegen Befahren mit Baufahrzeugen ist.

Auf eine, über das Befahren mit Baufahrzeugen hinausgehende, Verdichtung wurde hier ebenfalls verzichtet, da die Kapillarsperreneigenschaften nicht sensitiv auf den Verdichtungsgrad der verwendeten Materialien reagieren. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Kapillarschichtoberfläche sind außerdem geringer als beim Kapillarblock. Die Oberflächengenauigkeit ist für die Funktion des Systems nicht von Bedeutung. Deshalb reicht bei der geforderten Einbaustärke von 50 cm eine Ge-

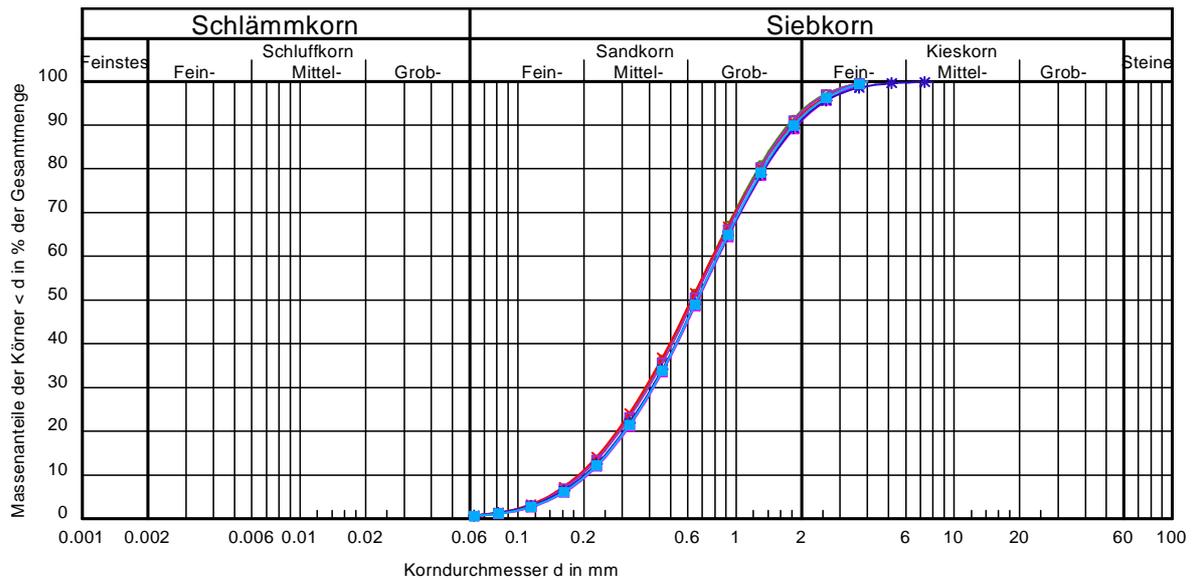


Abb. 21: Kornsummenverteilung des eingebauten Kapillarschichtmaterials.

naugigkeit von ± 5 cm, die durch einfaches Abziehen mit dem Schaufelbagger erreicht werden konnte. Auf ein Nacharbeiten der Oberfläche von Hand wurde verzichtet.

Zur Qualitätskontrolle der Kapillarschicht wurden ebenfalls Siebanalysen von Proben aus der Halde und aus der eingebauten Schicht durchgeführt. Abb. 21 zeigt Kornverteilungskurven von Proben des eingebauten Kapillarschichtandes. Die Kornverteilungskurven der Proben aus dem Versuchsfeld sowie die Kornverteilungskurve aus dem Vorversuch (Abb. 7) sind nahezu identisch.

Witterungsbedingte Verzögerungen des Baufortschrittes während des Einbaus der Kapillarsperre waren seltene Ausnahmen. Hohe Windstärken, wie sie bei MELCHIOR (1993) zu Behinderungen durch Erosion führten, traten nicht auf. Tiefgreifende Erosionserscheinungen während stärkerer Regeneinwirkung auf offenliegende Kapillarschichtflächen waren im Normalfall nicht zu beobachten. Lediglich ein Erosionsschaden in der Kapillarschicht trat auf und musste ausgebessert werden. Er wurde durch oberflächlich abfließende Wassermengen verursacht, die von auf der Kapillarschicht bereits aufgetragenen Haufwerken aus Wasserhaushaltsschichtmaterial aufgestaut wurden. Bei drohendem Niederschlag ist deshalb zu empfehlen, antransportiertes Wasserhaushaltsschichtmaterial auf der Kapillarschichtoberfläche zeitnah anzugleichen. Große frei liegende Flächen aus Kapillarschichtsand überstanden dagegen selbst auf dem steilen Versuchsfeld starke Niederschläge mit nur ein bis zwei Zentimeter tiefen Erosionsrinnen.

4.1.6 Wasserhaushaltsschicht

Hauptaufgabe der Wasserhaushaltsschicht ist es, starke Niederschläge zu puffern und dadurch für einen ausgeglichenen Sickerwasserzufluss zur Kapillarschicht zu sorgen. Darüberhinaus schützt sie die darunterliegenden Schichten vor Erosion durch Wind oder Niederschlag und vor Beschädigung durch Begehung, Befahrung, Durchwurzelung oder Frost. Der bei bindigen Dichtungselementen wichtige Schutz vor Austrocknung ist bei der Kapillarsperre nicht relevant, da sich auch bei sehr geringen Wassergehalten ihre Materialeigenschaften nicht verändern.

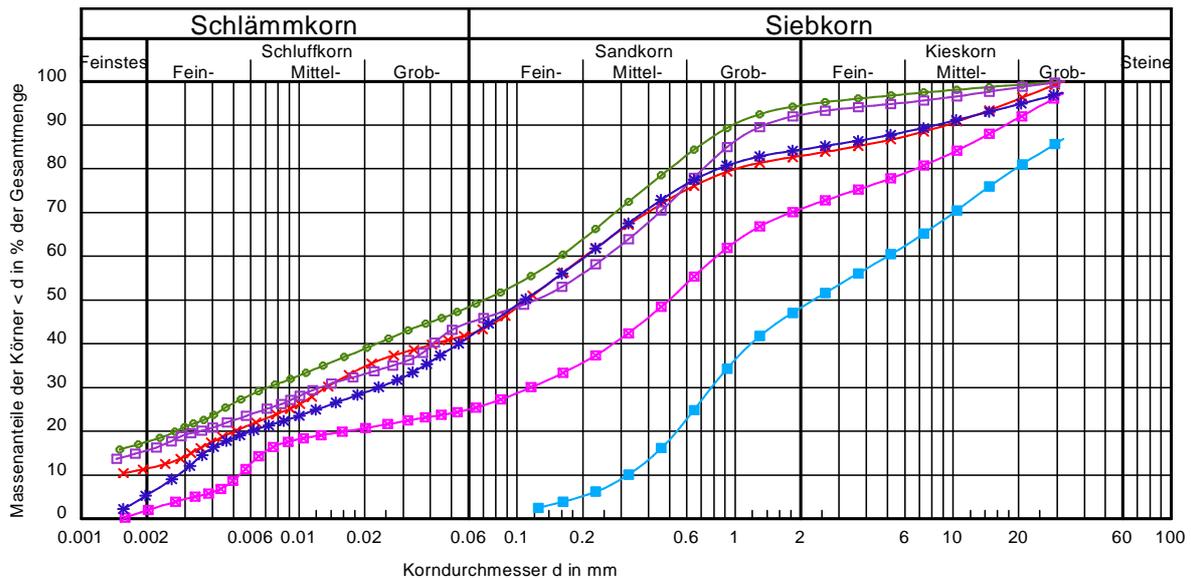


Abb. 22: Kornsummenverteilung von Proben aus der Wasserhaushaltsschicht.

Bindiges Erdaushubmaterial aus zersetzten Keuperschichten fällt in der Umgebung der Deponie bei zahlreichen Baumaßnahmen an und ist deshalb günstig zu beziehen. Qualifiziertes Bodenmaterial hätte dagegen den finanziellen Rahmen des Forschungsprojektes überschritten und erheblichen Transportaufwand verursacht. Daher wurden an das Material für die Wasserhaushaltsschicht bewusst keine besonderen Anforderungen gestellt. In Abb. 22 sind Kornsummenlinien von Proben aufgetragen, die während der Baumaßnahmen aus der Wasserhaushaltsschicht entnommen wurden. Sie weisen ein sehr weit gestuftes Körnungsband mit relativ hohem Schluffanteil auf. Die Streuung spiegelt die Inhomogenität des Materials wider. Die mittlere gesättigte Durchlässigkeit (k_f), ermittelt aus Stechzylinderproben, beträgt $1,7 \cdot 10^{-7}$ m/s. Das Wasserretentionsverhalten zeigt Abb. 23. Die durchschnittliche Feldkapazität (pF 1,8) liegt bei 30 Vol.-%. Der permanente Welkepunkt für das Material wurde an der Universität Bayreuth bestimmt (ZEILINGER 2001) und beträgt im Mittel 19 Vol.-%. Daraus ergibt sich eine nutzbare Feldkapazität von 11 Vol.-%.

Wegen des oft hohen Feinkornanteils der Wasserhaushaltsschicht kann eine Filterstabilität zum darunterliegenden Sand nicht gewährleistet werden. Deshalb wurde über dem Sand in Analogie zu Kap. 4.1.4 zunächst ein Geotextil verlegt.

Das Ausbringen der 1,5 m mächtigen Wasserhaushaltsschicht erfolgte mehrlagig in lockerer Schüttung vor Kopf. Die Verdichtung sollte wegen der Wasserspeicherkapazität möglichst gering gehalten werden. Eine gewisse Kompaktierung durch das Befahren mit Kettenfahrzeugen lässt sich jedoch nicht verhindern.

4.1.7 Wurzelboden

Um die Ausbildung einer Vegetationsdecke zu erleichtern wurde als oberste Schicht etwa 5 cm Wurzelboden aus Klärschlammkompost aufgebracht, der bei der städtischen Abfallverwertung anfällt. Er dient als Nährboden für die darauf aufgebraute Grassaat sowie für angewehtes Saatgut aus der Umgebung. Dadurch konnte die Ausbildung eines Bewuchses an der Oberfläche, im Vergleich zu Stellen mit Erdaushub ohne Kompostbedeckung, erheblich beschleunigt werden. Die Pflanzen schützen den

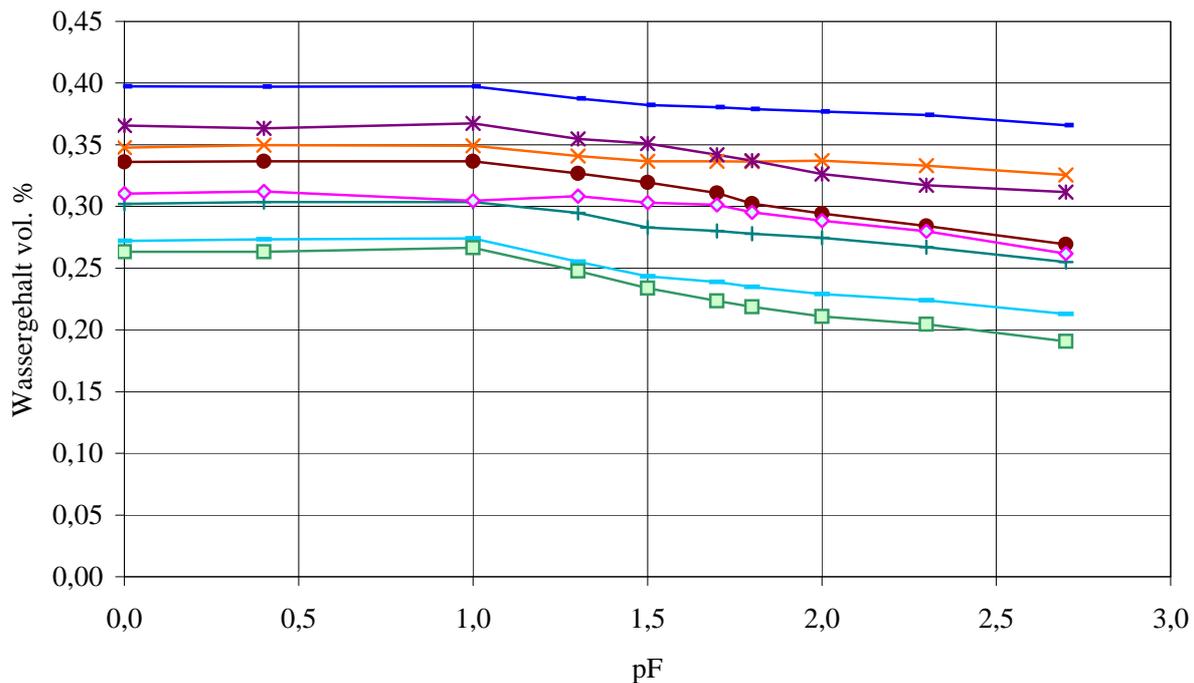


Abb. 23: pF-Kurven verschiedener Proben der Wasserhaushaltsschicht.

Untergrund vor Erosion und erhöhen die Evaporation. Außerdem speichern sie Wasser in ihrem Wurzelraum, was zu einer Verringerung der hydraulischen Belastung der darunterliegenden Schichten führt.

4.1.8 Lysimeter

Zur Bilanzierung der Abflüsse aus den unterschiedlichen Schichten wurde in die beiden Versuchsfelder je ein Lysimeter integriert (Abb. 24). Aufgrund der Größe von je 600 m² handelt es sich dabei um Großlysimeter (DVWK 1980). Die Großlysimeter umfassen 30 m Hanglänge, 20 m Breite und in der Tiefe alle Schichten bis an die Untergrenze des Kapillarblocks. Ein Großlysimeter hat gegenüber einem Kleinlysimeter den Nachteil, dass es nicht wägbare konstruiert werden kann. Speichereffekte können deshalb nicht genau bestimmt werden. Bei Langzeituntersuchungen ist dieser Effekt jedoch vernachlässigbar.

Da die Funktion der Kapillarsperre direkt von der Böschungslänge abhängig ist, ist für praxisrelevante Untersuchungen jedoch eine Hanglänge erforderlich, die an die Abschlagslängen für die geplante Oberflächenabdichtung angelehnt ist. Der Einsatz eines Großlysimeters ist somit unverzichtbar. Ein zusätzlicher Vorteil des Großlysimeters ist, dass aufgrund der großen Gesamtoberfläche der Einfluss der Fehler durch Randeffekte und Inhomogenitäten verringert wird (DVWK 1980).

Die Basis der Lysimeter besteht aus einer 2,5 mm starken HD-PE Dichtungsbahn, deren Oberfläche zur Vermeidung von bevorzugten Gleitflächen beidseitig angeraut ist (Abb. 53 im Anhang). Die Seitenwände und die Drängräben wurden aus 2 mm starker glatter Dichtungsbahn erstellt. Zur Sicherstellung senkrechter Seitenwände wurden stabile Eckbauteile aus 10 mm starken HD-PE Formteilen verwendet. Sie wurden vor Beginn der Arbeiten im Untergrund einbetoniert. Die Seitenwände wurden mit dem Aufbringen der Schichten sukzessive nach oben gezogen und an den Eckteilen angeschweißt.

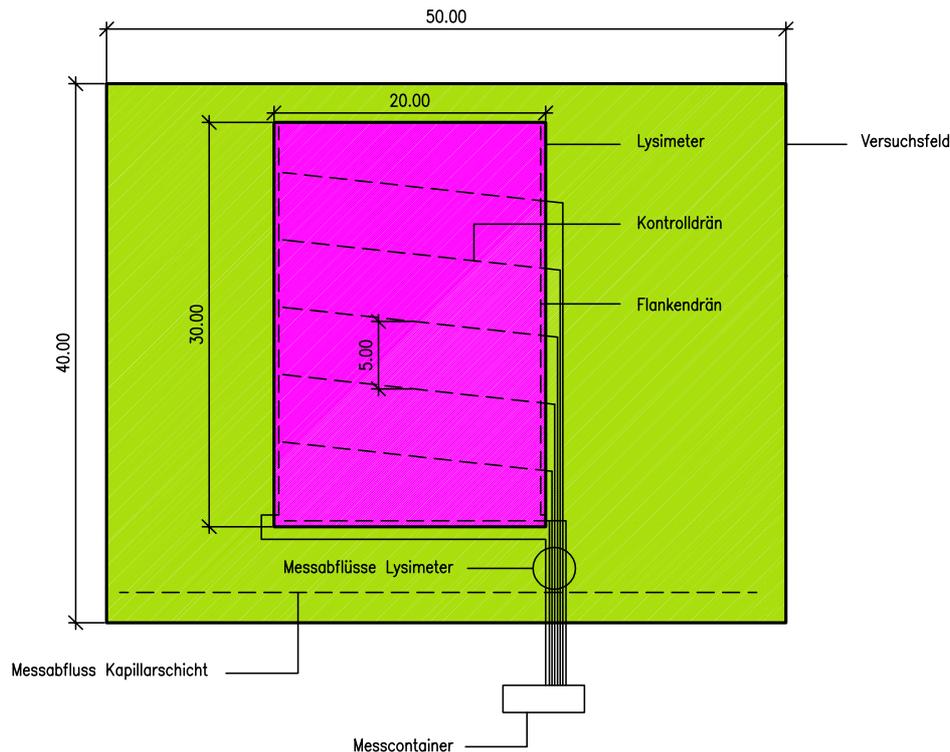


Abb. 24: Aufsicht auf ein Versuchsfeld.

Da die Begrenzung der Lysimeter an den Seiten und an der Basis technisch wasserdicht ist, kann der Wasserzutritt zum Lysimeterbereich nur über die Oberfläche durch Niederschlag erfolgen. Für die Entwässerung der einzelnen Schichten sorgen Dränleitungen (Abb. 25). Die Lysimeter verfügen über separate Dränungen für den Oberflächenabfluss, die Kapillarschicht und den Kapillarblock. Der hangparallele Zwischenabfluss in der Wasserhaushaltsschicht, der sogenannte Interflow, ist von untergeordneter Bedeutung, da diese geringen lateralen Abflüsse nicht ausreichen um die Kapillarsperre merklich zu entlasten (JELINEK 1997, KÄMPF 2000). Auf einen separaten Drän für den Interflow wurde deshalb und aus Kostengründen verzichtet. Er wird im Kapillarschichtabfluss mit erfasst.

Der Oberflächenabfluss wurde in einem kiesgefüllten Graben aus Kunststoffdichtungsbahn an der Lysimeteroberfläche gesammelt, der zur Verbesserung des Querdräns mit einem Dränrohr mit 200 mm Durchmesser ausgelegt war (Abb. 59 im Anhang). Um sicherzustellen, dass der Oberflächenabfluss vollständig erfasst wird und nicht unter die Dichtungsbahn läuft, wurde die Kunststoffdichtungsbahn an ihrem oberen Ende ca. 2 cm unter die Oberfläche der Wasserhaushaltsschicht eingegraben. Direkt auf den Entwässerungsgraben auftreffender Niederschlag führt zu einer Überschätzung des Oberflächenabflusses. Deshalb wurden die stündlichen Messwerte, durch Subtraktion des Niederschlagsanteils korrigiert, der direkt auf die Oberfläche des Entwässerungsgrabens auftraf. Der Korrekturwert wurde durch Extrapolation der im Niederschlagsmesser gemessenen Niederschlagshöhe auf die Grabenoberfläche ermittelt.

Die Schichtwasserabflüsse wurden ebenfalls in Gräben aus Kunststoffdichtungsbahn gesammelt, die Brunnenfilterrohre mit 100 mm Durchmesser dränten. Besonderes Augenmerk erforderte dabei die Entwässerung der Kapillarschicht. Der Übertritt des Sickerwassers aus dem Sand in das Dränrohr erfolgt erst bei annähernd wassergesättigten Bedingungen. Gesättigte Verhältnisse führen jedoch zu einem Versagen der Kapillarsperre. Es ist deshalb erforderlich zwischen dem Tiefpunkt des Entwäs-

serungsgrabens und dem oberen Ende der Kunststoffdichtungsbahn, also dem tiefsten Punkt an dem noch Sickerwasser in den Kapillarblock übertreten kann, einen vertikalen Abstand zu schaffen über den sich wieder eine ausreichende Saugspannung aufbauen kann. Beim Bau der Lysimeter wurde zwischen dem Tiefpunkt des Entwässerungsgrabens und dessen höchstem Punkt auf einen vertikalen Mindestabstand von 50 cm geachtet.

Der Versuchsfeldbereich, der das Lysimeter umgibt, wurde, wie in der praktischen Anwendung der Kapillarsperre später vorgesehen, nur mit einem Drän für die Kapillarschicht ausgestattet.

Das gedränte Wasser wurde aus den Versuchsfeldern in die hangabwärts stehenden Messcontainer geleitet und dort quantitativ und zeitlich aufgelöst erfasst.

In die Lysimeterbasis wurden im Abstand von ca. 5 m Querdräns eingebaut, um im Falle eines hydraulischen Durchbruchs diesen lokalisieren zu können (Abb. 24).

Zur Feststellung des Einflusses der Lysimeterflanken, die ebenfalls aus PE-HD Dichtungsbahnen bestehen, auf das Abflussverhalten im Kapillarsperrensystem wurde am Übergang der Lysimeterflanke zur Lysimeterbasis ein Längsdrän eingebaut, der an den Flanken entlang abfließendes Wasser ableitet.

Alle Dräne für die Schicht und Kontrollentwässerungen wurden separat in Rohrleitungen gefasst und dem, am Hangfuss jedes Versuchsfeldes aufgestellten Messcontainer zugeführt.

4.1.9 Abmessungen der Versuchsfeldanlage

Nach Abschluss der Bauarbeiten wurden die genauen Abmessungen der Versuchsfelder und Lysimeter bestimmt (Tab. 7). Sie weichen aus baupraktischen Gründen etwas von den Sollmaßen der Planungen in Kap. 4 ab.

Die Oberflächen wurden aus einer größeren Anzahl von Messpunkten (siehe Anhang 11.3) genau berechnet und weichen deshalb vom Produkt aus den genannten Längen und Breiten geringfügig ab.

	Versuchsfeld 1	Versuchsfeld 2
Hangneigung	10 % (5,7°)	26 % (14,6°)
Breite Versuchsfeld	42,9 m	38,5 m
Hanglänge Versuchsfeld	30,8 m	29,5 m
Breite Lysimeter	19,6 m	19,2 m
Hanglänge Lysimeter	29,3 m	28,7 m
Oberfläche Lysimeter	572 m ²	567 m ²
Hanglänge Oberflächenentwässerung	1,7 m	1,7 m
Nettooberfläche Lysimeter	539 m ²	534 m ²

Tab. 7: Abmessungen der Versuchsfelder

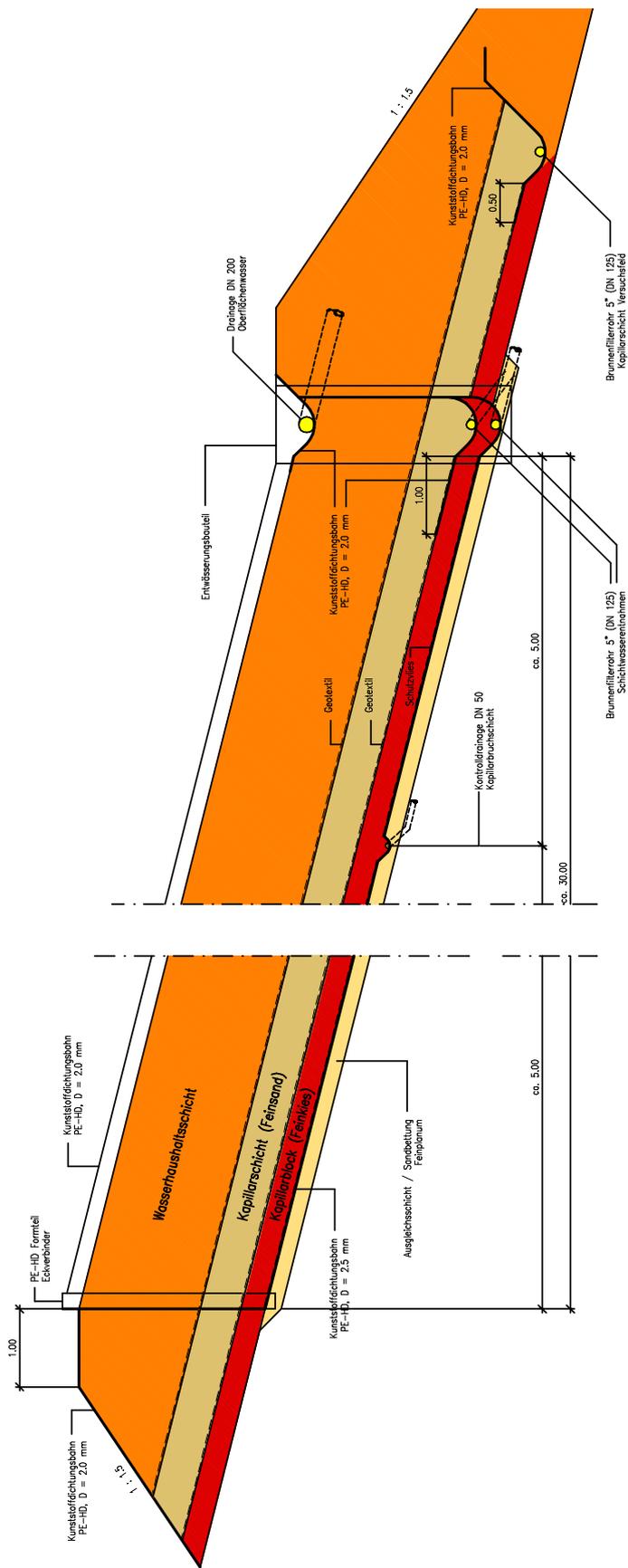


Abb. 25: Längsschnitt durch Versuchsfeld 1 mit integriertem Lysimeter (Sollmaße).

4.2 Messdatenerfassung

4.2.1 Abflussmessung

Das in die Versuchsfelder integrierte Lysimeter ist, wie in Kap. 4.1.8 ausführlich beschrieben, an den Seitenwänden und an der Basis mit Kunststoffdichtungsbahn abgedichtet. Wasser kann also nur über die Geländeoberfläche eintreten bzw. verdunsten oder über die Entwässerungsleitungen kontrolliert abfließen. Die aufgezeichneten Abflüsse erlauben somit in Kombination mit der Niederschlagsmessung das Erstellen einer Wasserbilanz für die Lysimeterbereiche.

Es wurden pro Versuchsfeld vier getrennte Abflussmessungen durchgeführt. Dabei musste zwischen dem Lysimeterbereich und dem umgebenden Versuchsfeldbereich unterschieden werden. Das in die Versuchsfelder integrierte Schichtwasserentnahmesystem zeigt Abb. 25. Das Messsystem besteht pro Versuchsfeld aus:

- Oberflächenabfluss Lysimeterbereich
- Kapillarschichtabfluss Lysimeterbereich
- Kapillarblockabfluss Lysimeterbereich
- Kapillarschichtabfluss umgebendes Versuchsfeld

Bei der Messung der Durchflüsse musste eine extreme Spannweite von unterschiedlichen Abflussraten möglichst exakt erfasst werden. Bei Trockenwetter fließen nur einzelne Tropfen aus den Abflussrohren, die jedoch über längere Zeiträume nicht vernachlässigt werden dürfen. Dagegen lag der größte im Versuchszeitraum gemessene Abflusswert bei $1,73 \text{ m}^3/\text{h}$.

Um sowohl die sehr geringen Abflüsse bei Trockenwetter als auch die starken Abflüsse bei Niederschlagsereignissen sicher zu messen, wurden für die Durchflussmessung Kippwaagen aus zwei Halbschalen mit je fünf Liter Fassungsvermögen verwendet. Eine Halbschale entleert sich dabei durch die Schwerkraft nach Erreichen der Füllung von 5,0l. Dabei wird ein elektrischer Kontakt geschlossen, was im Datenlogger aufgezeichnet wird. Die Durchflusszähler, sind in Abb. 26 zu sehen. Sie wurden zusätzlich mit einer Abdeckung als Spritz- und Verdunstungsschutz ausgestattet.

Die Durchflussmenge der Kippzähler wurde im Mai 2001 nach eineinhalb Jahren Dauerbetrieb neu kalibriert. Die Ergebnisse der Kalibrierung zeigten mit Ausnahme einer Messung auf Anhub befriedigende Ergebnisse. Lediglich der Durchflussmesser des Kapillarblocks von Lysimeter 2 lieferte aufgrund etwas schwergängiger Lager einen Fehler von -8,9%. Der Fehler ist auf die geringen Sommerabflüsse aus dem Kapillarblock im Lysimeter 2 und dadurch bedingte lange Stillstandszeiten zurückzuführen und konnte durch Zerlegen und mehrmaliges Durchdrehen der Lager behoben werden. Da alle Kippwaagen bei den monatlichen Kontrollgängen der Lysimeter auf Leichtgängigkeit geprüft wurden, kann davon ausgegangen werden, dass der Fehler erst im Laufe der Trockenperiode ab April 01 auftrat (Abb. 34) und sich somit nicht auf die Wasserbilanz auswirkt. Insgesamt wird deshalb von einem Messfehler von weniger als 3% bezogen auf das Nennvolumen von 5,00l ausgegangen.



Abb. 26: Das Abflussmesssystem im Messcontainer.

4.2.2 Klimamessung und Wasserhaushalt

Die klimatischen Einflüsse auf die Versuchsfelder wurden von einer automatischen Wetterstation kontinuierlich aufgezeichnet. Sie wurde an einem 2 m hohen Metallmast auf Versuchsfeld 1 aufgebaut (Abb. 27). Die dabei gemessenen Parameter sind Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Globalstrahlung, Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Der Deponiebetreiber unterhält, außer einem Niederschlagsmesser mit unregelmäßiger manueller Ablesung während der Betriebstage der Deponie, keine meteorologischen Messeinrichtungen.



Abb. 27: Mast mit Schalensternanemometer, Sternpyranometer, Gehäuse mit Lufttemperatur-/Luftfeuchtemessung und Windrichtungsgeber (von links nach rechts).

Die Windgeschwindigkeit wurde anhand der Rotationsgeschwindigkeit eines Rotationsanemometers mit dreiflügligem Schalenstern gemessen. Die Messung der Windrichtung erfolgt durch eine rotierende Windfahne. Die Windmessung sollte nach VDI 3786 Blatt 2 in 10 m Höhe erfolgen. Auf setzungsempfindlichem Untergrund und mit einer transportablen Wetterstation ist diese Anordnung allerdings kaum realisierbar. Außerdem ist für die Verdunstungsberechnung die Messung in 2 m Höhe besser geeignet (DVWK 1996). Beide Windsensoren befanden sich deshalb in 2 m über Gelände.

Die Globalstrahlung wurde über ein Sternpyranometer mit weißen und schwarzen Segmenten gemessen. Für die Messung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte wurde ein kombinierter Sensor verwendet, der in einem weißen Lamellengehäuse untergebracht war. Um das Windfeld und die Globalstrahlungsmessung nicht zu beeinflussen erfolgte diese Messung in 1,80 m über Grund.

Der für die Untersuchungen wichtige Wirkungsgrad des Gesamtsystems ergibt sich aus dem Verhältnis der Abflussmenge zur Niederschlagsmenge. Da die Niederschlagsmessung jedoch besonders empfindlich auf Umwelteinflüsse reagiert wird ihr eine besondere Bedeutung beigemessen. Die amtliche Niederschlagsmessung erfolgt nach DIN 58666 und VDI 3786 Blatt 7 über eine Fläche von 200 cm^2 in einer Höhe von 1 m über Gelände. Der in der DIN 58666 beschriebene Hellmann Niederschlagsmesser, der auch vom Deutschen Wetterdienst verwendet wird, eignet sich nur für Handablesung. Da der Versuchsfeldbetrieb jedoch eine automatische Datenerfassung erfordert, wurden statt dessen Niederschlagsmesser vom Typ Seba RG50 eingesetzt. Sie sind äußerlich baugleich mit dem Hellmann Niederschlagsmesser mit 200 cm^2 Auffangfläche, sind aber intern mit einem Kippwaagendurchflussmesser mit Impulsgeber ausgestattet. Für den Winterbetrieb sind die Geräte zusätzlich mit einer Trichterheizung mit 35 W Heizleistung ausgestattet. Die Heizung wird durch einen Bimetallschalter bei Temperaturen von weniger als ca. $+8\text{ }^\circ\text{C}$ aktiviert. Dadurch können jedoch auch erhöhte Verdunstungsverluste auftreten. Die Heizung wurde deshalb zusätzlich über die genauere meteorologische Lufttemperaturmessung geregelt und erst bei Lufttemperaturen unter $+2\text{ }^\circ\text{C}$ in Betrieb gesetzt.

Ein Niederschlagsmesser befand sich in 1 m Höhe über Gelände auf dem Versuchsfeld 1 ein weiterer wurde später für Kontrollmessungen auf Versuchsfeld 2 ebenfalls in 1 m Höhe angebracht. Die Niederschlagsmessung über Gelände ist jedoch, wegen der exponierten Lage, einem erheblichen Windfehler unterworfen, der sich durch die Messung mit einem ebenerdigen Auffangtrichter vermeiden lässt (DVWK 1980, MELCHIOR 1993, SEVRUK 1986, 1989, SOKOLLEK et al. 1989, SUMNER 1988). Der Niederschlagsmesser ist ein relativ großes Messinstrument und stellt deshalb für den Wind ein erhebliches Hindernis dar. Bei bodenparalleler Anströmung erhält das Windfeld beim Umströmen des Niederschlagsmessers eine vom Hindernis weg gerichtete Komponente, die dafür sorgt, dass ein Teil des Niederschlags über den Trichter hinweggetragen wird (FOLLAND 1986, SUMNER 1988). Die Niederschlagsmenge kann deshalb abhängig vom Standort erheblich unterschätzt werden.

Darum wurde auf Versuchsfeld 1 ergänzend ein Niederschlagsmesser unter Flur aufgestellt, so dass der Auffangtrichter ebenerdig positioniert ist. Mittlerweile liegt dazu auch DIN EN 13798 im Entwurf vor. Es hat sich jedoch im Laufe der Messungen gezeigt, dass der Niederschlagsmesser in dieser Anordnung sehr verschmutzungsanfällig ist. Durch Einwehung von Pflanzenteilen sowie durch Insekten kam es in unregelmäßigen Abständen zu Verschlüssen im Abfluss des Auffangtrichters. Eine kontinuierliche Messreihe ließ sich deshalb im unbeaufsichtigten Betrieb auf der Deponie damit nicht aufnehmen. Die fehlerfrei aufgenommenen Niederschlagsperioden eignen sich allerdings für Vergleiche mit den Messungen aus einem Meter über Gelände. Der für Windfehler besonders anfällige Schneeschniederschlag wird von der ebenerdigen Messanordnung ebenfalls nicht korrekt, sondern überschätzt gemessen, da der ebenerdig aufgestellte Trichter für windverfrachteten Schnee einen Windschatten

Niederschlagsart	Temperatur T	b	ϵ
Sommerregen	$T \geq 2 \text{ }^\circ\text{C}$	0,345	0,38
Winterregen	$T \geq 2 \text{ }^\circ\text{C}$	0,340	0,46
Mischniederschlag	$2 \text{ }^\circ\text{C} > T \geq 1 \text{ }^\circ\text{C}$	0,535	0,55
Schneeniederschlag	$T < 1 \text{ }^\circ\text{C}$	0,720	0,82

Tab. 8: Korrekturkoeffizienten für die Niederschlagsmessung in freier Stationslage nach RICHTER (1995).

darstellt. Daher wird auf den umgebenden Flächen liegender Schnee bei Wind bevorzugt im Trichter abgelagert (MELCHIOR 1993). Dieses Problem tritt selbst in niederschlagsfreien Perioden auf, solange noch unverfestigter Schnee in der Umgebung liegt.

Für die Wasserbilanzbetrachtungen wurde deshalb auf den Niederschlagsmesser in 1 m Höhe zurückgegriffen. Zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers, der neben oben genanntem Windfehler auch vom Benetzungsverlust verursacht wird, entwickelte RICHTER (1995) anhand zahlreicher Referenzmessungen mit ebenerdigen Niederschlagsmessern ein Verfahren zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers (Gl. 18). Das Verfahren ist flächendeckend für das Bundesgebiet erprobt und korrigiert die gemessene Niederschlagshöhe in Abhängigkeit von der Windexposition der Messstation, der Niederschlagshöhe und der Niederschlagsart.

$$N_{korr} = N + bN^\epsilon \quad (18)$$

mit: N_{korr} korrigierter Niederschlag in mm/d

N gemessener Niederschlag in mm/d

b, ϵ Korrekturkoeffizienten nach RICHTER (1995) aus Tab. 8

Die Korrekturkoeffizienten sind von der Horizontabschirmung und von der Niederschlagsart abhängig. Die Lage des Niederschlagsmessers auf Versuchsfeld 1 ist aufgrund der geringen Horizontabschirmung als freie Stationslage nach RICHTER (1995) zu bezeichnen. Da die Niederschlagsart bei der automatischen Messdatenerfassung nicht direkt aufgezeichnet wird, wurde die Entscheidung anhand der Tagesmitteltemperatur getroffen. Die zugrundegelegten Temperaturen und die daraus folgenden Korrekturkoeffizienten für eine freie Stationslage sind in Tab. 8 dargestellt.

Aufgrund des, bei geringer Horizontabschirmung, erheblichen, systematischen Messfehlers wurden für Wasserhaushaltsbetrachtungen in der vorliegenden Arbeit ausschließlich die korrigierten Niederschlagswerte verwendet, da sie die tatsächlich auf der Lysimeteroberfläche auftreffenden Niederschlagsmengen am zuverlässigsten repräsentieren.

Zur Beobachtung der hydraulischen Verhältnisse in den Versuchsfeldern wurden Tiefenprofile aus Tensiometern und FDR-Sonden zur Messung von Wasserspannungen und Wassergehalten angelegt.

4.2.3 Datenerfassung und -speicherung

Unterhalb der zwei Versuchsfelder befand sich je ein Messcontainer in dem die zentrale Datenerfassung und die Abflussmessung untergebracht waren. Die Steuerung der Anlage und die Aufzeichnung der Messdaten übernahm je ein Datenlogger. Diese verfügen über Modemanschlüsse und können über Datenfernübertragung bedient und ausgelesen werden. Durchfluss und Niederschlagsmengen wurden aufsummiert und stündlich abgespeichert. Alle anderen Werte wurden alle zehn Minuten gemessen und bereits vor Ort stündlich gemittelt und als Stundenwerte abgespeichert. Die aufgezeichneten Messwerte wurden automatisiert in den Nachtstunden abgeholt, grafisch aufbereitet und webbasiert präsentiert. Dadurch konnten sich alle am Forschungsprojekt beteiligten Mitarbeiter stets über den aktuellen Zustand der Versuchsanlage informieren.

Die für die Messdatenerfassung verwendeten Geräte und deren Hersteller sind im Anhang 11.7 tabellarisch aufgelistet.

5 Ergebnisse der Feldversuche

Für die Auswertung der Lysimetermessungen stand ein Messzeitraum vom 01.01.2000 bis zum 15.12.2002 zur Verfügung. Zum Jahresende 2002 wurde die Messanlage für unbeaufsichtigten Weiterbetrieb über längere Zeiträume umgestellt, da die zum beaufsichtigten Betrieb notwendigen Forschungsmittel ausgelaufen waren.

5.1 Niederschlagsmessungen

Als die zuverlässigste Messmethode für den über lange Zeiträume unbeaufsichtigten Betrieb auf den Versuchsfeldern hat sich die Messung in einem Meter über Gelände erwiesen. Der damit einhergehende systematische Messfehler wurde bereits im Kapitel 4.2.2 erläutert. Für die weitere Diskussion werden deshalb vorwiegend die nach RICHTER (1995) korrigierten Tageswerte der Niederschläge aus einem Meter Höhe herangezogen.

Die gemessenen Niederschläge für den Versuchszeitraum zeigt Abb. 28. Zur besseren Übersicht wurden zusätzlich zu den Tagessummen (schwarze Balken) die Monatssummen (weiße Balken) aufgetragen. Die meisten Niederschläge waren in der zweiten Winterhälfte sowie in den Sommermonaten zu beobachten. Insbesondere die teilweise starken Niederschläge im Februar und März sind im langjährigen Mittel (Abb. 3) nicht erkennbar. Das heißt, dass im Versuchszeitraum in diesen Monaten

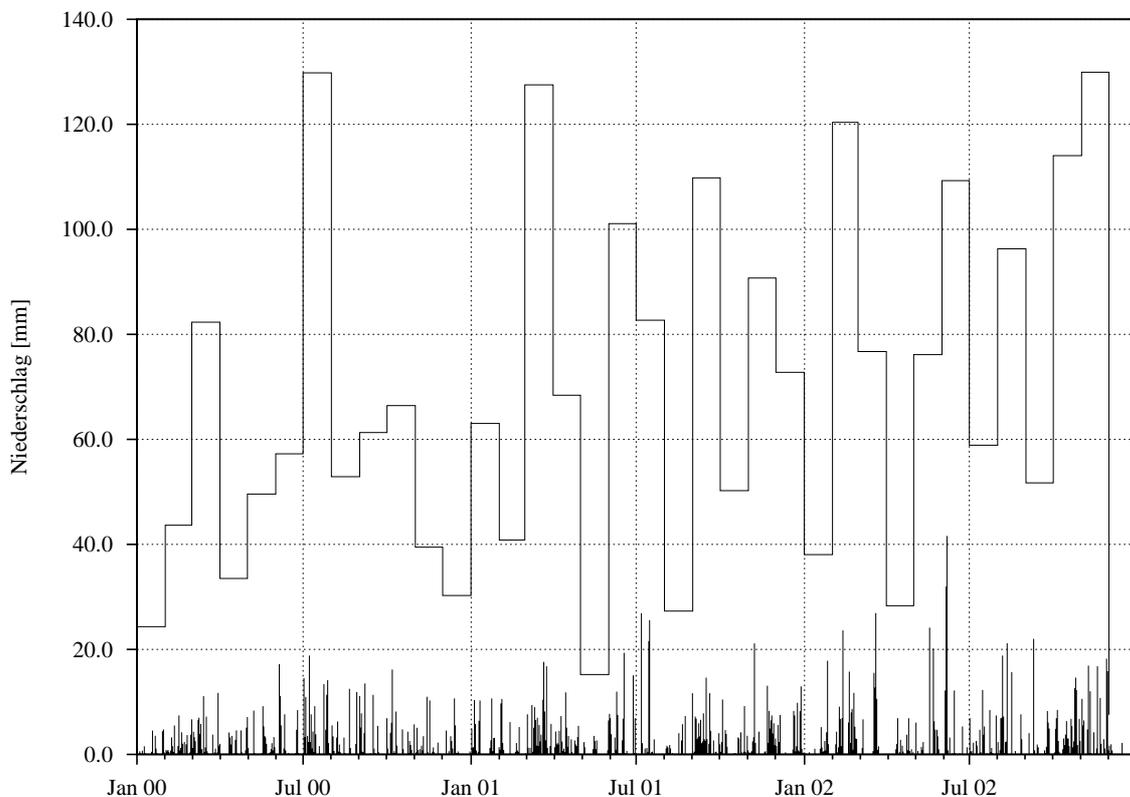


Abb. 28: Nach RICHTER (1995) korrigierte Tages- und Monatssummen der Niederschläge für den gesamten Versuchszeitraum.

überdurchschnittlich starke Niederschläge auftraten. Dagegen sind die erhöhten Niederschläge im Juni und Juli auch im langjährigen Mittel ausgeprägt.

5.2 Abflussmessungen

Die Aufzeichnung der Abflusswerte in der Datenerfassungsanlage erfolgte in m^3/h . Die Auswertung der Messungen als Durchflussmenge, wie sie z. B. von ZISCHAK (1997) anhand der Daten einer anderen Lysimeteranlage durchgeführt wurde, erschwert den Vergleich mit den Ergebnissen der Lysimeteruntersuchungen anderer Bearbeiter, da die Werte von der Größe der Oberfläche der Lysimeter abhängen. Deshalb sollte die Diskussion der Abflüsse anhand von Abflusshöhen pro Zeiteinheit erfolgen, die man durch dividieren der Abflussmenge durch die Lysimeterfläche erhält. Als Einheit wurde, wie auch beim Niederschlag üblich, Abflusshöhe pro Zeiteinheit verwendet. Die Abflusshöhe ist damit unabhängig von der Lysimetergröße und kann direkt mit Messwerten aus anderen Lysimeterversuchen sowie mit der Niederschlagshöhe verglichen werden. Zur besseren Übersicht zeigen die Diagramme der Abflusshöhen zusätzlich zu den Tagessummen die Monatssummen der Abflüsse. Aufgrund der großen Spannbreite der Abflussmengen aus den unterschiedlichen Schichtabflüssen konnte die Abflusshöhe in der grafischen Darstellung nicht mit einer einheitlichen Skalierung dargestellt werden. Die Skalierung der Abflusshöhe wurde zugunsten besserer Lesbarkeit an die Maxima der Messwerte angepasst. Die Zahlenwerte der Monatssummen befinden sich außerdem in Tab. 9.

5.2.1 Oberflächenabfluss

Im ersten Winter nach Fertigstellung der Lysimeter fällt auf, dass im schwächer geneigten Lysimeter 1 relativ große Mengen an der Oberfläche abfließen, während im Lysimeter 2 ein sehr geringer Oberflächenabfluss feststellbar ist. Erwartungsgemäß müsste jedoch der Anteil des Oberflächenabflusses mit der Hangneigung zunehmen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998). Diese Anomalie ist auf die etwas unterschiedliche Vorgehensweise beim Einbau der Wasserhaushaltsschicht zurückzuführen. Zuerst ist das Lysimeter 1 fertiggestellt worden. Dabei wurde die Oberfläche zum Angleichen mit Kettenfahrzeugen befahren und dadurch gleichzeitig etwas kompaktiert. Beim Lysimeter 2 musste jedoch aus Standsicherheitsgründen auf das Befahren fast vollständig verzichtet werden. Die Wasserhaushaltsschicht von Lysimeter 2 wurde deshalb in sehr lockerer Schüttung angefertigt. Daher war der Abfluss auf der bis zu dieser Zeit nur schwach bewachsenen (Abb. 59) kompaktierten Oberfläche von Lysimeter 1 auffallend stark. Nach Ausbildung einer geschlossenen Pflanzendecke und der damit einhergehenden Auflockerung der Oberfläche kehrten sich die Verhältnisse wieder um, da der Oberflächenabfluss von Lysimeter 1 im Verlauf des Versuches deutlich zurückging. Das steilere Versuchsfeld 2 zeigte, abgesehen vom ersten Winter, mehr Oberflächenabfluss als Versuchsfeld 1.

Ab der zweiten Jahreshälfte 2000 ging der sommerliche Oberflächenabfluss beider Lysimeter trotz teilweise erheblicher Niederschläge auf nahezu Null zurück. Am 6. und 7. Juni 2002 stieg der Oberflächenabfluss dann kurzzeitig schlagartig an und erreichte dabei den höchsten im Beobachtungszeitraum gemessenen Tageswert von 6,0 mm. Ursache sind die extremen Sommergewitter die in diesem Zeitraum niedergingen und dabei auch die höchsten Tagesniederschläge des Versuchszeitraumes verursachten.

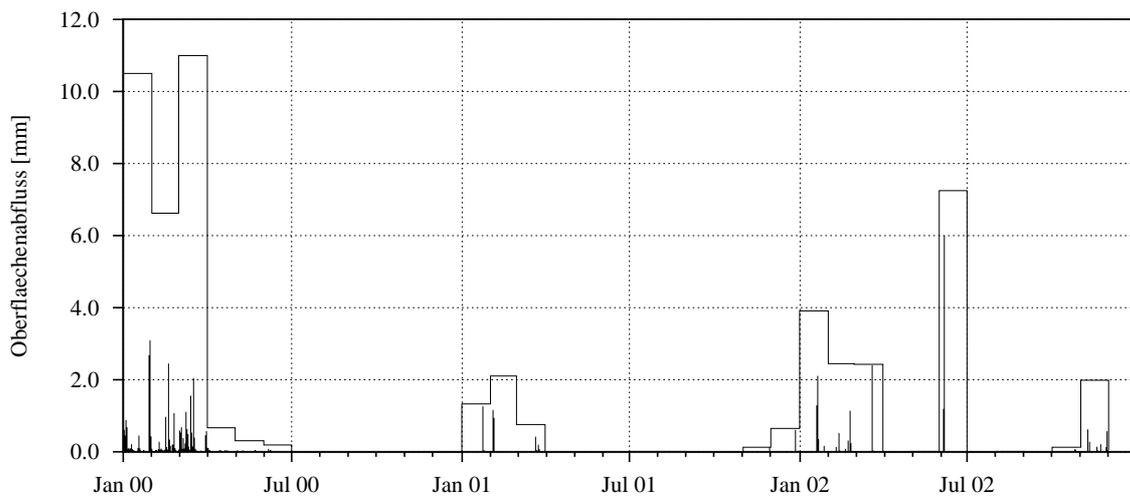


Abb. 29: Oberflächenabfluss von Lysimeter 1.

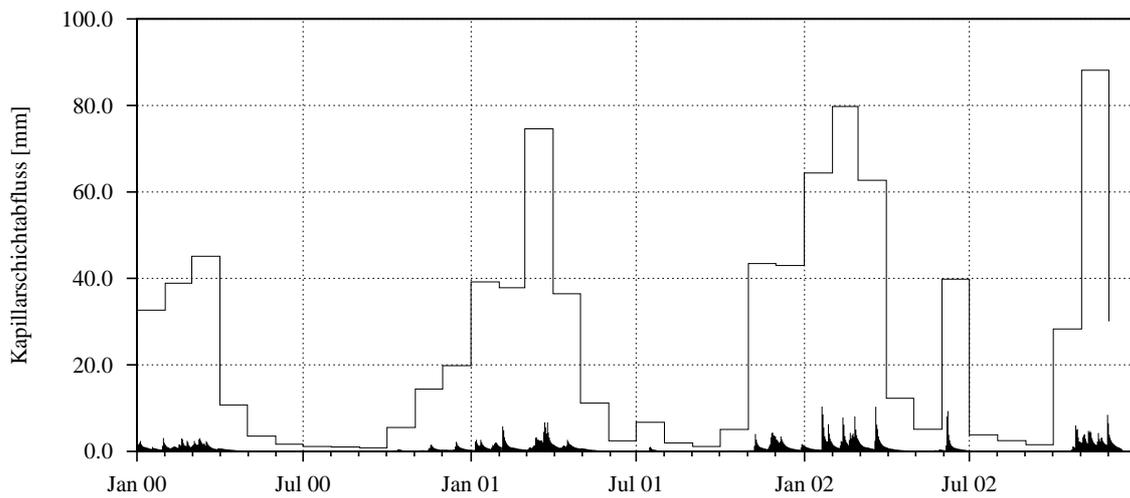


Abb. 30: Kapillarschichtabfluss von Lysimeter 1.

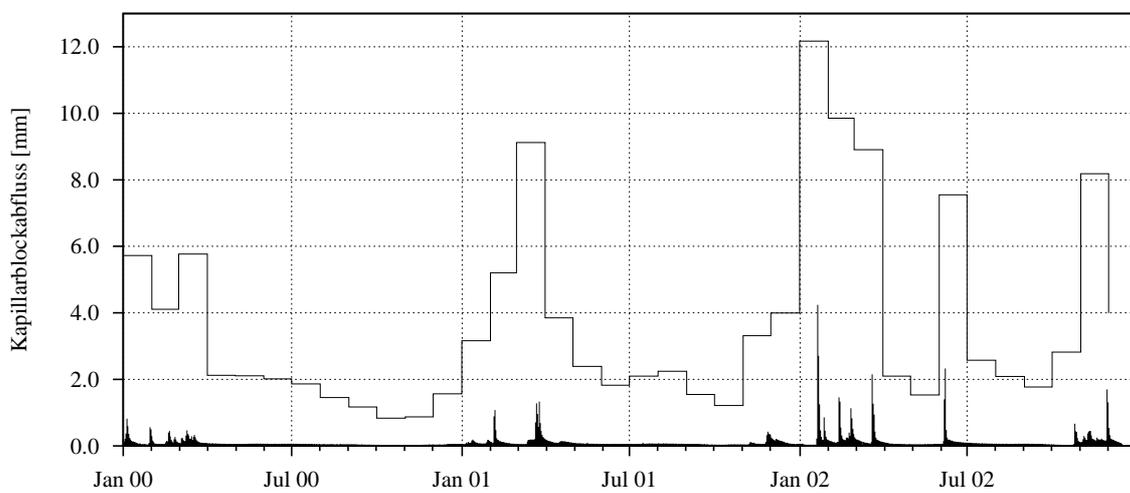


Abb. 31: Kapillarblockabfluss von Lysimeter 1.

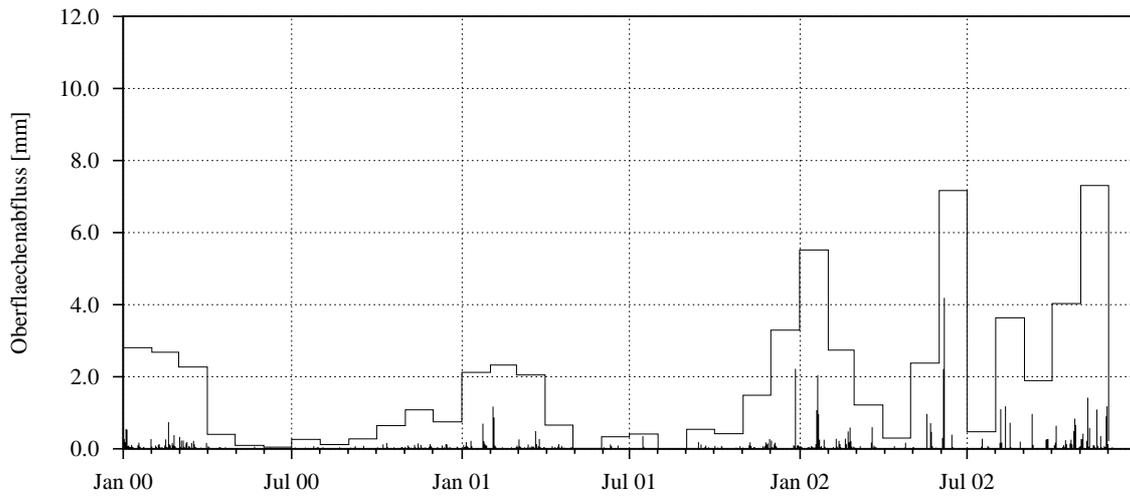


Abb. 32: Oberflächenabfluss von Lysimeter 2.

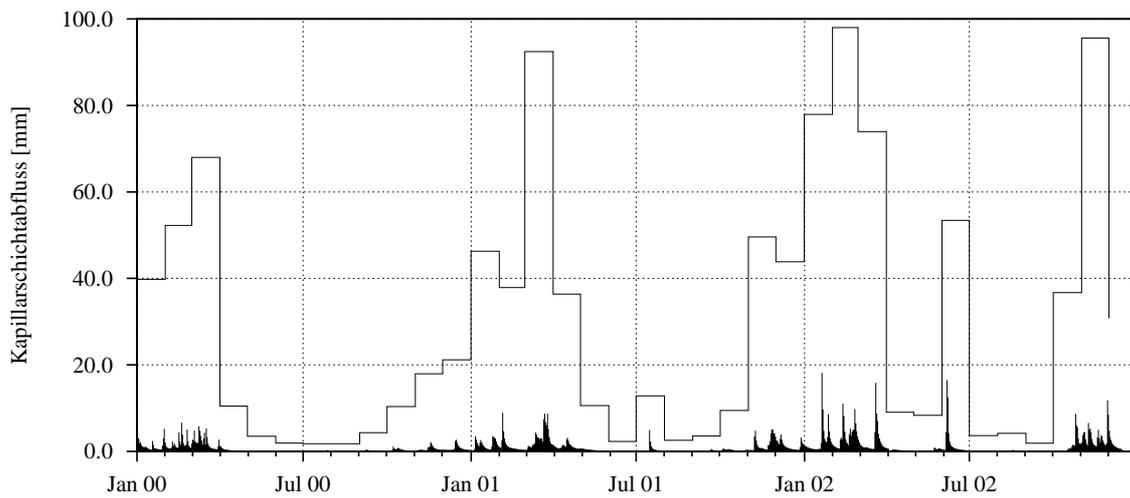


Abb. 33: Kapillarschichtabfluss von Lysimeter 2.

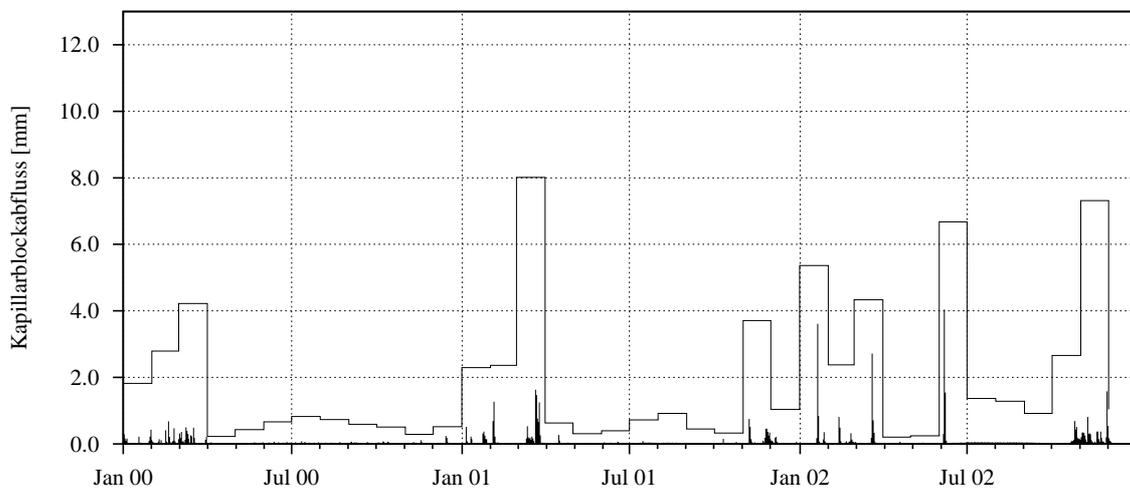


Abb. 34: Kapillarblockabfluss von Lysimeter 2.

Monat	Niederschlag mm	Lysimeter 1			Lysimeter 2		
		Oberfläche mm	Kapillarsch. mm	Kapillarbl. mm	Oberfläche mm	Kapillarsch. mm	Kapillarbl. mm
Jan 00	24,3	10,5	32,7	5,7	2,8	39,8	1,8
Feb 00	43,7	6,6	38,9	4,1	2,7	52,2	2,8
Mrz 00	82,3	11,0	45,1	5,8	2,3	68,0	4,2
Apr 00	33,5	0,7	10,7	2,1	0,4	10,5	0,2
Mai 00	49,6	0,3	3,5	2,1	0,1	3,5	0,4
Jun 00	57,2	0,2	1,7	2,0	0,0	1,9	0,7
Jul 00	129,8	0,0	1,1	1,9	0,3	1,8	0,8
Aug 00	52,9	0,0	1,0	1,5	0,1	1,8	0,7
Sep 00	61,3	0,0	0,8	1,2	0,3	4,3	0,6
Okt 00	66,4	0,0	5,5	0,8	0,6	10,4	0,5
Nov 00	39,5	0,0	14,4	0,9	1,1	17,9	0,3
Dez 00	30,3	0,0	19,8	1,6	0,7	21,2	0,5
Jan 01	63,0	1,3	39,2	3,2	2,1	46,3	2,3
Feb 01	40,8	2,1	37,8	5,2	2,3	37,9	2,4
Mrz 01	127,5	0,8	74,6	9,1	2,1	92,5	8,0
Apr 01	68,4	0,0	36,4	3,8	0,7	36,4	0,6
Mai 01	15,2	0,0	11,2	2,4	0,0	10,6	0,3
Jun 01	101,1	0,0	2,4	1,8	0,3	2,3	0,4
Jul 01	82,7	0,0	6,7	2,1	0,4	12,8	0,7
Aug 01	27,3	0,0	2,0	2,2	0,0	2,5	0,9
Sep 01	109,8	0,0	1,1	1,5	0,5	3,6	0,4
Okt 01	50,2	0,0	5,1	1,2	0,4	9,4	0,3
Nov 01	90,7	0,1	43,4	3,3	1,5	49,6	3,7
Dez 01	72,8	0,6	43,0	4,0	3,3	43,8	1,0
Jan 02	38,1	3,9	64,4	12,2	5,5	77,9	5,4
Feb 02	120,4	2,4	79,8	9,9	2,7	98,0	2,4
Mrz 02	76,7	2,4	62,7	8,9	1,2	74,0	4,3
Apr 02	28,3	0,0	12,3	2,1	0,3	9,0	0,2
Mai 02	76,1	0,0	5,1	1,5	2,4	8,3	0,2
Jun 02	109,3	7,2	39,8	7,6	7,2	53,4	6,7
Jul 02	58,9	0,0	3,8	2,6	0,5	3,6	1,4
Aug 02	96,3	0,0	2,5	2,1	3,6	4,2	1,3
Sep 02	51,7	0,0	1,5	1,8	2,0	1,8	0,9
Okt 02	114,0	0,1	28,3	2,8	4,0	36,7	2,6
Nov 02	129,9	2,0	88,1	8,1	7,3	95,6	7,3

Tab. 9: Monatswerte des Niederschlages und der Abflusshöhen aus den Schichtentwässerungen.

5.2.2 Kapillarschichtabfluss

Der Abfluss aus der Kapillarschicht unterliegt erheblichen saisonalen Schwankungen (Abb. 30 und 33). In trockenen Sommermonaten bewegt er sich im Bereich von wenigen Millimetern pro Monat, da der größte Teil des Niederschlagswassers an der Oberfläche der Wasserhaushaltsschicht und durch die Vegetation verdunstet. In den Wintermonaten dagegen dringt nahezu der gesamte Niederschlag in die Kapillarschicht ein. Im Januar 2000 und Januar 2002 überstieg der Kapillarschichtabfluss sogar die Höhe des Niederschlages (Tab. 9). Was auf den ersten Blick wie ein Messfehler aussieht, ist auf das Auslaufen von Speichervolumen und Schneeschmelze zurückzuführen. In niederschlagsreichen Wintermonaten sind insbesondere die Poren der Wasserhaushaltsschicht fast vollständig mit Wasser gefüllt. Wenn dann, wie bei den genannten Monaten, relativ niederschlagsarme Zeiten folgen, entleert sich das gespeicherte Wasser zum Teil wieder. Hinzu kommt, dass bei Temperaturerhöhung nach längeren Frostperioden mit Schneeniederschlag zusätzlich Schmelzwasser in den Boden infiltriert. Der Temperaturanstieg spielte insbesondere im Januar 2002 eine große Rolle, da hier ein Temperatursprung von ca. 15° C gemessen wurde (Anhang 11.4.1).

5.2.3 Kapillarblockabfluss

Ein Kapillarer Aufstieg ist im grobkörnigen Kapillarblock nur über wenige Zentimeter möglich. Deshalb kann bei einem einfachen Kapillarsperrensystem das an der Basis des Kapillarblocks angelangte Sickerwasser nur noch durch den Deponiekörper abfließen. Die Menge des Kapillarblockabflusses ist also ein Maß für die Durchlässigkeit des Dichtungssystems.

Die starke hydraulische Belastung des Systems in den Wintermonaten führt zeitweise zu Wasserübertritten in den Kapillarblock. Beim flachen Lysimeter 1 sind bei starken Abflussereignissen Abflussspitzen erkennbar, die schnell abfallen, jedoch teilweise erst nach mehreren Wochen vollständig zurückgehen. Hier paust sich das träge Abflussverhalten der Kapillarschicht auch auf den Kapillarblock durch. Die Sommerabflüsse gehen nur selten bis auf unter 1 mm pro Monat zurück.

Erwartungsgemäß ergibt der stärker geneigte Aufbau von Lysimeter 2 deutlich geringere Kapillarblockabflüsse. In den Sommermonaten sind kaum Tagesabflüsse messbar. Der eingesetzte Kippzähler löst oft über mehrere Tage keinen Impuls aus. Bei Betrachtung der Monatsabflüsse fällt jedoch ein leichter Anstieg der Abflüsse aus dem Kapillarblock auf, der sich nicht mit Anstiegen des Kapillarschichtabflusses deckt. auf. Dieser ist nach JELINEK (1997) auf Viskositätsverringerungen des Porenwassers aufgrund des sommerlichen Temperaturanstieges auch in tieferen Schichten zurückzuführen. In der Kapillarschicht der beiden Lysimeter schwankten die Temperaturen zwischen 2 °C im Winter und und 13 °C im Sommer.

Permanenter geringer Kapillarblockabfluss wurde auch von ZISCHAK (1997) und BREH & HÖTZL (2000) im Lysimeter auf der Deponie Karlsruhe beobachtet, während andere Versuchsfelder in den Sommermonaten zeitweise keinen Kapillarblockabfluss zeigen (JELINEK 1997, MELCHIOR 1993). Die Lysimeter in Karlsruhe und in Bayreuth weisen, im Gegensatz zu den anderen Versuchseinrichtungen, als Gemeinsamkeit eine geotextile Trennlage zwischen Kapillarblock und Kapillarschicht auf. Obwohl diese beiden Versuchsfeldbeobachtungen mit ansonsten unterschiedlichen Materialien und Aufbauten für eine endgültige Aussage nicht ausreichen, so besteht doch der Verdacht, dass die von BRUNSCHLIK (1993) und BAUER (2001) an Laborversuchen nachgewiesene Eignung von Geotextilien zur Abtrennung von Kapillarsperrenschichten, nicht uneingeschränkt auf den Feldein-

satz übertragbar ist. Zur genauen Untersuchung dieses Verhaltens wäre eine Versuchsanlage mit zwei identischen Lysimetern notwendig, die sich nur durch das Geotextil zwischen Kapillarschicht und Kapillarblock unterscheiden.

In den Sommermonaten gab es in beiden Lysimetern nur während des ungewöhnlich starken Sommerniederschlags im Juli 2002 erhöhte Kapillarblockabflüsse.

5.3 Verlauf von extremen Niederschlags- und Abflussereignissen

Die größten Tagesabflüsse des Beobachtungszeitraumes, sowohl in der Kapillarschicht als auch im Kapillarblock, waren im niederschlagsreichen Jahr 2002 zu beobachten. Dabei fallen in den Abbildungen 29 bis 34 im Wesentlichen drei Ereignisse auf: der 21.01.02, der 20.03.02 und der Zeitraum zwischen 06. und 08.06.02. Das Ereignis vom 21.01.02 wurde durch eine Tauperiode bei geschlossener Schneedecke ausgelöst, deshalb lässt sich der zeitliche Ablauf nicht anhand der Niederschlagsintensität verfolgen. Beim Sommerniederschlag ist der Abfluss aus der Wasserhaushaltsschicht vermutlich stark durch Makroporenflüsse in Trockenrissen beeinflusst. Deshalb zeigen sich hier auch die größten Abflussspitzen.

Als repräsentatives Starkniederschlagsereignis wurde deshalb der 20.03.02 genauer betrachtet (Abb. 35 und 36). Der Niederschlag steigerte sich innerhalb von sechs Stunden kontinuierlich auf etwa 5 mm/h. Bei der Niederschlagsmessung auf Lysimeter 2 war der Spitzenwert etwas geringer, dafür der Gipfel etwas breiter. Bei starken Niederschlagsereignissen kann es regional auch sehr klein-

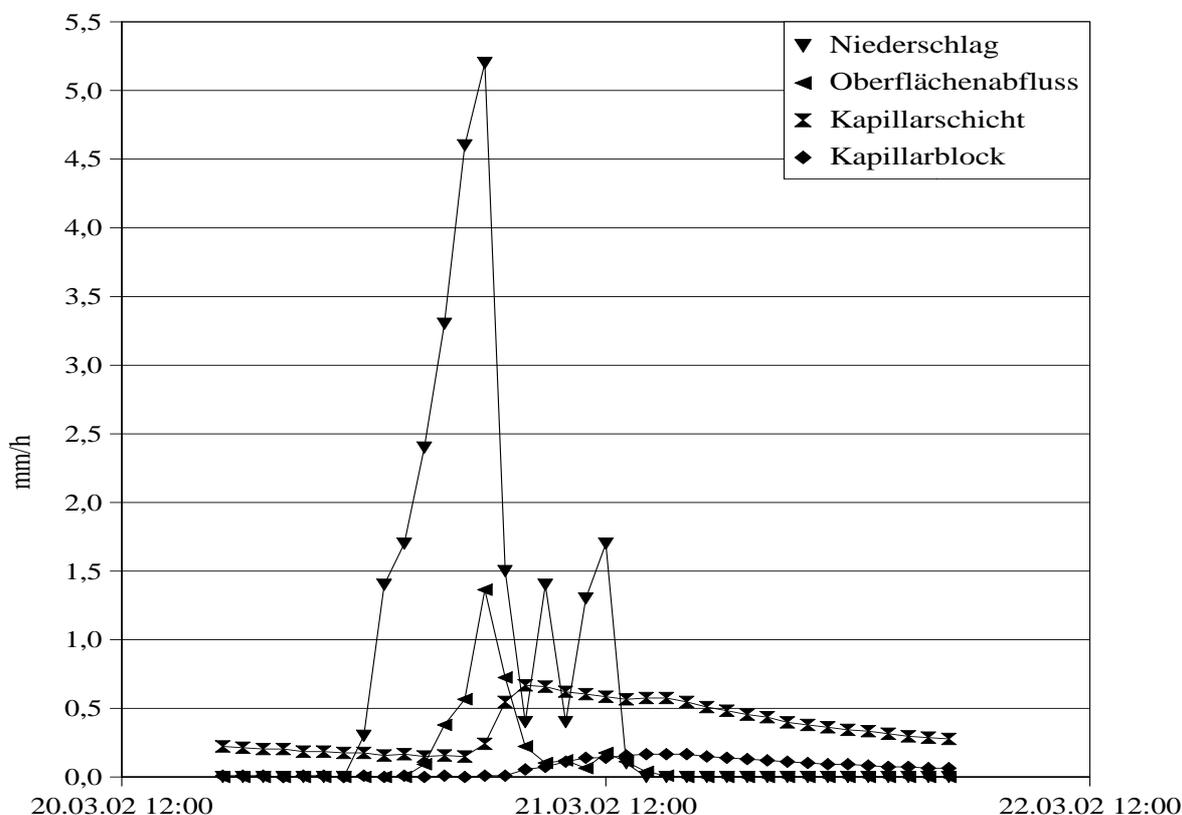


Abb. 35: Abflüsse beim Starkniederschlagsereignis vom 20.03.02 aus Lysimeter 1.

räumig zu unterschiedlichen Niederschlagsintensitäten kommen (SUMNER 1988). Vier Stunden nach Einsetzen des Niederschlages war Oberflächenabfluss messbar. Sein Gipfel erreichte die Messeinrichtungen etwa zeitgleich mit dem Gipfel des Niederschlages. Der Oberflächenabfluss reagierte also erwartungsgemäß direkt auf den Niederschlag. Er setzt nur deshalb später ein, weil erst die Oberflächen des Bewuchses und des Bodens benetzt werden müssen und die Menge des Niederschlages das Wasseraufnahmevermögen des Bodens überschreiten muss. Mit dem maximalen Niederschlag stieg auch der Abfluss aus der Kapillarschicht an, um nach weiteren zwei bis drei Stunden ein Maximum zu erreichen. Der Kapillarschichtabfluss aus dem steileren Lysimeter 2 stieg auf 1,3 mm/h und fiel dann wieder ab. Das Maximum von 0,7 mm/h im Lysimeter 1 war nur schwach ausgeprägt, da der Abfluss hier mehrere Stunden auf hohem Niveau blieb. Der Kapillarblockabfluss zeigte beim Lysimeter 1 einen langsamen Anstieg auf 0,2 mm/h und einen ebenfalls sehr langsamen Rückgang, während der Kapillarblockabfluss aus Lysimeter 2 schnell auf 0,5 mm/h anstieg, sich dann aber wieder erholte. Lysimeter 2 weist bei kurzfristigen Ereignissen höhere Spitzen beim Kapillarschicht- und Kapillarblockabfluss auf, da das Sickerwasser aufgrund der größeren Hangneigung schneller die Messeinrichtungen erreicht. Dagegen sind beim Lysimeter 1 die lateralen Fließgeschwindigkeiten aufgrund der flachen Neigung geringer, wodurch Einzelereignisse mit starkem Niederschlag mehr gedämpft werden.

Das Kapillarsperrensystem reagiert also angesichts der 1,5 m mächtigen Wasserhaushaltsschicht sehr schnell auf starke Niederschläge. Der rasche Durchfluss durch Bypass-Flüsse mit verursacht, die auch bei Starkregenereignissen beobachtet werden (SEILER et al. 2002). Die hier gezeigte Reaktionszeit der Abflüsse ist allerdings nicht direkt mit Verweildauern in den Schichten gleichzusetzen, da bei ei-

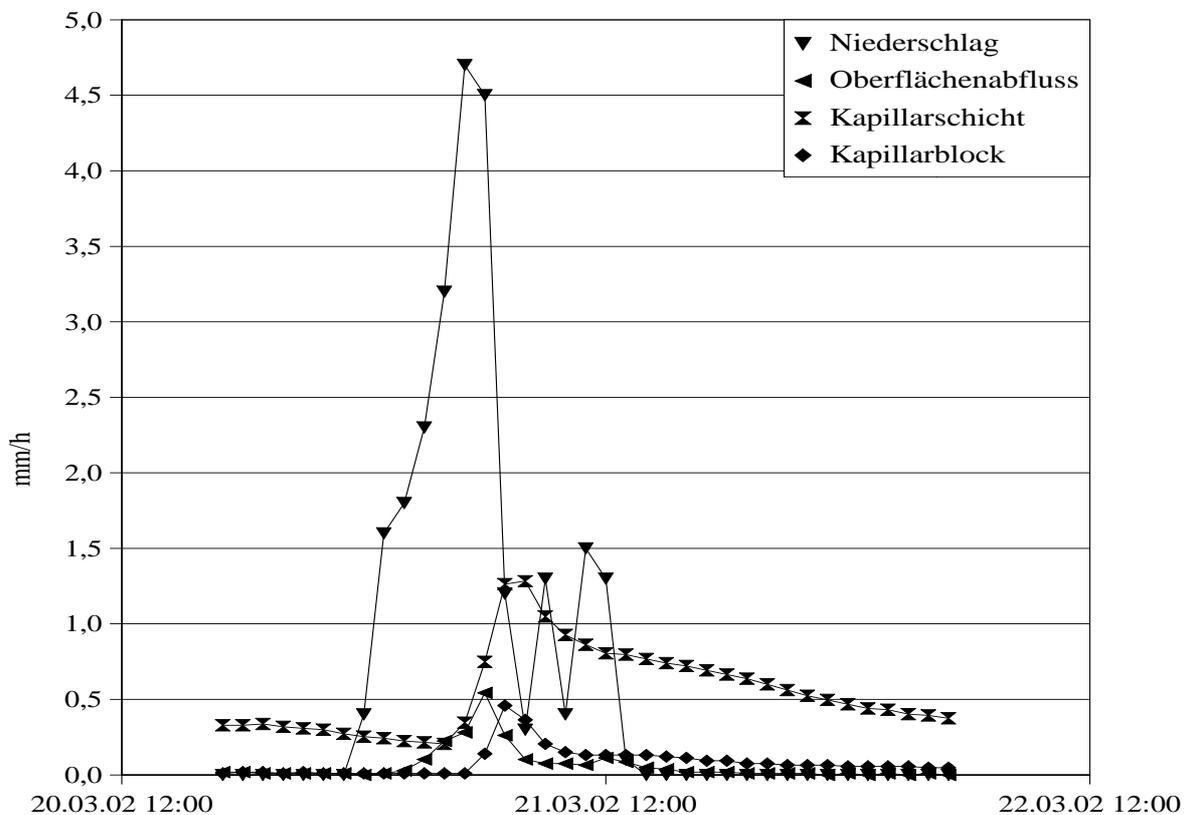


Abb. 36: Abflüsse beim Starkniederschlagsereignis vom 20.03.02 aus Lysimeter 2.

ner Erhöhung des hydraulischen Potentials an der Oberfläche des Schichtaufbaus durch Niederschlag, zunächst gespeichertes Wasser in die tieferen Schichten abfließt.

Bei Einsetzen von Oberflächenabfluss kann von nahezu gesättigten Verhältnissen in der Wasserhaushaltsschicht ausgegangen werden. Anhand der gemessenen Abflüsse aus den darunterliegenden Schichten lässt sich deshalb nach DARCY (Gl. 14) die gesättigte Durchlässigkeit der Wasserhaushaltsschicht, integriert über die gesamte Lysimeteroberfläche, abschätzen. Daraus ergeben sich k_f -Werte von $2,2 \cdot 10^{-7}$ m/s für Lysimeter 1 und $4,7 \cdot 10^{-7}$ m/s für Lysimeter 2. Die Werte zeigen somit eine etwas höhere Durchlässigkeit als die Laborversuche an Stechzylindern, die während der Bauarbeiten durchgeführt wurden und einen Durchschnittswert von $1,7 \cdot 10^{-7}$ m/s ergaben. Diese Erhöhung der Durchlässigkeit kann auf Durchwurzelung und Rissbildung durch wiederholtes Austrocknen zurückgeführt werden.

5.4 Wasserbilanz

Die Betrachtung der Wirkungsweise des Gesamtsystems erfolgt anhand der Wasserbilanz über längere Zeiträume nach der erweiterten Wasserhaushaltsgleichung für mehrere Schichtabflüsse (Gl. 2). Da sich die Bedingungen für den Wasserhaushalt saisonal erheblich ändern, ist es sinnvoll in der Wasserbilanz nur abgeschlossene Messjahre zu betrachten. In Tab. 10 sind die Messwerte der Niederschlagshöhe, sowie der Abflusshöhen aus der Oberflächenentwässerung und aus den beiden Schichtentwässerungen für die Kalenderjahre 2000, 2001 und 2002 zusammengefasst. Zusätzlich wurden die Jahressummen der Abflusswerte prozentual in Relation zum gleichzeitig gefallenen Niederschlag gesetzt.

Die Werte für den Oberflächenabfluss sind, wie für eine grasbewachsene Fläche zu erwarten, gering. Sie liegen in durchschnittlichen Niederschlagsjahren unter 2 %. Lysimeter 1 zeigt im Jahr 2000, aufgrund der bereits unter Punkt 5.2.1 erwähnten Kompaktierung der Oberfläche durch die Bauarbeiten, einen, für die geringe Neigung von 10 %, etwas erhöhten Wert. Ansonsten liegt der Oberflächenabfluss für die Jahre 2000 und 2001 unter 2 %. 2002 ist allerdings aufgrund der extrem starken Niederschläge auch ein erhöhter Oberflächenabfluss zu beobachten. Der Anteil des Oberflächenabflusses hat

Zeitraum		2000		2001		2002 (bis 15.12.)		
Lysimeter Nr.		1	2	1	2	1	2	
Niederschlag N	mm	670,8		849,6		905,1		
Oberflächenabfluß	mm	29,3	11,4	5,0	13,6	18,2	36,9	
	% v. N	4,4%	1,7%	0,6%	1,6%	2,0%	4,1%	
Evapotranspiration N – (Obfl. + KS + KB)	mm	436,3	412,2	501,7	467,0	405,5	341,4	
	% v. N	65,0%	61,4%	59,1%	55,0%	44,8%	37,7%	
Sickerwasser KS + KB	mm	205,2	247,2	342,9	368,9	481,4	526,8	
	% v. N	30,6%	36,8%	40,4%	43,4%	53,2%	58,2%	
Kapillarschicht KS	mm	175,3	233,2	302,9	347,7	417,9	493,1	
	% v. N	26,1%	34,8%	35,7%	40,9%	46,2%	54,5%	
Kapillarblock KB	mm	29,6	13,6	40,0	21,2	63,5	33,8	
	% v. N	4,4%	2,0%	4,7%	2,5%	7,0%	3,7%	
Wirkungsgrad Gesamtsystem		% v. N	95,6%	98,0%	95,3%	97,5%	93,0%	96,3%

Tab. 10: Abflusswerte nach Kalenderjahren.

somit selbst bei steiler Hangneigung nur geringen Einfluss auf den Wasserhaushalt, was sich auch mit den Beobachtungen aus anderen Lysimetern deckt (BREH & HÖTZL 2000, MELCHIOR 1993).

Die Gesamtsickerwassermenge, also der Teil des auf die Oberfläche aufgetroffenen Niederschlages, der der Schwerkraft folgend nach unten fließt, setzt sich in den untersuchten Lysimetern aus der Summe von Kapillarschichtabfluss und Kapillarblockabfluss zusammen. Die Sickerwassermenge kann klimabedingt stark schwanken. Sie liegt in durchschnittlichen Niederschlagsjahren zwischen 30 und 40 % des Niederschlages. Davon wiederum werden 80 bis 90 % ausschließlich in den Monaten November bis April gebildet. Das niederschlagsreiche Jahr 2002 weist mit über 50 % des Niederschlages außerordentlich große Sickerwassermengen auf.

Mit Ausnahme des Wertes für das sehr niederschlagsreiche Jahr 2002 im flachen Lysimeter 1, liegt der Wirkungsgrad des Gesamtsystems immer über 95 %. Dabei ist zu beachten, dass nur das erste Versuchsjahr mit 670,8 mm Jahresniederschlag, verglichen mit dem langjährigen Mittel von 709 mm für Bayreuth, als durchschnittliches Niederschlagsjahr zu betrachten ist. Da im ersten Betriebsjahr der Versuchsfelder die Vegetation jedoch noch nicht vollständig ausgebildet war, sind die Ergebnisse der Abflussmessung vermutlich noch zu hoch. Die beiden weiteren Versuchsjahre 2001 und 2002 waren ausgesprochen niederschlagsreich und führten zu ungünstigeren Ergebnissen für die Kapillarsperre. Es ist deshalb davon auszugehen, dass sich bei einer langjährigen Messreihe günstigere Werte für den Wirkungsgrad der Kapillarsperre einstellen.

5.5 Übertragbarkeit der Ergebnisse der Wasserbilanz auf andere Standorte

Da Nordbayern ein relativ niederschlagsarmes Gebiet ist, stellt sich die Frage, inwieweit die erzielten Ergebnisse auch auf andere Standorte übertragbar sind. Aufgrund der Staulage im Westen des Fichtelgebirges ist der Standort Bayreuth aber ein für Nordbayern verhältnismäßig niederschlagsreiches Gebiet. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass während der Sommermonate der größte Teil des Niederschlages verdunstet und kaum in tiefergelegene Schichten versickert. Deshalb ist für die hydraulische Belastung eines Deponieabdichtungssystems besonders der Winterniederschlag von Bedeutung. Aufgrund der ausgeglichenen Niederschlagsverteilung entfällt in Bayreuth im langjährigen Mittel (Abb. 3) etwa die Hälfte des Jahresniederschlages auf die Wintermonate. Der Niederschlagsreichtum im Süden Bayerns ist jedoch vor allem auf starke Sommerniederschläge zurückzuführen. Das hat zur Folge, dass die Winterniederschläge von Bayreuth erst etwa 50 km südlich von München, im Alpenvorland, deutlich überschritten werden (ENDERS 1996).

Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse auch auf niederschlagsreichere südlichere Regionen übertragbar sind. Im unmittelbaren Alpenvorland muss allerdings mit Winterniederschlägen von deutlich mehr als 400 mm gerechnet werden, was zu einer stärkeren Belastung der Kapillarsperre führen würde.

5.6 Setzungsvermessung

Um die Auswirkung von Setzungen auf die Funktion des Kapillarsperrensystems zu beobachten wurden jährlich Setzungsvermessungen an der Oberfläche der Versuchsfelder anhand von eingerammten

Holzpfählen und Messpunkten auf der Umgrenzung der Lysimeter durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Anhang 11.5 dargestellt. Die Lage der Messpunkte auf den Versuchsfeldern kann den Zeichnungen im Anhang 11.3 entnommen werden. Die Messungen repräsentieren die Setzungen an der Oberfläche der Wasserhaushaltsschicht. Auf die direkte Vermessung von Setzungen innerhalb der Kapillarsperre wurde verzichtet, da die dazu notwendigen Verankerungen das Abflussverhalten des Systems gestört hätten. Die Oberfläche des Versuchsfeldes 1 setzte sich zwischen 1999 und 2002 um 11 bis 25 cm, Versuchsfeld 2 zwischen 11 und 28 cm. Da im gleichen Zeitraum auch die Niederschlagsintensität stark zunahm, können derzeit keine endgültigen Aussagen über Auswirkungen der Setzungen auf das Kapillarsperrensystem getroffen werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Dichtwirkung der Kapillarsperre jedoch angesichts der starken Niederschläge bisher im Rahmen der Erwartungen liegt ist nicht von einer Verschlechterung der Dichtwirkung durch die Setzungserscheinungen auszugehen.

6 Modellierung des Dichtungssystems

Das Dichtungssystem setzt sich im Wesentlichen aus den beiden Komponenten Wasserhaushaltsschicht und Kapillarsperre zusammen. In den beiden Komponenten herrschen stark unterschiedliche Fließprozesse. Die Wasserhaushaltsschicht besteht aus einer Schicht mit überwiegend eindimensionalen vertikalen Strömungen. Verdunstungsprozesse, von denen die Pflanzenbedingten nur empirisch fassbar sind, spielen hier eine große Rolle. Die Fließprozesse in der Kapillarsperre dagegen müssen zweidimensional betrachtet werden, da neben dem Zustrom aus der Wasserhaushaltsschicht der laterale Abfluss in der Kapillarschicht sowie die Durchsickerung in den Kapillarblock berücksichtigt werden müssen. Wasseraufnahme durch Pflanzen spielt bei Grasbewuchs in dieser Tiefe keine Rolle mehr. Deshalb werden die beiden Systeme bei der Modellierung getrennt betrachtet.

6.1 Simulation der Wasserhaushaltsschicht

Für die Modellierung des Wasserhaushaltes von Oberflächenabdeckungen oder auch kompletten Deponien wurde von der US-EPA das Modell HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) entwickelt (SCHROEDER et al. 1994), das bis zur Version 3.07 fortgeführt wurde. Dabei handelt es sich um ein „quasi-zweidimensionales“ Modell. Das heißt, es werden vertikale und laterale Fließprozesse gekoppelt, die Flüsse werden eindimensional berechnet, es kann im eindimensionalen System aber Wasser lateral zu oder abgeführt werden. Eine Simulation des Kapillarsperreneffektes ist deshalb nicht möglich. Das Modell ist jedoch geeignet um die Fließvorgänge in der Wasserhaushaltsschicht zu berechnen. Es hat sich bereits in Validierungsstudien bewährt und ist in der Deponieplanung weit verbreitet (GARTUNG & NEFF 1998). Das Simulationsmodell wurde, aufbauend auf der Version 3.07, von der Universität Hamburg an deutsche Klimaverhältnisse angepasst, validiert sowie um die übliche Bodenansprache und Filter für Daten des Deutschen Wetterdienstes erweitert (BERGER 1998). Dabei wurden auch Fehler im Simulationscode behoben, die zu systematisch falschen Ergebnissen führen können (BERGER 2000). Vor einer weiteren Verwendung älterer Versionen wird deshalb abgeraten (SCHROEDER et al. 2002). Das daraus hervorgegangene HELP-D, das aktuell in der Version 3.55 vorliegt, ist Grundlage der folgenden Wasserhaushaltssimulation.

6.1.1 Randbedingungen für das Modell

Das HELP-Modell benötigt als Eingabeparameter meteorologische Daten von mindestens einem Jahr sowie genaue Angaben zur Geometrie des Schichtaufbaus und zu den Materialparametern.

6.1.1.1 Meteorologische Daten

Zunächst sind für einige Parameter Durchschnittswerte festzulegen, die für die gesamte Berechnung Verwendung finden. Dazu gehören der Breitengrad (50°) und der maximaler Blattflächenindex mit 3.0 für guten Grasbewuchs. Zur Abschätzung des Beginns und des Endes der Vegetationsperiode bei Gräsern wurde nach SCHROEDER et al. (2002) der Tag verwendet, an dem die Tagesmitteltemperatur 10 bis 13°C längerfristig über- bzw. unterschreitet. Sowohl aus den aktuell gewonnenen Messwerten (Abb. 11.4.1) als auch aus den langjährigen Beobachtungen (Abb. 3) kann dafür der Zeitraum vom

1. Mai bis 30. September abgelesen werden was einer Vegetationsperiode vom 121. bis zum 273. Tag eines Jahres ohne Schalttag entspricht. Für die in 2 m über Grund gemessene Windgeschwindigkeit ist der Jahresdurchschnitt erforderlich, der aus den vorhandenen Messwerten mit 6,2 km/h ermittelt wurde. Die Luftfeuchte wird in durchschnittlichen Quartalswerten eingegeben. Die vorliegenden Messungen ergeben für das erste Quartal 83,4 %, für das zweite 72,7 %, für das dritte 77,0 % und für das vierte 90,3 %.

Für den Niederschlag, die Lufttemperatur und die Globalstrahlung wurden die Tageswerte der vorhandenen Messungen für die Jahre 2000, 2001 und 2002 eingelesen.

6.1.1.2 Schichtaufbau

Das HELP-Modell dient dazu, das Verhalten der Wasserhaushaltsschicht zu simulieren. Da der Kapillarsperreneffekt nicht berücksichtigt wird, kann der Schichtaufbau auf drei Schichten vereinfacht werden. Das HELP-Modell erfordert eine Zuordnung der einzelnen Schichten zu einem der vier Typen Wasserhaushaltsschicht, Dränschicht, mineralische Dichtschicht oder Kunststoffdichtungsbahn. Deshalb wurde folgende Untergliederung des Schichtaufbaus vorgenommen:

- Wasserhaushaltsschicht
- Kapillarschicht als Dränschicht
- Abdichtung aus Kunststoffdichtungsbahn

Dieser Aufbau kommt den tatsächlichen Bedingungen im Lysimeter am Nächsten, da bei den Feldversuchen der größte Teil des dränierten Sickerwassers in der Kapillarschicht anfällt. Würde man jedoch das HELP-Modell als Vierschichtmodell mit grobkörniger Kapillarschicht aufbauen würde das Sickerwasser im Modell zu 100 % in der Kapillarschicht anfallen, da der Kapillarsperreneffekt im „quasi 2D Ansatz“ von HELP unberücksichtigt bleibt.

Die Tiefe der Verdunstungszone wurde nach SCHROEDER et al. (2002) für schluffigen Sand auf 55 cm gesetzt. Die verwendeten Parameter für die drei Schichten sind in Tab. 11 zusammengestellt. Sie sind für die Wasserhaushaltsschicht und die Kapillarschicht den Labormessungen aus Kap. 3.1 und 4.1 entnommen. Für die Kunststoffdichtungsbahn wurde eine ideal verlegte Dichtung ohne Fehlstellen angenommen.

Schicht	HELP-Typ	Mächtigkeit cm	Porosität -	Feldkapazität -	Welkepunkt -	ges. Durchlässigkeit m/s
Wasserhaushaltsschicht	1	150	0,32	0,28	0,19	$1,7 \cdot 10^{-7}$
Kapillarschicht	2	50	0,35	0,045	0,04	$3,1 \cdot 10^{-4}$
Kunststoffdichtungsbahn	4	2,5	-	-	-	$1,0 \cdot 10^{-17}$

Tab. 11: Parameter der im HELP-Modell eingesetzten Schichten in den benötigten Einheiten.

Bei der Eingabe der Feldkapazität ist zu beachten, dass für diese, wie im US-amerikanischen Gebrauch üblich, der Wassergehalt bei pF 2,5 erwartet wird (SCHROEDER et al. 2002). Die Parameter für die beiden Lysimeter unterscheiden sich in der Hangneigung und in der Hanglänge. Dafür wurden, wie aus den Vermessungsarbeiten bekannt, 10 % und 27,6 m für Lysimeter 1 und 26 % und 27,0 m für Lysimeter 2 eingesetzt.

Der Oberflächenabfluss wird im Modell anhand der Kurvenzahl-Methode des US Soil Conservation Service berechnet (DVWK 1984, SCHROEDER et al. 2002). Die dafür erforderliche Kurvenzahl beträgt nach BERGER (1998) für lehmigen Sand 58,2 und wird modellintern für die Hanglänge und -neigung umgerechnet.

6.1.2 Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation mit den genannten Parametern sind in Tab. 12 als Summen für die drei Jahre des Messzeitraumes zusammengefasst.

Zeitraum		2000		2001		2002 (bis 15.12.)	
Lysimeter Nr.		1	2	1	2	1	2
Niederschlag N	mm	670,8		849,6		905,1	
Oberflächenabfluß	mm	7,2	7,2	54,3	54,3	106,5	106,5
	Δ Messung mm	-22,1	-4,2	+49,3	+40,6	+88,3	+69,6
Evapotranspiration	mm	447,4	447,4	399,5	399,5	423,5	423,5
	Δ Messung mm	-18,2	+23,8	-107,3	-81,2	-0,2	+45,2
Sickerwasser	mm	216,2	216,2	352,8	352,5	418,0	418,5
	Δ Messung mm	+11,0	-31,0	+9,6	-16,4	-63,4	-108,4

Tab. 12: Ergebnisse der HELP-Simulation der Wasserhaushaltsschicht mit Durchlässigkeiten aus Laborversuchen für den Versuchszeitraum und Differenzen zu den gemessenen Werten.

Die berechneten Werte für die Durchsickerung der Wasserhaushaltsschicht in den Jahre 2000 und 2001 nähern sich gut an die in den Lysimetern gemessenen Werte an. Im niederschlagsreichen Jahr 2002 wurde das in den Lysimetern gemessene hohe Sickerwasseraufkommen jedoch deutlich unterschätzt. Beim Oberflächenabfluss ergab sich für das Jahr 2000 eine gute Schätzung, während für 2001 der Oberflächenabfluss schon deutlich überschätzt wurde. Für das Jahr 2002 wurden aufgrund der starken Niederschläge sehr hohe Oberflächenabflüsse berechnet, die jedoch im Feld nicht gemessen wurden.

Die Simulation zeigt somit in durchschnittlichen Niederschlagsjahren eine gute Vorhersage für das Sickerwasseraufkommen. Beim Oberflächenabfluss neigt das Modell zur Überschätzung. In sehr niederschlagsreichen Jahren können zudem keine befriedigenden Ergebnisse mehr erwartet werden.

Da die Bestimmung der Durchlässigkeit an Stechzylindern im Labor für die inhomogene Wasserhaushaltsschicht mit Unsicherheiten behaftet ist, wurde eine zweite HELP-Simulation mit aus den Starkniederschlagsabflüssen abgeschätzten Durchlässigkeiten für die Wasserhaushaltsschicht (Kap. 5.3) durchgeführt. Es wurde für Lysimeter 1 die gesättigte Durchlässigkeit von $2,2 \cdot 10^{-7}$ m/s und $4,7 \cdot 10^{-7}$ m/s für Lysimeter 2 eingesetzt. Alle anderen Parameter blieben unverändert. Die summierten Ergebnisse dieser Simulation sind in Tab. 13 dargestellt.

Obwohl die Durchlässigkeiten vor allem für Lysimeter 1 verhältnismäßig gering erhöht wurden, ergibt sich ein signifikant geändertes Abflussverhalten. Das Sickerwasseraufkommen wurde für das flachere Lysimeter 1 für alle drei Jahre leicht überschätzt, während es für Lysimeter 2 für die Jahre 2000 und 2002 leicht unterschätzt wurde. Der Oberflächenabfluss zeigt Abweichungen in beide Richtungen, ohne klaren Trend. Insgesamt sind keine deutlichen Abweichungen mehr zu den Messwerten vorhanden. Die Simulation lieferte für alle drei Jahre zufriedenstellende Ergebnisse.

Zeitraum		2000		2001		2002 (bis 15.12.)	
Lysimeter Nr.		1	2	1	2	1	2
Niederschlag N	mm	670,8		849,6		905,1	
Oberflächenabfluß	mm	1,67	1,67	20,69	20,69	16,5	17,3
	Δ Messung mm	-27,6	-9,7	+15,7	+7,0	-1,7	-19,6
Evapotranspiration	mm	448,76	448,76	418,45	418,45	423,6	421,2
	Δ Messung mm	-16,8	+25,2	-88,3	-62,2	-0,1	+43,0
Sickerwasser	mm	220,37	220,37	367,75	368,21	507,7	508,9
	Δ Messung mm	+15,2	-26,8	+25,3	-0,7	+26,3	-17,9

Tab. 13: Ergebnisse der HELP-Simulation der Wasserhaushaltschicht mit aus dem Abflussverhalten abgeschätzten Durchlässigkeiten für den Versuchszeitraum.

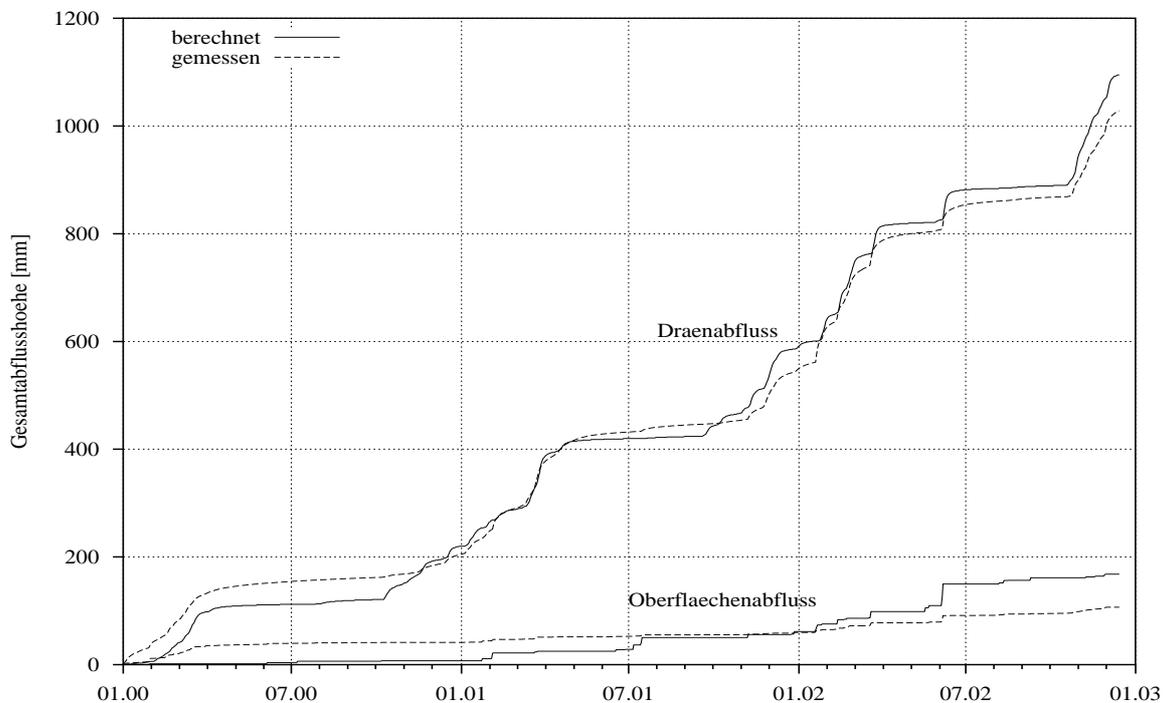


Abb. 37: Kumulierte Abflüsse der HELP-Simulation im Vergleich zu den Messwerten für Lysimeter 1.

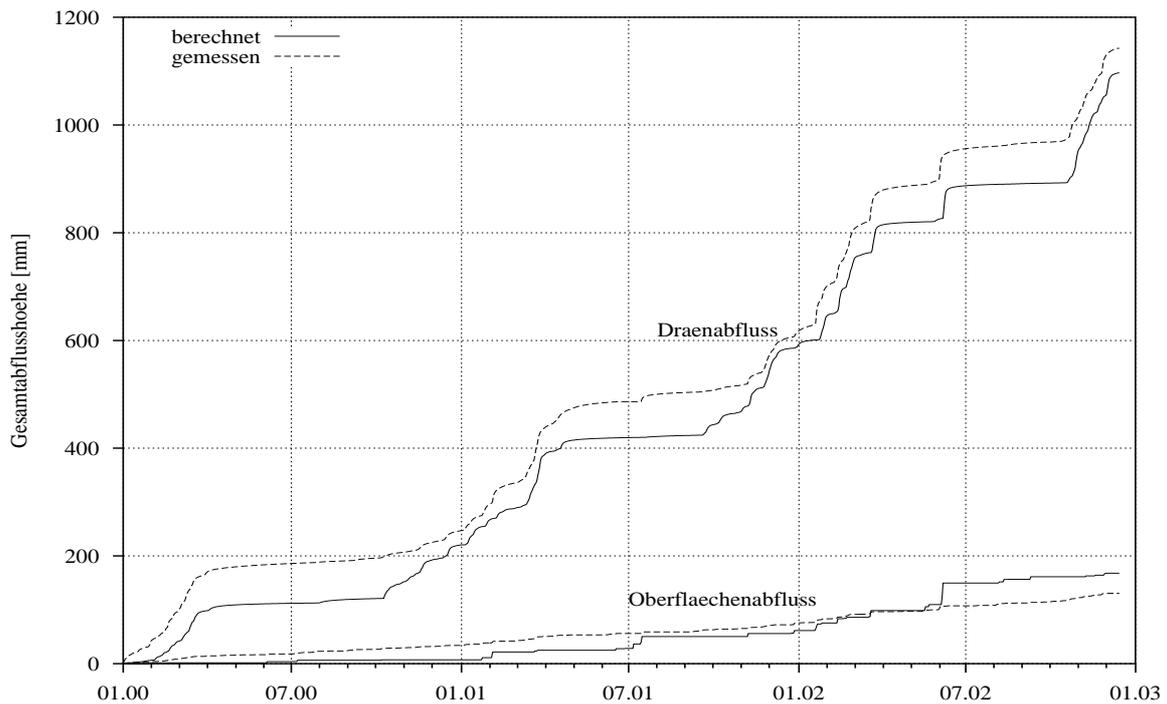


Abb. 38: Kumulierte Abflüsse der HELP-Simulation im Vergleich zu den Messwerten für Lysimeter 2.

In den Abbildungen 37 und 38 wird außerdem deutlich, dass auch die Dynamik des Abflussverhaltens nachgebildet werden konnte. Die Berechnung des, für die weitere Verwendung wichtigen, Dränabflusses liegt über den gesamten Versuchszeitraum hinweg nahe an den gemessenen Werten. Die Modellergebnis des Oberflächenabflusses stimmt nur tendenziell mit den Messwerten überein.

6.2 Simulation der Kapillarsperre

Parallel zu den Versuchen sollte die Wirkungsweise der Kapillarsperre durch numerische Modellierung bestimmt werden, um die Verwendbarkeit der Modellberechnung zur Vorhersage der Eignung von Materialkombinationen für Kapillarsperren zu überprüfen. Dazu wurde die Grundwassermodellierungssoftware Feflow in der Version 5.0 verwendet (DIERSCH 2002b). Es handelt sich dabei um ein finite Elemente Modell, in dem sowohl gesättigte als auch ungesättigte Strömungen für zwei- und dreidimensionale Probleme implementiert sind (DIERSCH 2002a). Seine grundsätzliche Eignung zur Simulation des Kapillarsperreneffektes wurde von DIERSCH & PERROCHET (1999) bereits durch Vergleiche der Ergebnisse der Modellierung mit empirischen Verfahren zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit einer Kapillarsperre (ROSS 1990, WEBB 1997) gezeigt. In der vorliegenden Arbeit sollen nun die Ergebnisse der Modellrechnung mit den Messwerten aus den Versuchen verglichen werden.

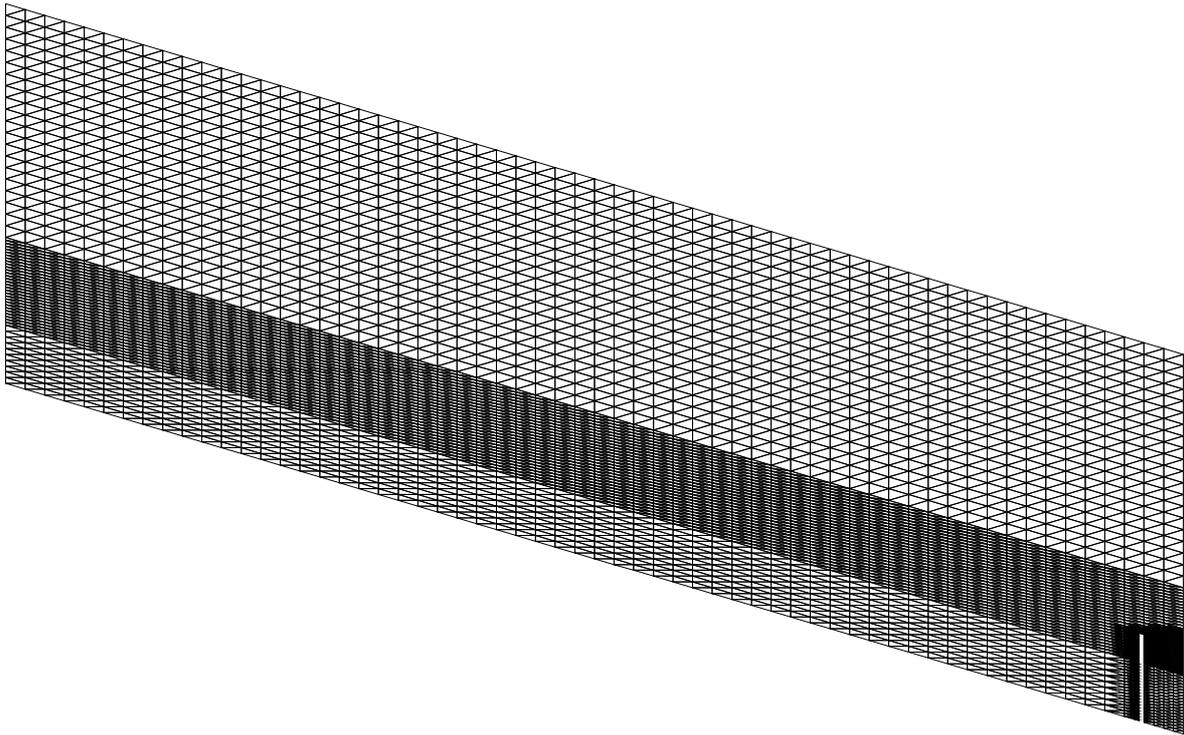


Abb. 39: Aufbau des finite Element Netzes aus 7814 Elementen mit 4123 Knoten für die Simulation des Großrinnenversuchs mit 10 % Neigung (3-fach überhöht).

6.2.1 Simulation des Großrinnenversuches

Zunächst wurde der Kapillarsperrenaufbau des Großrinnenversuches simuliert (Kap. 3.3). Durch die einfache Geometrie des Aufbaus und die über längere Zeiträume stationären Zuflussbedingungen sind die Randbedingungen hier klarer definiert als beim Feldversuch.

6.2.1.1 Modellaufbau

Das Problem wurde als zweidimensionales, vertikal projiziertes instationäres Modell umgesetzt. Das finite Elementnetz bildet mit Dreieckselementen die Abmessungen der Versuchsrinne nach (Kap. 6).

An der Grenze zwischen Kapillarschicht und Kapillarblock grenzen Materialien mit stark unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften aneinander. Die numerische Berechnung der Fließprozesse an dieser Grenze erfordert eine hoch aufgelöste räumliche Diskretisierung. Deshalb wurde das Netz im Bereich der Schichtgrenze auf 5 mm Zellenhöhe verdichtet (Abb. 39).

Um den Modellaufbau für die Simulation möglichst einfach zu gestalten, wurden die Seitenwände, unabhängig von der Neigung des Systems, senkrecht ausgeführt. Die Trennwand zur Abgrenzung des Kapillarschichtabflusses wurde als Modellaußengrenze definiert. Der freie Drän als Randbedingung am unteren Ende von Kapillarschicht und Kapillarblock wurde durch ein festgelegtes Potential (fixed head) von 0 m festgelegt. Zusätzlich wurde der Durchfluss so begrenzt (constrained condition), dass nur Abfluss, aber kein Zufluss stattfinden kann. Das entspricht den Bedingungen des freien Dräns, bei dem Wasser erst bei hydraulischer Sättigung in das Entwässerungsrohr übertritt. Da es, dem Gefälle folgend, sofort abgeführt wird, kann es bei trockeneren Bedingungen nicht mehr zurück in die Ka-

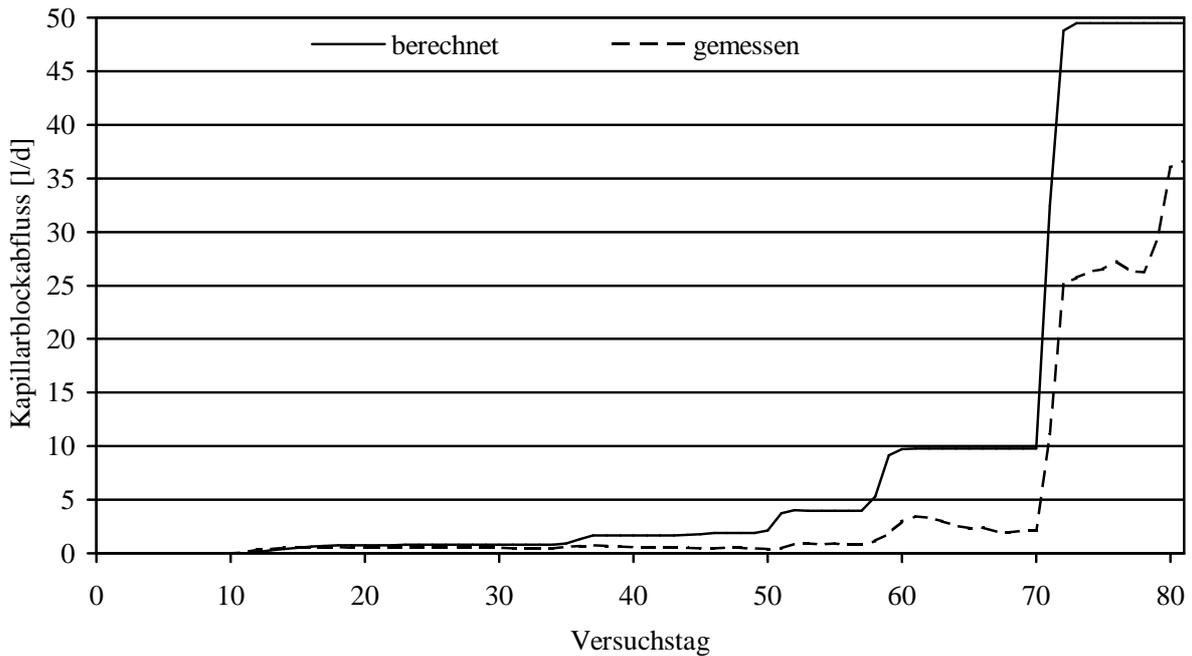


Abb. 40: Simulierte und gemessene Abflüsse aus dem Kapillarblock für den Versuchsaufbau mit 10 % Neigung.

pillarschicht fließen. An der Obergrenze der Kapillarschicht wurde ein zeitabhängig variabler Zufluss entsprechend der Wasseraufgabe während des Versuchsablaufes gesetzt. Alle anderen Außengrenzen wurden als geschlossen definiert. Für die Materialparameter wurden die in den Vorversuchen (Kap. 3.1) ermittelten Werte eingesetzt.

6.2.1.2 Simulationsergebnisse

Für die erste Simulation wurden die VAN GENUCHTEN-Parameter für die Kapillarschicht und den Kapillarblock aus statischen Laborversuchen abgeleitet (Tab. 5). Das Simulationsergebnis zeigte selbst bei der stärksten Sickerwasserbeaufschlagung bei beiden Neigungen keinen nennenswerten Abfluss aus dem Kapillarblock. Angesichts der Versuchsergebnisse (Kap. 3.3) ist dies ein unrealistisches Ergebnis.

Deshalb wurden für die VAN GENUCHTEN-Parameter in einem zweiten Simulationsdurchgang die Werte eingesetzt, die durch inverse Modellierung eines instationären Verdunstungsexperimentes aus dem Kapillarschichtmaterial gewonnen wurden (siehe Kap. 3.2). Das mit den daraus resultierenden VAN GENUCHTEN-Parametern $\alpha = 5,0 \text{ l/m}$ und $n = 2,1$ erzielte Simulationsergebnis ist in Abb. 40 für den Versuchsaufbau mit 10 % Neigung und Abb. 41 für den Versuchsaufbau mit 25 % Neigung aufgetragen. Die während des Versuchszeitraumes jeweils stufenartig gesteigerte Beregnung wurde bereits in den Abb. 18 und 19 dargestellt. Die Simulation führte in beiden Fällen zu einer Überschätzung des Kapillarblockabflusses. Das in der Praxis wichtige signifikante Ansteigen des Kapillarblockabflusses, und damit die Überlastung der Kapillarsperre, kann jedoch auch in der Simulation in beiden Fällen korrekt zugeordnet werden. Abb. 42 stellt die simulierte Verteilung der relativen Wassersättigung dar. Über der Grenze zum Kapillarblock ist die Ansammlung von Porenwasser deutlich

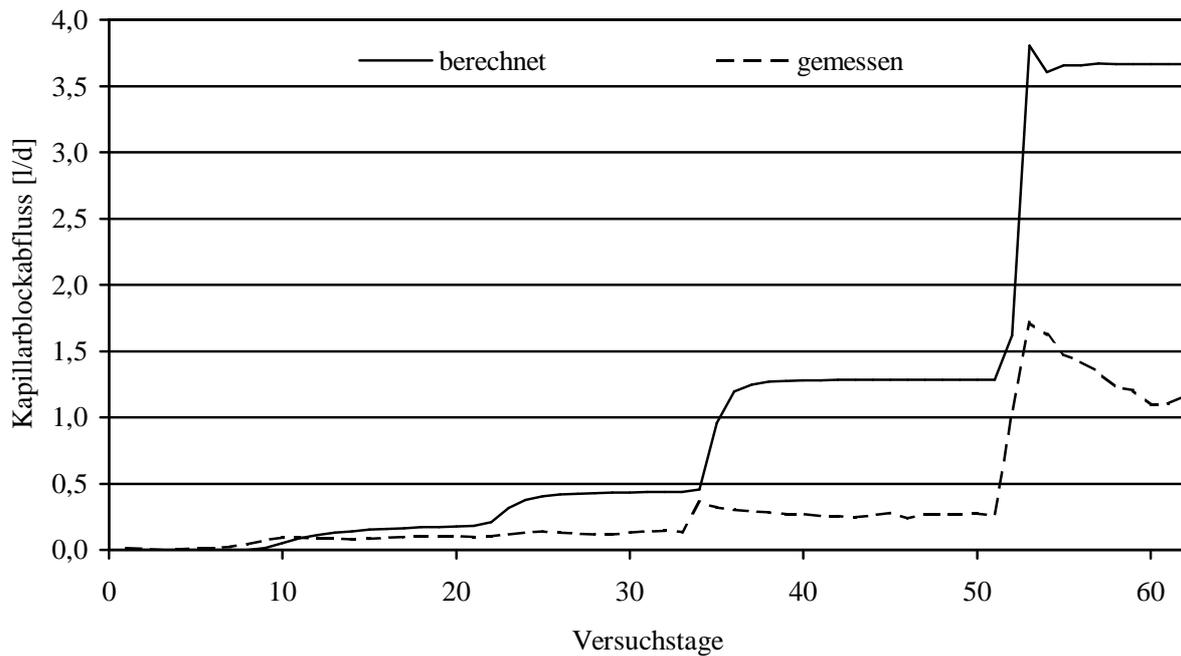


Abb. 41: Simulierte und gemessene Abflüsse aus dem Kapillarblock für den Versuchsaufbau mit 25 % Neigung.

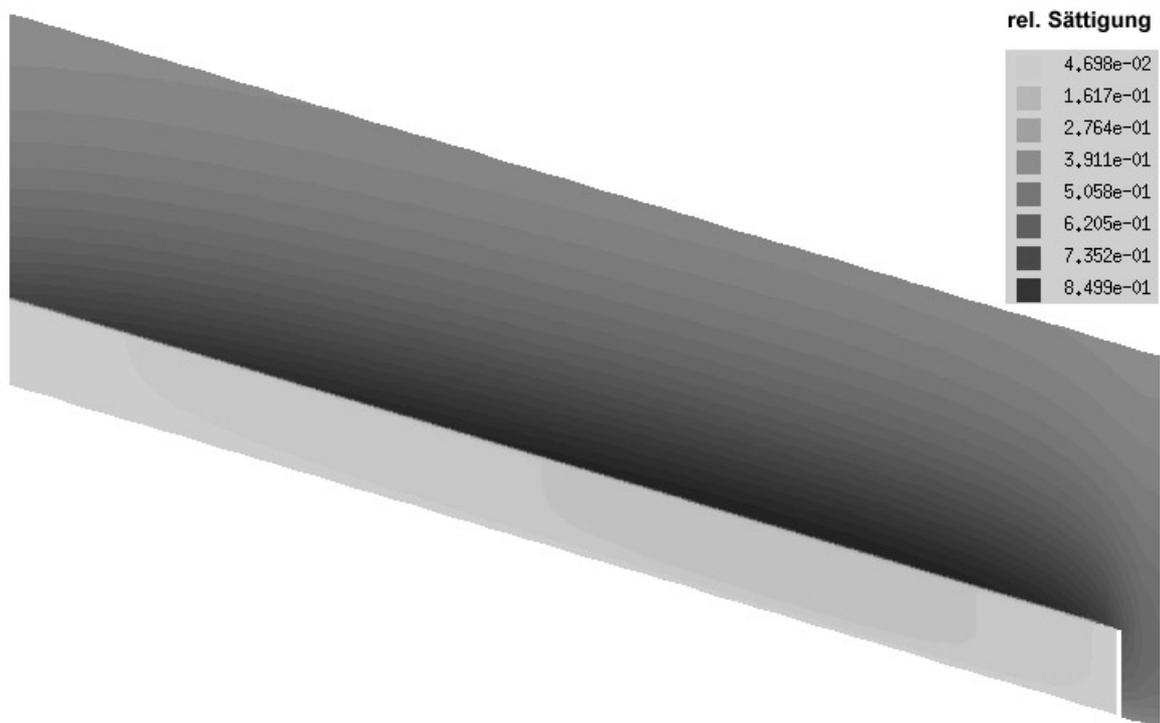


Abb. 42: Simulierte relative Wassersättigung in der Kapillarsperre bei 10 % Hangneigung nach 65 Versuchstagen (3-fach überhöht).

zu erkennen, das sich über die Hanglänge akkumuliert bis es an der Dräneinrichtung am Fußpunkt abgeführt wird.

Diese Ergebnisse führen zu einer brauchbaren Vorhersage für die Belastbarkeit des Kapillarsperrensystems. Sie verdeutlichen jedoch auch die Sensitivität des Modells auf Änderungen an den VAN GENUCHTEN-Parametern auf. Die herkömmliche Bestimmung der Werte aus der pF-Kurve ist für eine realistische Simulation nicht ausreichend. Erst die aufwendig bestimmten Parameter aus der inversen Modellierung führten zu einem brauchbaren Simulationsergebnis. Voraussetzung dafür ist allerdings ein mehrwöchiger Laborversuch mit der anschließenden Auswertung durch inverse Modellierung. Da die Einsparungen an Zeit und Arbeitsaufwand im Vergleich zum Großrinnenversuch damit gering sind und dieser auch die zuverlässigeren Ergebnisse liefert, ist von einem Verzicht auf Großrinnenversuche zugunsten der numerischen Modellierung derzeit abzuraten. Schon geringe Fehleinschätzungen der Materialparameter können, wie am vorliegenden Beispiel, zu erheblichen Fehlprognosen führen.

6.2.2 Simulation der Feldversuche

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde, dass die Simulation des Laborversuches in der Großrinne mit den, durch inverse Modellierung bestimmten, VAN GENUCHTEN-Parametern für die Kapillarschicht mit FEFLOW realitätsnahe Ergebnisse liefert, sollte das Modell nun auch auf den Feldversuch angewendet werden.

6.2.2.1 Modellaufbau

Der Aufbau des numerischen Modells für die Simulation der Feldversuche erfolgte in Anlehnung an den Modellaufbau für den Großrinnenversuch (Kap. 6.2.1).

Die horizontale Ausdehnung der Zellen betrug 20 cm, die vertikale 2 cm. Wie auch beim Großrinnenversuch wurde das Netz 10 cm über und unter der Schichtgrenze wegen des starken Parameterkontrastes auf 5 mm Zellenhöhe verfeinert. Die daraus resultierende Zahl der Dreieckselemente und Knoten sind in Tab. 14 zusammengestellt. Die Kunststoffdichtungsbahn, die den Drängraben im Feldversuch bildet, wurde im Modell als undurchlässiger Rand definiert. Die aufwendige Geometrie des Dränrohres konnte im Modell nicht berücksichtigt werden. Die Dränung im Modell war, wie im Modell des Großrinnenversuches, durch ein Potential von 0 m als Randbedingung festgelegt. Der Zufluss ins Modell über den Drängraben wurde auch hier ausgeschlossen, da auch die Feldversuche über freie Dränung verfügen, bei der ausgetretenes Wasser unmittelbar abgeführt wird und nicht zurückfließen kann. Als Zuflussmenge zur Kapillarschicht dienten die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung mit HELP aus Kap. 6.1. Die Simulationsergebnisse für den Abfluss aus der Wasserhaushaltsschicht wurden als instationäre Tageswerte der Infiltration an der Oberfläche der Kapillarschicht übernommen.

	Lysimeter 1	Lysimeter 2
Neigung	10 % (5,7°)	26 % (14,6°)
Dreieckselemente	21642	21649
Knoten	11169	11173

Tab. 14: Aufbau des numerischen Modells zur Simulation der Feldversuche.

6.2.2.2 Simulationsergebnisse

Die Jahres- und Gesamtsummen der Abflüsse der numerischen Simulation, sowie die an den Lysimetern gemessenen Werte sind in Tab. 15 zusammengefasst. Beim Lysimeter 1 liegen die berechneten Werte für die Kapillarschicht im Jahr 2000 deutlich und in den beiden folgenden Jahren etwas unter den gemessenen Werten. Da das Lysimeter im ersten Betriebsjahr hydraulisch noch nicht im Gleichgewicht war, stellen die Werte jedoch trotzdem ein brauchbares Ergebnis dar. Die Dynamik der Abflüsse, die anhand von Summenkurven in Abb. 43 zu sehen ist, wird ebenfalls realitätsnah wiedergegeben.

Die Jahressummen der Simulierten Abflusswerte für das stärker geneigte Lysimeter 2 zeigen eine deutliche Überschätzung der Kapillarsperrenwirkung. Der berechnete Wert für den Kapillarblock liegt für 2000 bei einem Zehntel des gemessenen Abflusses. Die Ergebnisse der beiden folgenden Jahre liegen unwesentlich näher an dem Messwerten. Die Summenlinien in Abb. 44 verdeutlichen ebenfalls, dass die Simulation für den Kapillarblock zu keinem sinnvollen Ergebnis führte.

Als Grund für die Abweichungen kommen einbaubedingte Abweichungen vom idealen Kapillarsperrenaufbau, wie er den numerischen Modellen zu Grunde liegt, in Betracht. Dies ließe sich jedoch nur durch eine Aufgrabung der Versuchsfelder überprüfen, was derzeit nicht geplant ist, da dadurch der Versuchsaufbau zum Teil zerstört würde.

Zur Überprüfung der Auswirkung von Einbaufehlern wurden jedoch weitere Simulationen durchgeführt. In die Modellgeometrie wurden dazu lokale Setzungsmulden in der Grenze zwischen Kapillar-

Zeitraum			2000		2001		2002 (bis 15.12.)		Summe	
	Lysimeter Nr.		1	2	1	2	1	2	1	2
Feldmessung	Kapillarschicht KS	mm	175,3	233,2	302,9	347,7	417,9	493,1	896,1	1074,0
	Kapillarblock KB	mm	29,6	13,6	40,0	21,2	63,5	33,8	133,1	68,6
Simulation	Kapillarschicht KS	mm	218,6	230,8	320,9	361,1	360,3	410,6	899,8	1002,6
	Kapillarblock KB	mm	10,1	1,4	34,6	3,9	45,9	4,6	90,6	9,9

Tab. 15: Gemessene und simulierte Abflusssummen aus Kapillarschicht und Kapillarblock.

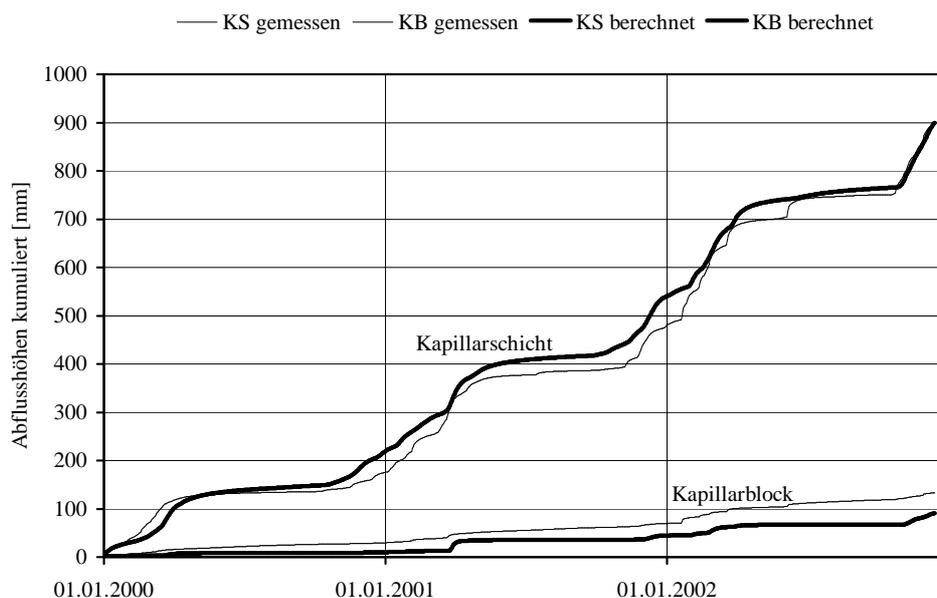


Abb. 43: Simulierte und gemessene Abflüsse aus der Kapillarsperre von Lysimeter 1.

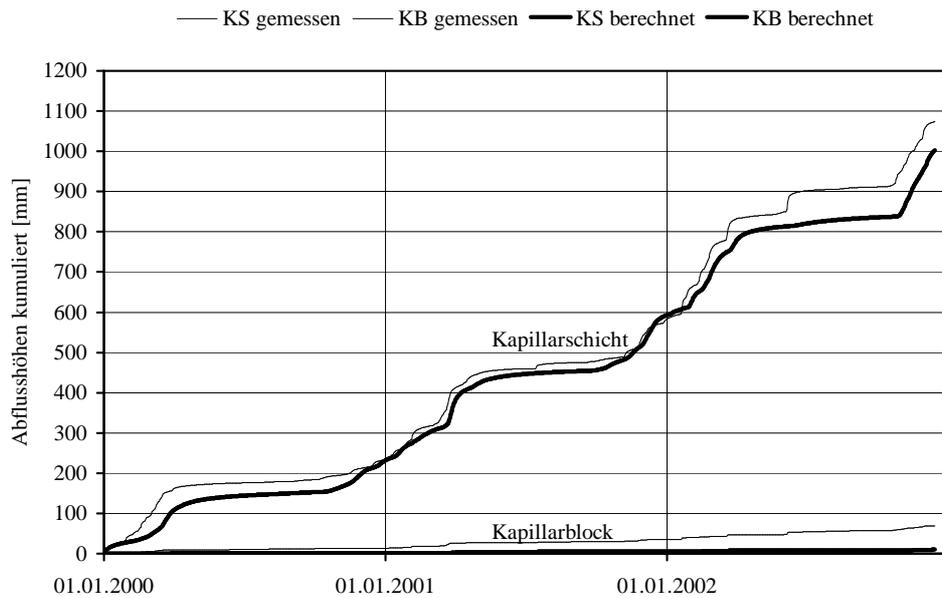


Abb. 44: Simulierte und gemessene Abflüsse aus der Kapillarsperre von Lysimeter 2.

schicht und Kapillarblock integriert. Setzungsmulden mit bis zu 4 cm Tiefe führten nicht zu einer signifikanten Verringerung der Dichtwirkung im Vergleich zum idealen Modellaufbau. Erst eine 10 cm tiefe und über 60 cm Hanglänge ausgedehnte Setzungsmulde bewirkte einen deutlichen Anstieg des Abflusses aus dem Kapillarblock, der nahezu identisch mit den gemessenen Werten ist (Abb. 45). Die in das Modell eingebauten Setzungen liegen alle im Rahmen der tatsächlich an der Versuchsfeldoberfläche aufgetretenen Setzungen.

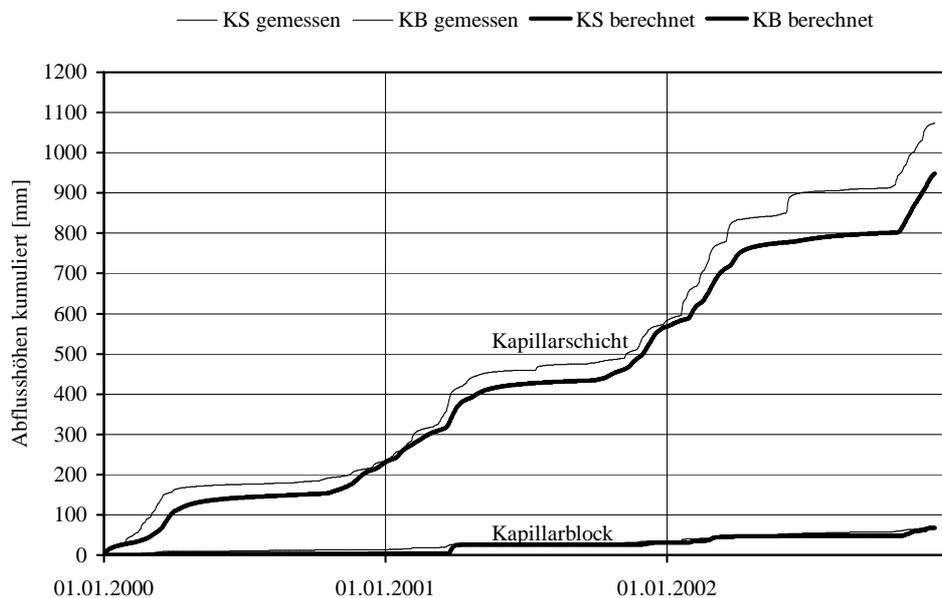


Abb. 45: Simulierte und gemessene Abflüsse aus der Kapillarsperre von Lysimeter 2 mit 10 cm tiefer Setzungsmulde in der Kapillarblockoberfläche.

7 Untersuchungen zur Gasdurchlässigkeit

Die Kapillarsperre ist aufgrund ihres Schichtaufbaus aus nichtbindigem porösem Material nicht gasdicht. Wie jedoch die Feldversuche zeigen führt die Kapillarschicht das ganze Jahr hindurch Wasser. Das Porenwasser verursacht über der Schichtgrenze zwischen Kapillarschicht und Kapillarblock relativ starke Wassersättigung. Die durchgeführten Untersuchungen sollten prüfen, inwieweit dieser Wasserfilm geeignet ist Gasemissionen aus dem Deponiekörper zu verhindern.

Unter Umständen kann auch die Wasserhaushaltsschicht die Gasemission behindern. Aufgrund größerer Inhomogenitäten und sommerlicher Trockenrissbildung kann dabei jedoch nicht von einem Dauerhaften Entgasungsschutz ausgegangen werden.

7.1 Laborversuche zur Gasdurchlässigkeit

Zunächst wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (ALSTETTER 2001) die intrinsische Gaspermeabilität einer wasserführenden Kapillarsperre untersucht. Da die hydraulische Dichtwirkung und der laterale Abfluss über dem Kapillarblock für den Versuch nicht von Bedeutung war, sondern lediglich ein konstanter Wassergehalt eingestellt werden musste, konnte der Schichtaufbau ohne die sonst für die Kapillarsperre unerlässliche Neigung in einer Säule eingebaut werden. Dadurch ist für die Auswertung die Vereinfachung auf eine eindimensionale Betrachtung möglich.

Für die Versuchsdurchführung kam eine, bereits für die Untersuchung von Deponiegasdränschichten verwendete Großsäulenanlage (Abb. 46) mit 30 cm Innendurchmesser zum Einsatz (HUBER 2002).



Abb. 46: Großsäulenanlage zur Bestimmung der Gasdurchlässigkeit.

Das Material für Kapillarschicht und Kapillarblock und die Dimensionierung der Kapillarsperre entsprechen dem Aufbau in den Versuchsfeldern in Bayreuth. Die Großsäule wurde dann mit einem konstanten Luftstrom durchströmt. Während des Versuches wurden Temperatur, Durchflussmenge und Differenzdruck aufgezeichnet. In der Sandschicht wurden zusätzlich in drei unterschiedlichen Höhen die Wassergehalte gemessen.

Im Säulenversuch lässt sich die intrinsische Permeabilität k_0 folgendermaßen bestimmen (FIGUEROA 1998):

$$k_0 = \frac{xQ\eta}{Adp} \frac{Ph}{Pm} \quad (19)$$

mit: k_0 intrinsische Permeabilität
 x Fließdistanz des Probenkörpers
 A Querschnittsfläche des Probenkörpers
 η dynamische Viskosität des Gases
 Q Durchflussmenge
 dp antreibende Druckdifferenz
 Ph Ausgangsdruck
 Pm mittlerer Druck

Dabei kann bei geringen Differenzdrücken (<20 hPa) der Kompressibilitätskoeffizient Ph/Pm vernachlässigt werden (FIGUEROA 1998).

Die gemessenen Wassergehalte in der Sandschicht und die berechneten intrinsischen Permeabilitäten für einen Versuchsdurchgang bei konstantem Luftstrom von 2,0 l/min sind in Abb. 47 dargestellt. Die Feuchtefühler K1 bis K3 befanden sich in Höhen von 2 cm, 12 cm und 22 cm über dem Kapillarblock.

Dabei ergab sich, dass bei getrocknetem Sand die intrinsische Permeabilität relativ hoch ist. Sobald sich allerdings Porenwasser über der Kapillarschicht staut, fällt die intrinsische Permeabilität um den Faktor 10. Da in der Praxis ein Austrocknen der Kapillarschicht sehr unwahrscheinlich ist, wäre zu erwarten, dass die Entgasung der Deponie durch die wasserführende Kapillarschicht zumindest eingeschränkt wird.

7.2 Feldmessungen zur Gasdurchlässigkeit

Die Auswirkungen der Kapillarsperre auf das Gasemissionsverhalten einer Deponie in der Praxis wurden auf den Versuchsfeldern regelmäßig durch Gasemissionsmessungen überwacht.

7.2.1 Durchführung der Gasmessungen

Die Messungen führte das Ingenieurbüro BEN, Bayreuth ein bis zweimal jährlich anhand von Kontrollbegehungen mit einem Flammenionisationsdetektor (FID) durch. Dabei handelt es sich um ein tragbares Gerät, das anhand von Leitfähigkeitsänderungen in einer Wasserstoffflamme die Konzentration ionisierbarer Gase, bei Deponien vor allem Methan (CH_4), in der bodennah unter einem Trichter

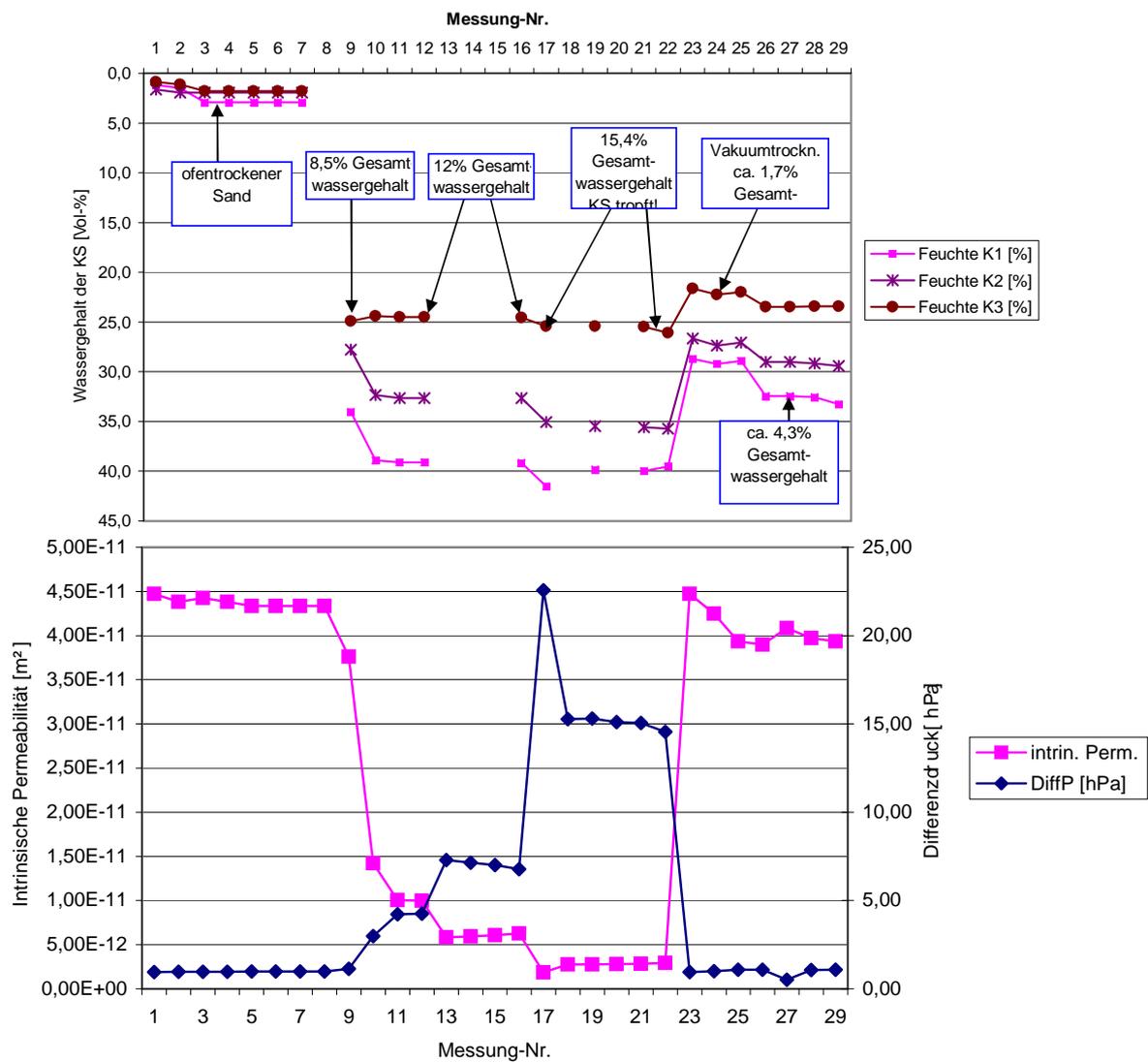


Abb. 47: Differenzdruck und intrinsische Permeabilität (untere Grafik) in Abhängigkeit vom Wassergehalt in der Kapillarschicht (obere Grafik).

angesaugten Luft misst. Mit diesem in der Deponiepraxis bewährten Verfahren wurden in regelmäßigen Abständen, im vorliegenden Fall im 5 m Raster, punktuelle Messungen aufgenommen. Der Messbereich reicht von < 10 ppm bis > 10 000 ppm. Bei einer intakten Oberflächenabdichtung mit ausreichendem Schutz gegen Entgasung sollte keine Messung 10 ppm überschreiten.

Für die Auswertung können drei unterschiedliche Flächen unterschieden werden:

- Der umgebende Bereich der Versuchsfelder für die Gasemission ohne Abdichtungssystem.
- Der Versuchsfeldbereich um die Lysimeter mit einfacher Kapillarsperre, im weiteren nur Versuchsfeldbereich genannt, ist die eigentliche Messfläche.
- Der Lysimeterbereich mit Kapillarsperre und darunterliegender Kunststoffdichtungsbahn als Referenzmessung mit idealer Gasabdichtung.

Da die Entgasung an der Deponieoberfläche von atmosphärischen Luftdruckschwankungen abhängt, wurde den Darstellungen der Messergebnisse, ab der Inbetriebnahme der Wetterstation, der stündliche Verlauf des Luftdruckes von drei Tagen vor dem Messdatum bis drei Tage danach, beigefügt.

7.2.2 Messergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen wurden für jede Messkampagne in Lageplänen aufgetragen und befinden sich im Anhang 11.6. Die Größe der dargestellten Punkte im Messraster und die Schattierung verdeutlichen die Höhe der Methankonzentration an den jeweiligen Messpunkten.

Die erste Messung erfolgte zu Beginn der Bauarbeiten im Mai 1999. Die Versuchsfelder existierten noch nicht und sind in den Plänen lediglich zur Information eingetragen. Die Messung führte im Bereich des geplanten Versuchsfeldes 1 zu Werten bis 100 ppm und auf dem Gelände des geplanten Versuchsfeldes 2 zu deutlich höhere Werte bis über 1000 ppm. Der Unterschied ist auf die wesentlich mächtigere Überdeckung aus Erdaushub beim Feld 1 zurückzuführen (Kap. 1.2.1).

Die Messung im September 1999, kurz nach Abschluss der Bauarbeiten, weist im Bereich der Versuchsfelder wie im Lysimeterbereich Werte von weniger als 10 ppm, während im umgebenden Bereich von Feld 1 zahlreiche Punkte über 10 ppm und von Feld 2 über 400 ppm liegen.

Bei der FID-Begehung im Juni 2000 wurde im Umgebungsbereich von Feld 1 an einigen Stellen über 100 ppm Methan gemessen, während im Versuchsfeldbereich ebenso wie im Lysimeterbereich keine Werte über 10 ppm auftraten. Der Bereich um Feld 2 verursachte zur gleichen Zeit starke Gasaustritte mit über 10 000 ppm, während die vom Versuchsfeld überdeckten Bereiche das Gas gut zurückhielten. Lediglich ein Punkt im Versuchsfeld neben der Lysimeterwandung lieferte den starken Gasaustritt von über 10 000 ppm. Ob es sich dabei um einen Messfehler oder um eine vorübergehend entstandene, bevorzugte Wegsamkeit entlang der Lysimeterwand handelte konnte nicht geklärt werden. Ein vergleichbar hoher Wert wurde bei keiner weiteren Messung festgestellt. Der Luftdruck fiel am Mess-tag rasch ab. Der Luftdruckabfall muss in Kombination mit sommerlicher Trockenrissbildung in der Deckschicht die starken Entgasungserscheinungen verursacht haben.

Bei der Messung vom Oktober 2000, die unter stark und rasch fallenden Luftdruckbedingungen stattfand, lieferten beide Versuchsfelder Werte mit über 10 ppm. Bei Feld 2 lagen deutlich mehr als 50 %

der Messpunkte über 10 ppm. Die Gasaustritte der umgebenden Bereiche der Versuchsfelder waren in beiden Fällen jedoch noch deutlich höher.

Die nächste Messung fand im September 2001 unter leicht ansteigenden Luftdruckverhältnissen statt. Hier traten im Feld 1 im Böschungsbereich drei und im Lysimeterbereich zwei Punkte mit über 10 ppm auf. Die Werte im Lysimeter können nicht durch Deponiegas verursacht sein, da dieser nach unten und zur Seite mit Kunststoffdichtungsbahn abgedichtet ist. Feld 2 wies mit einigen Punkten über 10 ppm im Versuchsfeldbereich und über 1000 ppm in der Umgebung deutliche Gasaustritte auf.

Die Begehung vom Juni 2002 ergab unter fallenden Luftdruckverhältnissen bei beiden Versuchsfeldern nur im Böschungsbereich zwei Punkte mit über 10 ppm, während in der Umgebung von Feld 1 zahlreiche Punkte mit über 10 ppm und von Feld 2 einige mit über 1000 ppm und einer mit über 10 000 ppm gemessen wurden.

Die Messungen belegen, dass im Falle der geringmächtigen Müllüberdeckung von Feld 2 durch die einfache Kapillarsperre bereits signifikant weniger Deponiegas austreten kann als durch die temporäre Abdeckung in der Umgebung des Versuchsfeldes. Auch im Feld 1, das auf einer mehrere Meter mächtigen Abdeckung aus bindigem Erdaushubmaterial über einem älteren Deponieabschnitt gebaut wurde, ist noch eine Verringerung der bereits schwächeren Gasemission messbar. Insbesondere bei fallendem Luftdruck sind auch durch die Kapillarsperre noch Deponiegasemissionen messbar, die jedoch nur bei einem Messpunkt 100 ppm überschritten.

8 Das Verhalten der Kapillarsperre im Bereich von Durchdringungen

Bisher nicht ausreichend geklärt ist die Frage, in welchem Ausmaß Durchdringungskörper wie zum Beispiel Gasbrunnen oder tiefreichende Wurzeln die Wirksamkeit von Kapillarsperren beeinträchtigen. Zur Untersuchung dieses Problems wurde in einem Versuchstank eine Kapillarsperre aufgebaut und ihr Verhalten vor und nach dem Einbau eines Durchdringungskörpers beobachtet. Die Arbeiten wurden im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt (REHM 2001).

8.1 Versuchsaufbau

Der verwendete Versuchstank hat sich bereits in anderen Laborversuchen bewährt (BAUER 2001). Er hat folgende Abmessungen: Länge: 150 cm, Breite: 50 cm, Höhe: 65 cm. Das hintere Ende kann durch eine Hubvorrichtung angehoben werden, um unterschiedliche Hangneigungen einzustellen (Abb. 48). Nahe dem Fußende wurde, als Modifikation des Aufbaus von BAUER (2001), eine 15 cm hohe Trennschwelle eingefügt. Dadurch werden die Abflüsse aus der Kapillarschicht und dem Kapillarblock, schon vor dem Erreichen kritischer Saugspannungen, im Bereich der Dräneinrichtung getrennt. Vor und hinter dieser Trennwand befand sich je ein Abfluss im Tankboden, der von einem Drahtsieb abgedeckt war. In einer Seitenwand sind 16 Bohrungen, die den Einbau von Tensiometern und Temperaturfühlern ermöglichen. Der Tank ist an der Oberseite zur Vermeidung von Verdunstungsfehlern verschließbar.

Um Vergleichsdaten der ungestörten Kapillarsperre zu erhalten wurde zunächst ein Versuchsaufbau ohne Durchdringungskörper erstellt und, wie bereits beim Großrinnenversuch beschrieben (Kap. 3.3), künstlicher Beregnung ausgesetzt. Anschließend wurde im unteren Drittel des Versuchstanks ein



Abb. 48: Versuchstank mit eingebauter Kapillarsperre und 26 % Neigung.



Abb. 49: Einbau des Durchdringungskörpers in die Kapillarsperre (zu sehen sind außerdem die Tensiometersonden).

Durchdringungskörper aus Polyethylenrohr mit 11 cm Durchmesser in den vorher verwendeten Kapillarsperrenaufbau eingegraben (Abb. 49). Die Durchdringung mit 11 cm sollte ein deutliches Hindernis für den Abfluss darstellen, aber nicht so breit sein, dass die Hydraulik im Bereich des Durchdringungskörpers schon von der Berandung durch den 50 cm breiten Versuchstank beeinflusst wird. Zur zusätzlichen Kontrolle der Auswirkungen des Durchdringungskörpers wurde unmittelbar um das untere Ende des Störkörpers ein Auffangbehälter eingebaut, dessen Wasserinhalt von oben durch Absaugen gemessen werden konnte.

8.2 Messergebnisse

Es wurde sowohl der Abfluss aus der Kapillarschicht als auch der Abfluss aus dem Kapillarblock über Kippzähler erfasst. Zur Beurteilung der Ergebnisse wird die in Stufen gesteigerte Beregnungsmenge der einzelnen Versuchsschritte mit dem dazu prozentualen Abfluss aus dem Kapillarblock verglichen.

Die Messergebnisse für den Vorversuch ohne Durchdringungskörper sind in Abb. 50 aufgetragen. Die Durchgangskurve zeigt jeweils in den ersten Versuchstagen einen erhöhten Wert, der sich nach einigen Tagen auf niedrigerem Niveau einpendelt. Ein Effekt der auch schon im Großrinnenversuch zu beobachten war (Abb. 19). Insgesamt ist die Wirksamkeit geringer als die Ergebnisse aus dem Großrinnenversuch, was auf die beengten Verhältnisse in dem kleinen Versuchstank zurückzuführen ist. Es wurde in etwa mit den gleichen Wassermengen wie in der Großrinne gearbeitet. Die Beregnungsmengen simulieren nicht den tatsächlichen Niederschlag, sondern den Sickerwasserandrang in der Kapillarsperre umgerechnet auf 30 m Hanglänge. Verglichen mit den Felddaten liegen die Zuflüsse jedoch bei 4 mm/d schon auf hohem Niveau, 6 mm/d werden nur an wenigen Tagen im Jahr erreicht (Kap. 5.2). Dabei wurden Durchgänge im Bereich von mehreren Prozent gemessen.

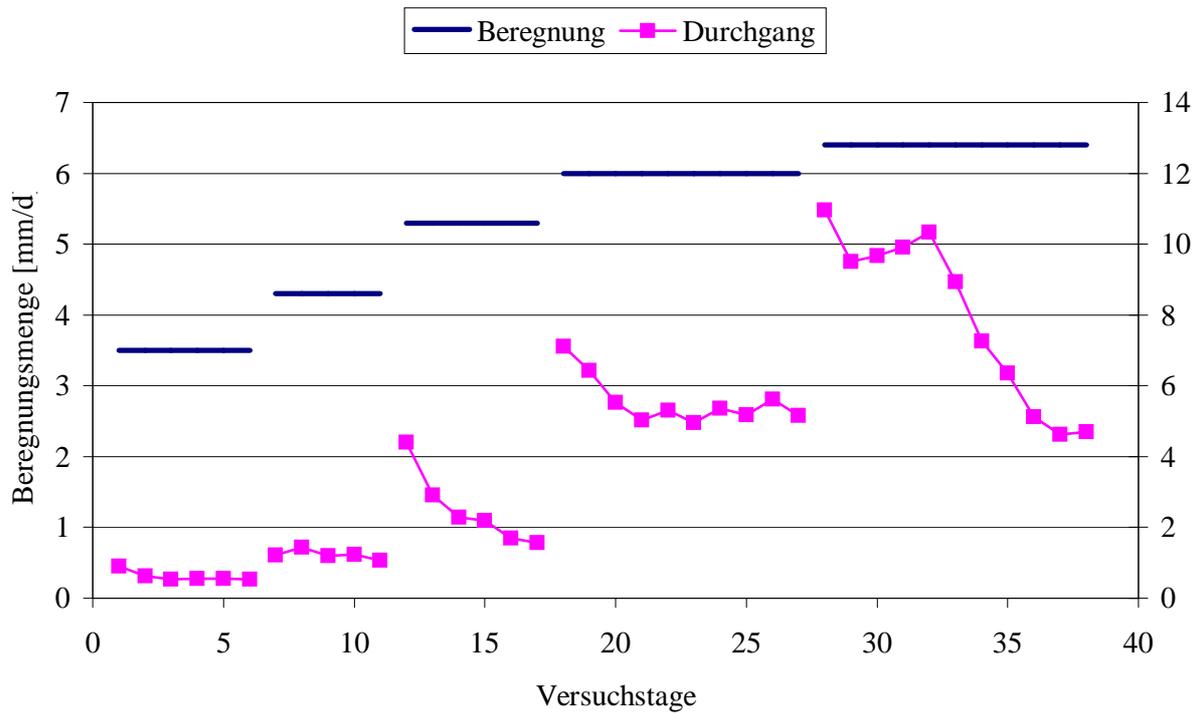


Abb. 50: Durchgang durch die Kapillarsperre für den Versuchsaufbau ohne Durchdringungskörper.

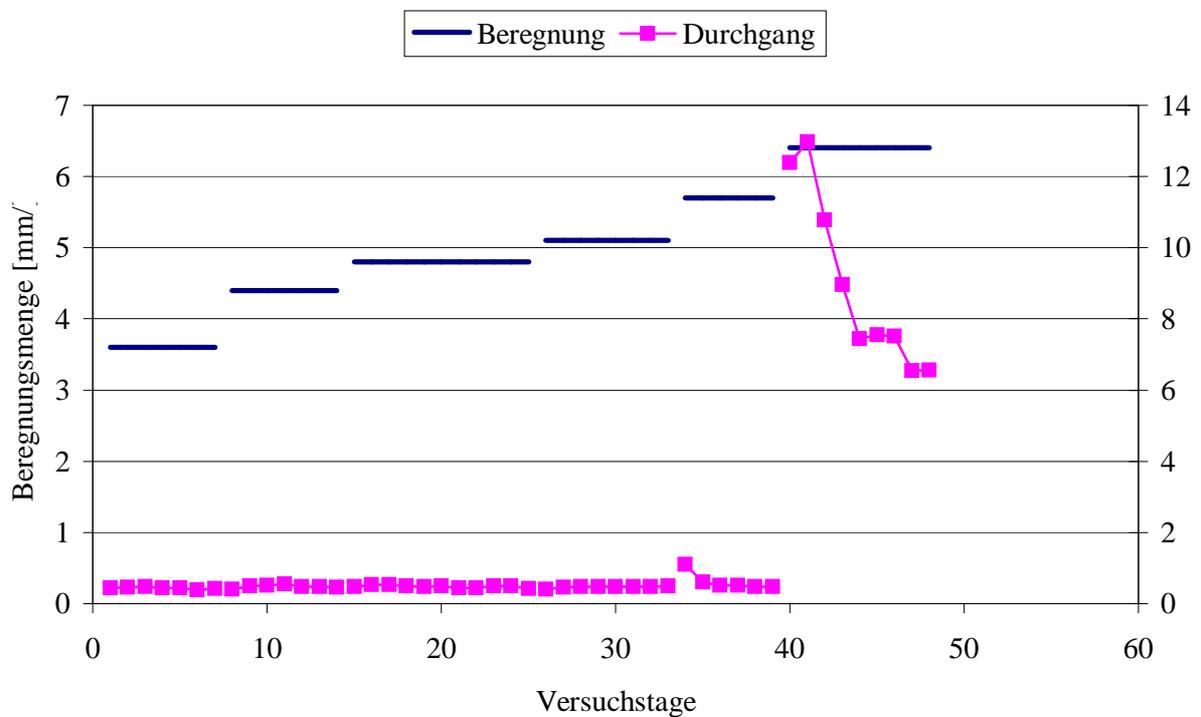


Abb. 51: Durchgang durch die Kapillarsperre für den Versuchsaufbau mit Durchdringungskörper.

Die Ergebnisse des Versuchsaufbaus mit Durchdringungskörper sind Abb. 51 aufgetragen. Dabei scheint sich die Wirksamkeit der Kapillarsperre, abgesehen von der letzten Beregnungsstufe, durch den Durchdringungskörper zu verbessern. Das kann daran liegen, dass der Durchdringungskörper den Sickerwasserandrang auf die kritische Dränung am Fußpunkt des Versuchstanks abbremst und auch in höhere Niveaus über dem Kapillarblock zwingt. Einen Hinweis darauf geben auch die gemessenen Saugspannungsverteilungen. Im Auffangbehälter unter dem Durchdringungskörper konnten bis zur letzten Beregnungsstufe keine relevanten Wassermengen gemessen werden und auch dann lagen die Wassermengen in der Größenordnung von 100 ml/d, bei 96 l/d Beregnungsvolumen.

Nach den Ergebnissen der Laborversuche kann davon ausgegangen werden, dass Durchdringungen keine wesentlichen Auswirkungen auf die Dichtwirkung der Kapillarsperre haben. Deshalb reicht für die Integration von Gasbrunnen oder Sickerwasserschächten in das Kapillarsperrensystem ein einfaches seitliches Anschütten mit den Baumaterialien aus. Außer einer genauen Herstellung der Schichtoberfläche in Handarbeit sind keine weiteren Maßnahmen notwendig.

Parallel zu den Laborversuchen durchgeführte Messungen an Durchdringungskörpern in den Versuchsfeldern erzielten keine plausiblen Ergebnisse. Vermutlich wurden die dazu eingebauten Auffangvorrichtungen um die Gasbrunnenrohre durch die Auflast der darüberliegenden Schichten beschädigt.

9 Zusammenfassung

Auf der Hausmülldeponie Heinersgrund der Stadt und des Landkreises Bayreuth wurden 1999 zwei etwa 2000 m² große Versuchsfelder mit Kapillarsperrensystemen und integrierten Großlysimetern mit je 20 m Breite und 30 m Hanglänge in unterschiedlichen Hangneigungen errichtet. Der Schichtaufbau besteht aus einer einfachen Kapillarsperre mit 0,30 m Kapillarblock und 0,50 m Kapillarschicht. Darüber liegt eine 1,50 m mächtige Wasserhaushaltsschicht. Die restliche Deponieoberfläche ist derzeit nur mit einer temporären Abdeckung versehen.

Vor Beginn der Bauarbeiten wurden die Kapillarsperrenmaterialien umfangreichen Laboruntersuchungen unterzogen. Aufgrund der aus Laboruntersuchungen (BAUER 2001, KÄMPF 2000) herausgearbeiteten Vorgaben (Tab. 2 und Abb. 5) konnte eine mit großer Wahrscheinlichkeit brauchbare Materialkombination für das Kapillarsperrensystem bereits anhand von Kornverteilungskurven und einfachen Materialparametern vorab ausgewählt werden. Nachdem sich die ermittelten Materialparameter als geeignet erwiesen hatten, erfolgte ein Eignungstest der Materialkombination durch einen mehrwöchigen Versuch in einer Großrinne mit 6 m Länge und 0,5 m Tiefe. Durch die gezielte Beaufschlagung des Systems mit Sickerwasser konnte eine Dränkapazität von 140 l d⁻¹ m⁻¹ bei 10 % Neigung und 290 l d⁻¹ m⁻¹ bei 25 % Neigung ermittelt werden.

Im Frühjahr 1999 wurde mit dem Bau der Versuchsfeldanlage begonnen. Für das Herstellen der Ausgleichsschicht auf der Deponieoberfläche konnte die vorhandene temporäre Abdeckung verwendet werden. Es wurde für das flache Versuchsfeld eine Basisfläche mit 10 % und für das steile eine mit 26 % Hangneigung eingerichtet. Daraufhin wurde der 30 cm mächtige Kapillarblock aufgebracht und mit einem Kettenbagger mit breiter Böschungsschaufel glatt gezogen. Letzte Unebenheiten mussten von Hand nachgearbeitet werden, um die geforderte Toleranz von ±2 cm an der, für die Funktion der Kapillarsperre wichtigen, Kapillarblockoberfläche zu erreichen. Die Qualität des angelieferten und des eingebauten Materials wurde anhand von Siebanalysen kontrolliert.

Nach einer Sichtkontrolle der Oberfläche durch die Bauleitung oder die wissenschaftliche Begleitung wurde eine geotextile Trennlage ausgerollt, um eine scharfe Trennung zwischen den Kapillarsperrenmaterialien zu gewährleisten. Anschließend wurde der Sand für die Kapillarschicht aufgeschüttet. Beim Befahren mit Baufahrzeugen war darauf zu achten, dass diese nur Flächen mit bereits aufgeschütteten Sand von mindestens 10 cm Mächtigkeit befahren, um die Oberfläche des Kapillarblocks nicht zu beschädigen. Für die Oberflächengenauigkeit war bei der geforderten Einbaustärke von 50 cm eine Genauigkeit von ±5 cm ausreichend. Zur Qualitätskontrolle dienten ebenfalls Siebanalysen.

Witterungsbedingte Verzögerungen des Baufortschrittes während des Einbaus der Kapillarsperre waren seltene Ausnahmen. Im Normalfall waren tiefgreifende Erosionserscheinungen auch während stärkerer Regeneinwirkung auf offenliegende Kapillarschichtflächen kaum zu beobachten.

Wegen des oft hohen Feinkornanteils der Wasserhaushaltsschicht kann eine Filterstabilität zum darunterliegenden Sand nicht gewährleistet werden. Deshalb wurde über dem Sand ebenfalls ein Geotextil ausgelegt.

Auf die fertig gestellte Kapillarschicht wurden 1,5 m Wasserhaushaltsschicht aufgebracht. Hauptaufgabe der Wasserhaushaltsschicht ist es, starke Niederschläge zu puffern und dadurch für einen ausgeglichenen Sickerwasserzufluss zur Kapillarschicht zu sorgen. Darüber hinaus schützt sie die darunterliegenden Schichten vor Erosion durch Wind oder Niederschlag und vor Beschädigung durch

Begehung, Befahrung, Durchwurzelung oder Frost. Das Material besteht aus unqualifiziertem Erd-aushub mit weit gestuftem Körnungsband und relativ hohem Schluffanteil.

Zur Bilanzierung der Abflüsse aus den unterschiedlichen Schichten sind in die beiden Versuchsfelder je ein Großlysimeter mit 600 m² integriert worden. Die Großlysimeter umfassten 30 m Hanglänge, 20 m Breite und in der Tiefe alle Schichten bis an die Untergrenze des Kapillarblocks. Ihre Begrenzung bestand aus Kunststoffdichtungsbahn mit stabilen Eckteilen aus Kunststoff.

Für die Fassung von Oberflächenabfluss, Kapillarschichtabfluss und Kapillarblockabfluss sorgten separate Dränleitungen. Unterhalb der zwei Versuchsfelder befand sich je ein Messcontainer in dem die zentrale Datenerfassung und die Kippzähler für die Abflussmessung untergebracht waren. Die Steuerung der Anlage und die Aufzeichnung der Messdaten übernahm je ein Datenlogger der über Datenfernübertragung bedient und ausgelesen werden konnte.

Die klimatischen Einflüsse auf die Versuchsfelder wurden von einer automatischen Wetterstation, kontinuierlich aufgezeichnet. Die dabei gemessenen Parameter waren Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Globalstrahlung, Windrichtung und Windgeschwindigkeit.

Für die Auswertung der Lysimeterabflüsse standen die Messjahre 2000, 2001 und 2002 zur Verfügung. Der Oberflächenabfluss war nach der Ausbildung einer durchgehenden Pflanzendecke vernachlässigbar und überschritt nur in sehr niederschlagsreichen Jahren 2 % des gesamten Jahresniederschla- ges. Die Evapotranspiration lag 2000 und 2001 zwischen 55 und 65 %. Im sehr niederschlagsreichen Jahr 2002 sank sie allerdings erheblich unter 50 %. Der überwiegende Teil der Lysimeterabflüsse wurde an der Dränung der Kapillarschicht erfasst. Lediglich bei sehr starken Niederschlagsereignissen traten auch im Kapillarblock nennenswerte Abflussmengen auf. Der Wirkungsgrad des Gesamtsystems lag, abgesehen vom flachen Versuchsfeld im sehr niederschlagsreichen Messjahr 2002, immer über 95 % des Jahresniederschla- ges. Der Wirkungsgrad des steilen Versuchsfeldes lag erwartungsge- mäß noch deutlich über 95 %.

Eine durchgeführte Modellierung der Wasserhaushaltsschicht mit dem HELP-Modell ergab zufriedenstellende Resultate. Unter Verwendung von in situ bestimmten Durchlässigkeitswerten für die Wasserhaushaltsschicht konnten die im Feldversuch gemessenen Werte mit sehr guter Übereinstimmung simuliert werden.

Die Simulation des Kapillarsperrensystems erfolgte mit einem zweidimensionalen finite Element Modell. Dabei konnte unter Verwendung der in den Vorversuchen indirekt nach VAN GENUCHTEN bestimmten Parameter für die ungesättigte Durchlässigkeit kein realitätsnahes Ergebnis erzielt werden. Erst mit, durch inverse Modellierung aus einem instationären Verdunstungsversuch ermittelten, Pa- rametern für die Kapillarschicht wurden Ergebnisse erzielt, die zur Prognose der Dichtwirkung einer Kapillarsperre geeignet sind. Es zeigte sich, dass das numerische Modell sehr sensitiv auf die Wahl der Parameter für die ungesättigte hydraulische Durchlässigkeit reagiert. Da die genaue Bestimmung die- ser Parameter sehr aufwendig ist und immer eine Restunsicherheit bleibt, ist für die Dimensionierung der Kapillarsperrenmaterialien ein Großrinnenversuch weiterhin die empfohlene Vorgehensweise.

Zur Untersuchung der Auswirkung von Durchdringungskörpern durch das Kapillarsperrensystem wurden Laborversuche durchgeführt. Sie machten deutlich, dass von Durchdringungskörpern durch die Kapillarsperre keine nachteiligen Auswirkungen zu erwarten sind.

Obwohl die Kapillarsperre an sich nicht gasdicht ist, kann durch den zusammenhängenden Wasser- film über der Grenze zum Kapillarblock die Gaswegsamkeit stark eingeschränkt werden. In Labor-

versuchen wurde nachgewiesen, dass die Gasdurchlässigkeit in einer wasserführenden Kapillarsperre gering ist. Gasmessungen auf den Versuchsfeldern ergaben, dass die Entgasung an der Oberfläche im Vergleich zu den nicht mit der Kapillarsperre abgedeckten Bereichen, erheblich reduziert wurde. Vor allem unter fallenden Luftdruckeinwirkungen sind jedoch noch geringe Gasmengen messbar.

Nach den vorliegenden Untersuchungen ist die Kapillarsperre als kostengünstige und sichere Alternative vor allem für die unter Umständen risseempfindliche mineralische Abdichtung gut geeignet. Für Deponieklasse I kann sie als einfaches Dichtungssystem eingesetzt werden. Für Deponieklasse II, wie sie in Heinersgrund vorliegt, wird die Kombination mit einem weiteren Dichtungselement, z. B. einer Kunststoffdichtungsbahn, empfohlen.

10 Literaturverzeichnis

- AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover.
- AKADEMIE FÜR BAUEN UND UMWELT E.V. (Hg.) (1999): Die Kapillarsperre – Beiträge zum Stand der Technik. Heidelberg: Springer.
- ALSTETTER, H. (2001): Ermittlung der Deponiegasdurchlässigkeit von Kapillarsperren in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Diplomarbeit, Universität München.
- AMANN, P. & MENDOZA, A. (1999): Geotechnische Stabilität von Kapillarsperrensystemen. In: AKADEMIE FÜR BAUEN UND UMWELT E.V. (Hg.), Die Kapillarsperre – Beiträge zum Stand der Technik, 97–109, Heidelberg: Springer.
- BALZ, K., BAUER, E. & WOHNLICH, S. (1999): Die Funktion von Geotextilien in Kapillarsperren. In: AKADEMIE FÜR BAUEN UND UMWELT E.V. (Hg.), Die Kapillarsperre – Beiträge zum Stand der Technik, 119–132, Heidelberg: Springer.
- BARTH, C. (2001): Reduction of seepage water in landfills using capillary barriers – results of large scale lysimeters at a sanitary landfill. In: WOHNLICH, S. & SEILER, K.-P. (Hg.), New Approaches Characterizing Groundwater Flow, 453–456, Lisse: Balkema.
- BARTH, C. & WOHNLICH, S. (1999): Proof of Effectiveness of a Capillary Barrier as Surface Sealing of a Sanitary Landfill. In: CHRISTENSEN, T. H., COSSU, R. & STEGMANN, R. (Hg.), Sardinia 99 – Proceedings of the Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, 389–392, Cagliari: CISA.
- BARTH, C. & WOHNLICH, S. (2001a): Construction and operation of two lysimeter with a capillary barrier as surface sealing. In: CHRISTENSEN et al. (2001), 355–360.
- BARTH, C. & WOHNLICH, S. (2001b): Proof of efficacy capillary barriers for capping of a sanitary landfill. In: SARSBY, R. W. & MEGGYES, T. (Hg.), The exploitation of natural resources and the consequences, 288–291, London: Telford.
- BAUER, E. (2001): Eignung verschiedener Materialien für Kapillarsperren – Auswahl und Dimensionierung. Münchner Geol. Hefte **B13**, 142 S.
- BERGER, K. (1998): Validierung und Anpassung des Simulationsmodells HELP zur Berechnung des Wasserhaushalts von Deponien für deutsche Wetterverhältnisse. Berlin: Umweltbundesamt.
- BERGER, K. (2000): Neues zur Entwicklung des HELP-Modells und zu Möglichkeiten und Grenzen seiner Anwendung. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten **47**, 19–49.
- BERGS, C.-G., DREYER, S. & RADDE, C.-A. (Hg.) (1997): TA-Siedlungsabfall. Berlin: Schmidt.
- BREH, W. & HÖTZL, H. (2000): Langzeituntersuchungen zur Wirksamkeit des Oberflächenabdichtungssystems mit Kapillarsperre auf der Deponie Karlsruhe West – Ergebnisse, Schlußfolgerungen und Ausblick. In: EGLOFFSTEIN, T., BURKHARDT, G. & CZURDA, K. (Hg.), Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten – Zeitgemäße Oberflächenabdichtungssysteme, 143–166, Berlin: Schmidt.

- BRUNSCHLIK, R. (1993): Der Einfluß von Geotextilien auf die Effektivität von Kapillarsperrensystemen. Diplomarbeit, Universität München.
- BRUNSCHLIK, R., WEIGL, P. & WOHNLICH, S. (1994): Kapillarsperren als alternative Barrieren in Oberflächenabdichtungen von Deponien. *Entsorgungspraxis* **3**, 16–21.
- BUCKINGHAM, E. (1907): Studies on the movement of soil moisture. U.S. Dept. of Agr. Bureau of Soils Bulletin **38**.
- BURKHARDT, G. & EGLOFFSTEIN, T. (2001): Die Kapillarsperre mit Wasserhaushaltsschicht – Ein Ausführungsbeispiel. In: EGLOFFSTEIN, T., BURKHARDT, G. & CZURDA, K. (Hg.), Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2000: Ökonomie contra Ökologie - sind Oberflächenabdichtungen noch zeitgemäß? – Abfall(vor)behandlung: eine Alternative zur Oberflächenabdichtung?, 263–274, Berlin: Schmidt.
- CHRISTENSEN, T. H., COSSU, R. & STEGMANN, R. (Hg.) (2001): Sardinia 2001 – Proceedings of the Eighth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari: CISA.
- DARCY, H. P. G. (1856): Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris: Dalmont.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK (1997): Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen, Fassung: 11/95. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (Hg.), GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten, 638–721, Berlin: Ernst.
- DIERSCH, H.-J. G. (2002a): Feflow 5.0 – Reference Manual. WASY GmbH, Berlin.
- DIERSCH, H.-J. G. (2002b): Feflow 5.0 – User's Manual. WASY GmbH, Berlin.
- DIERSCH, H.-J. G. & PERROCHET, P. (1999): On the primary variable switching technique for simulating unsaturated-saturated flows. *Advances in Water Resources* **23** (3), 271–301.
- DIN 18 121-1 (1998): Wassergehalt – Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.
- DIN 18 123 (1996): Bestimmung der Korngrößenverteilung. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.
- DIN 18 126 (1996): Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.
- DIN 18 130-1 (1998): Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.
- DIN 18196 (1988): Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.
- DIN 19685 (1997): Klimatologische Standortuntersuchung. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.
- DIN 4047-3 (2002): Landwirtschaftlicher Wasserbau - Begriffe - Teil 3: Bodenkunde, Bodensystematik und Bodenuntersuchung. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.

- DIN 4049-3 (1994): Hydrologie – Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.
- DIN 58666 (1966): Meteorologische Geräte – Niederschlags-Auffanggerät, 200 cm² Auffangfläche. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.
- DIN EN 13798 (2000): Hydrometrie – Spezifikation für eine Grube für Referenz-Regenmesser (Entwurf). Deutsches Institut für Normung e. V.
- DURNER, W. (1991): Vorhersage der hydraulischen Leitfähigkeit strukturierter Böden. Bayreuther Bodenkundliche Berichte **20**, 1–180.
- DVWK (1980): Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Lysimetern. DVWK Regeln zur Wasserwirtschaft **114**, 1–52.
- DVWK (1984): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten – Teil II: Synthese. DVWK Regeln zur Wasserwirtschaft **113**, 1–34.
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft **238**, 1–135.
- EMMERT, U. & WEINELT, W. (1962): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25 000 – Blatt Nr. 5935 Marktschorgast. München: Bayerisches Geologisches Landesamt.
- ENDERS, G. (Hg.) (1996): Klimaatlas von Bayern. München: Bayerischer Klimaforschungsverbund.
- FIGUEROA, R. A. (1998): Gasemissionsverhalten abgedichteter Deponien, Bd. 13. Bonn: Economica, hamburger berichte zur abfallwirtschaft Aufl.
- FOLLAND, C. K. (1986): A simple numerical model of the loss of rainfall catch from a standard 5" gauge due to wind. Züricher Geografische Schriften **23**.
- GARTUNG, E. & NEFF, H. K. (1998): Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponiebauwerke“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT). Bautechnik **75** (9), 616–630.
- GARTUNG, E. & NEFF, H. K. (2000): Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponiebauwerke“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT). Bautechnik **77** (9), 615–640.
- GEBISSA, A. & BOHNE, K. (1998): Ein Beitrag zur Ermittlung mechanischer und hydraulischer Eigenschaften ausgewählter mineralischer Dichtungsmaterialien. Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung **39** (5), 206–214.
- VAN GENUCHTEN, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. **44**, 892–898.
- GROSSMANN, M., STIMM, A. & MEHLISCH, C. (2001): Bautechnische Umsetzung einer Kapillarsperre als Oberflächenabdichtung am Beispiel der Deponie Penig (Modellstandort Sachsen). In: EGLOFFSTEIN, T., BURKHARDT, G. & CZURDA, K. (Hg.), Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2000, 275–291, Berlin: Schmidt.
- GRÄSLE, W. & HORN, R. (1998): Zum Einsatz numerischer Simulationen bei der Planung von Kapillarsperren als Oberflächenabdichtung am Beispiel der Deponie „Blockland“ (Bremen). Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung **39** (5), 199–205.

- GUYMON, G. L. (1994): *Unsaturated zone hydrology*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- HARTGE, K. H. (1998): Faktoren für die Wirksamkeit einer Kapillarsperre. *Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung* **39** (5), 194–198.
- HARTGE, K. H. & HORN, R. (1999): *Einführung in die Bodenphysik*. Stuttgart: Enke.
- HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. *Mitt. DWD* **2** (11), 1–24.
- HORN, R., JUNGE, T., THIENEMANN, J., GRÄSLE, W. & BAUMGARTL, T. (1996): Einige prinzipielle Überlegungen zu hydraulischen und mechanischen Prozessen in Deponieabdichtungen. *Mitt. d. Dt. Bodenkundlichen Gesellschaft* **79** (1), 47–49.
- HUBER, A. (2002): Deponiegasdränschichten. *Münchner Geol. Hefte* **B16**.
- V. D. HUDE, N. (1999): Die Kapillarsperre als Oberflächenabdichtungssystem von Deponien und Altlasten - Rinnenversuche und Bemessungsregeln. *Wasserbau-Mitteilungen* **41**, 161 S., TH Darmstadt.
- VON DER HUDE, N. (2000): Anwendung des HELP-Modells bei der Dimensionierung von Kapillarsperren. *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten* **47**, 123–134.
- V. D. HUDE, N. & MÖCKEL, S. (1997): Bau einer Kapillarsperre im Oberflächenabdichtungssystem der Deponie Breinermoor – Das Grundkonzept. *Müll und Abfall* **10**, 681–683.
- VON DER HUDE, N., MÖCKEL, S. & MENKE, W. (2001): Testfeldergebnisse der konventionellen Kapillarsperre und Kapillarsperreblockbahn im Oberflächenabdichtungssystem der Deponie Breinermoor. In: EGLOFFSTEIN, T., BURKHARDT, G. & CZURDA, K. (Hg.), *Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten 2001*, 295–316, Berlin: Schmidt.
- JELINEK, D. (1993): Probabau einer Kapillarsperre auf der Deponie „Am Stempel“. *Wasser und Boden* **45** (4), 261–264.
- JELINEK, D. (1997): Die Kapillarsperre als Oberflächenbarriere für Deponien und Altlasten – Langzeitstudien und praktische Erfahrungen in Feldversuchen. *Mitt. d. Inst. f. Wasserbau und Wasserwirtschaft* **97**, 141 S., techn. Univ. Darmstadt.
- JELINEK, D. & AMANN, P. (2001): Design and construction of capillary barriers in top cover systems for landfills – field experience. In: CHRISTENSEN et al. (2001), 346–354.
- JELINEK, D. & VON DER HUDE, N. (1994): Kapillarsperrensysteme auf der Deponie „Monte Scherbelino“. *Wasser und Boden* **46** (11), 60–65.
- KANZ, W. & SCHNITZER, W. A. (1978): Das Mainprojekt – Regionale hydrogeologische Untersuchungen in größeren Teilgebieten: Obermain. *Schriftenr. Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft* **7**, 36–49.
- KINDSMÜLLER, W. (1999): Gleichwertigkeitsnachweis für Deponieoberflächenabdichtungssysteme unter besonderer Berücksichtigung von Kapillarsperren. In: AKADEMIE FÜR BAUEN UND UMWELT E.V. (Hg.), *Die Kapillarsperre – Beiträge zum Stand der Technik*, 149–158, Heidelberg: Springer.

- KÄMPF, M. (2000): Fließprozesse in Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten - Grundlagen zur hydraulischen Bemessung. Mitt. d. Inst. f. Wasserbau und Wasserwirtschaft **97**, 141 S., techn. Univ. Darmstadt.
- KÄMPF, M., HOLFELDER, T. & MONTENEGRO, H. (2001): Material selection for capillary barriers. In: CHRISTENSEN et al. (2001), 325–334.
- MELCHIOR, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten **22**, 330 S.
- MUALEM, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research **12** (3), 513–522.
- PENMAN, H. L. (1956): Estimating Evaporation. Trans. Amer. Geophys. Union **1**, 43–50.
- PLAGGE, R. (1991): Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit im Boden. Bodenökologie und Bodengene **3**, 152 S.
- PRINZ, H. (1997): Abriß der Ingenieurgeologie. Stuttgart: Enke.
- RADDE, C.-A. (2001): Neue rechtliche Regelungen für Deponien und die Alagerung von Abfällen auf Deponien. In: EGLOFFSTEIN, T., BURKHARDT, G. & CZURDA, K. (Hg.), Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2001, 1–17, Berlin: Schmidt.
- REHM, A. (2001): Verhalten einer Kapillarsperre im Bereich einer Durchdringung. Diplomarbeit, Universität München.
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des deutschen Wetterdienstes **194**, 93 S.
- ROSS, B. (1990): The diversion capacity of capillary barriers. Water Resources Research **26** (10), 2625–2629.
- RUDAKOV, D. V. (2000): Modellierung des Wassertransportes in Kapillarsperren als Dichtungsschichten für Deponien. Techn. Ber., Inst. f. Allg. u. Angew. Geologie, Universität München.
- RUTTE, E. (1992): Bayerns Erdgeschichte. München: Ehrenwirth.
- SCHEFFER, F. & SCHACHTSCHABEL, P. (1998): Lehrbuch der Bodenkunde. Stuttgart: Enke.
- SCHEIBKE, R. (1998): Die Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit in Böden mit der Augenblicksprofilmethode. Bayreuther Forum Ökologie **57**, 191 S.
- SCHNATMEYER, C. & WAGNER, F. (1996): Oberflächenabdeckungen für Halden der Eisen- und Stahlindustrie. Schr. Angew. Geologie Karlsruhe **45** (2), 1–17.
- SCHROEDER, P. R., AZIZ, N. M., LLOYD, C. M. & ZAPPI, P. A. (1994): The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: User's Guide for Version 3. EPA/600/R-94/168a. U. S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.

- SCHROEDER, P. R., BERGER, K., AZIZ, N. M., LLOYD, C. M. & ZAPPI, P. A. (2002): Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Benutzerhandbuch für die deutsche Version 3. Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg, Hamburg.
- SEILER, K. P., VON LOEWENSTERN, S. & SCHNEIDER, S. (2002): Matrix and bypass-flow in quaternary and tertiary sediments of agricultural areas in south Germany. *Geoderma* **105** (3-4), 299–306.
- SEVRUK, B. (1986): Effect of wind and intensity of rain on the rain catch. *Züricher Geografische Schriften* **23**, 251–256.
- SEVRUK, B. (1989): Reliability of Precipitation measurement. In: SEVRUK, B. (Hg.), International workshop on precipitation measurement, 13–19, St. Moritz: Swiss Federal Institute of Technologie.
- SOKOLLEK, V., HAAMANN, H. & MEUSER, A. (1989): Precipitation measurement errors as a function of the degree of gauge site exposure. In: SEVRUK, B. (Hg.), International workshop on precipitation measurement, 109–116, St. Moritz: Swiss Federal Institute of Technologie.
- STEINERT, B. (1999): Kapillarsperren für die Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten – Bodenphysikalische Grundlagen und Kipprinnenuntersuchungen. *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten* **45**, 250 S.
- STEINERT, B., MELCHIOR, S., BURGER, K., BERGER, K. & TÜRK, M. (1997): Dimensionierung von Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. *Hamburger Bodenkundliche Arbeiten* **32**.
- STEINERT, B., MELCHIOR, S., KARIN, B., KLAUS, B., MICHAEL, T. & MIEHLICH, G. (1998): Dimensionierung von Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. In: AUGUST, H. (Hg.), Optimierung von Deponieabdichtungssystemen, 345–363, Berlin: Springer.
- SUMNER, G. N. (1988): *Precipitation – process and analysis*. Chichester: Wiley.
- TERZAGHI, K. & PECK, R. B. (1961): *Die Bodenmechanik in der Baupraxis*. Berlin: Springer.
- TINDALL, J. A. & KUNKEL, J. R. (1999): *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers*. Upper Saddle River: Prentice-Hall.
- VDI 3786 Blatt 2 (2000): *Umweltmeteorologie – Meteorologische Messungen für Fragen der Luftreinhaltung – Wind*. Verein Deutscher Ingenieure e. V.
- VDI 3786 Blatt 7 (1985): *Meteorologische Messungen für Fragen der Luftreinhaltung – Niederschlag*. Verein Deutscher Ingenieure e. V.
- WEBB, S. W. (1997): Generalization of Ross' tilted capillary barrier diversion formula for different two-phase characteristic curves. *Water Resources Research* **33** (9), 1855–1859.
- WILLIAMS, T. & KELLEY, C. (1999): Gnuplot – an interactive plotting program. URL <http://www.gnuplot.info/>, version 3.7.1.
- WOHNLICH, S. (1991): Kapillarsperren – Versuche und Modellberechnungen. *Schr. Angew. Geologie Karlsruhe* **15**, 128 S.

- WOHNLICH, S., BALZ, K. & BARTH, C. (2000): Einzelfallnachweis für alternative Oberflächenabdichtungen am Beispiel der Kapillarsperre. *Wasser und Boden* **52** (5), 15–18.
- WOHNLICH, S. & BAUER, E. (1999): Aufbau und Wirkungsweise der Kapillarsperre. In: AKADEMIE FÜR BAUEN UND UMWELT E.V. (Hg.), *Die Kapillarsperre – Beiträge zum Stand der Technik*, Heidelberg: Springer.
- ZEILINGER, J. (2001): Numerische Simulation von Kapillarsperren. Diplomarbeit, Universität Bayreuth.
- ZISCHAK, R. (1997): Alternatives Oberflächenabdichtungssystem Verstärkte mineralische Abdichtung mit Kapillarsperre – Wasserbilanz und Gleichwertigkeit. *Schr. Angew. Geologie Karlsruhe* **47**, 179 S.

11 Anhang

11.1 Skript zum Errechnen der VAN-GENUCHTEN-Parameter

```

#!/gnuplot
#
# vanGenuchten.plt

# Berechnung der ungesättigten Leitfähigkeit fuer Kapillarsperren
# nach van Genuchten (1980)
# Script für Gnuplot (www.gnuplot.info)
#
# Christoph Barth, 1999

# Die Messreihen der Wassergehalts-Saugspannungsbeziehung müssen in
# den Dateien pF-Werte.dat gespeichert sein. Format:

# Saugspannung [cm WS]          rel. Wassersättigung
# ...                          ...
#
# Dezimatzeichen: .

# Konstanten und Startwerte: (evtl. von Hand eingeben)
# Kapillarschicht:
kf = 0.000309 # kf-Wert 1 [m/s]
Wr = 0.04     # Residualwassergehalt [-]
Ws = 0.35    # Sättigungswassergehalt [-]
#
a = 0.02     # alpha [-] | Startwerte für
n = 2.5     # n [1/m] | van Genuchten Parameter

# Layout der Diagrammausgabe:
set border 31
set grid
set xrange [1 : 1000]
set logscale x
set ytics autofreq
set xtics autofreq
set format y "%.2f"
#set xlabel "water tension [hPa]"
set xlabel "Saugspannung [cm WS]"
#set ylabel "rel. water content [-]"
set ylabel "rel. Wassersättigung [-]"
if (save==1) set term postscr eps monochrome dashed
#if (save==1) set term postscr eps color solid

# Retentionsfunktion:
W(x) = Wr + (Ws - Wr) / ( (1 + (a*x)**n)**(1 - 1/n) )

# Anpassen der Messwerte

```

```

fit W(x) 'pF-Werte.dat' via a,n
show variables

# Grafische Ausgabe
if (save==1) set output "retention.eps"
plot W(x), 'pF-Werte.dat'
if (save==0) pause -1 \
    "pF-Kurvenanpassung beendet - Return drücken um fortzusetzen"

set nologscale
set ytics (1e-15, 1e-14, 1e-13, 1e-12, 1e-11, 1e-10, 1e-09, 1e-08, \
    1e-07, 1e-06, 1e-05, 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 1)
set xtics 10
#set xlabel "water tension [hPa]"
set xlabel "Saugspannung [cm WS]"
set xrange [ 0 : 200 ]
#set ylabel "K [m/s]"
set ylabel "ku [m/s]"
#set logscale x
set logscale y
set format x "%g"
set format y "%.0e"

# Ku-Funktion:

K(x)=kf*(1-(a*x)**(n-1)*(1+(a*x)**n)**(-(1-1/n)))**2/ \
    (1+(a*x)**n)**(0.5*(1-1/n))

# Grafische Ausgabe Ku-Funktion
if (save==1) set output "ku.eps"
plot K(x) lw 2

set nologscale

#EOF

```

11.2 Fotodokumentation der Baumaßnahmen



Abb. 52: Versuchsfelduntergrund mit Sandschutzschicht für die Lysimeterbasis.



Abb. 53: Basis des Lysimeters aus sandrauher Kunststoffdichtungsbahn.



Abb. 54: Feinarbeiten zum Angleichen der Kapillarblockoberfläche.



Abb. 55: Aufbringen des Kapillarschichtmaterials auf das Geotextil.



Abb. 56: Entwässerungsgraben mit Dränrohr für die Kapillarschicht.



Abb. 57: Angleichen der Kapillarschichtoberfläche.



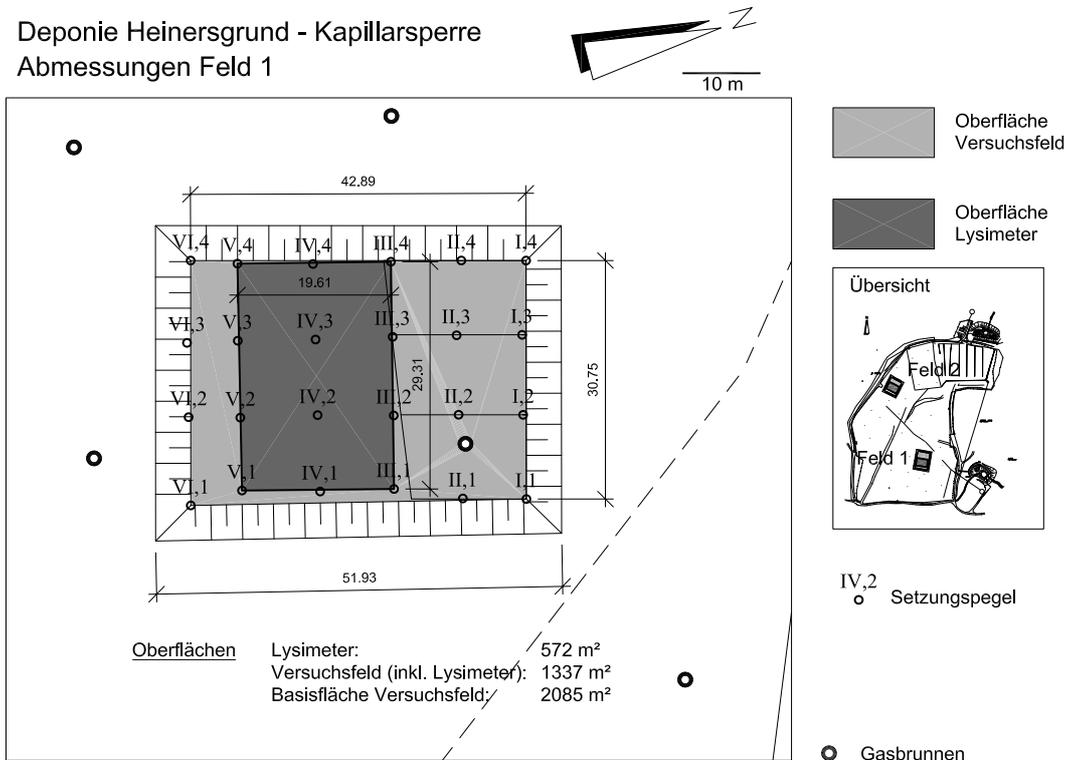
Abb. 58: Aufbringen der Rekultivierungsschicht, im Vordergrund die Lysimetergrenze.



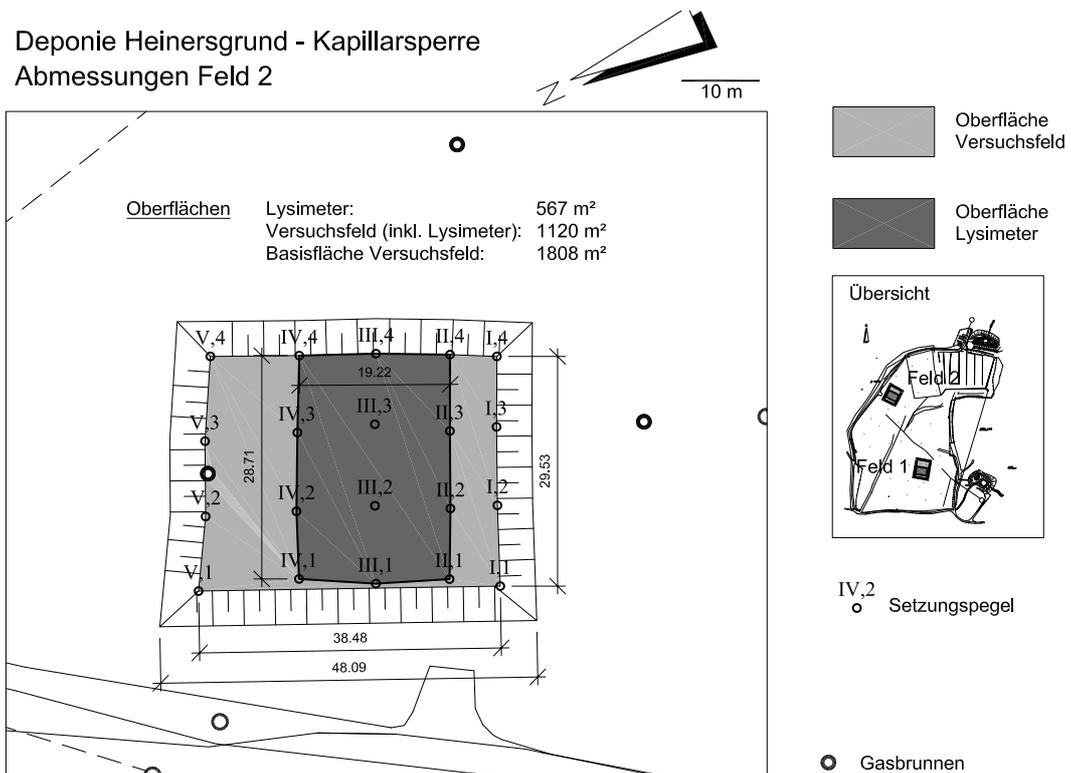
Abb. 59: Oberfläche von Lysimeter 1 mit kiesgefülltem Entwässerungsgraben kurz nach der Fertigstellung.

11.3 Abmessungen der Versuchsfelder

Deponie Heinersgrund - Kapillarsperre
Abmessungen Feld 1

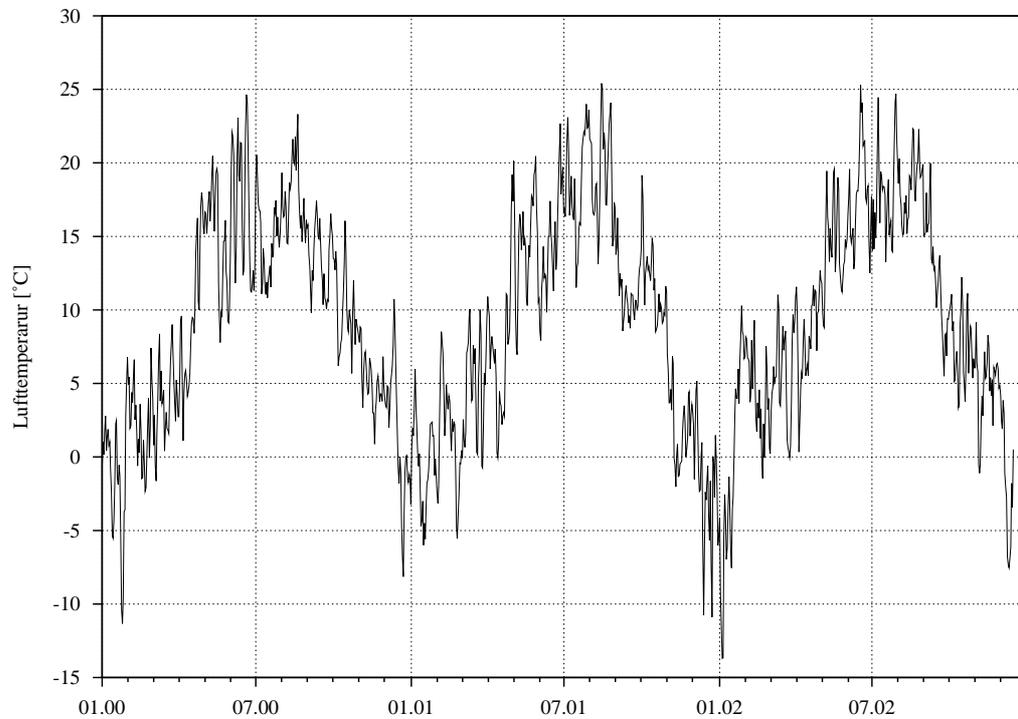


Deponie Heinersgrund - Kapillarsperre
Abmessungen Feld 2

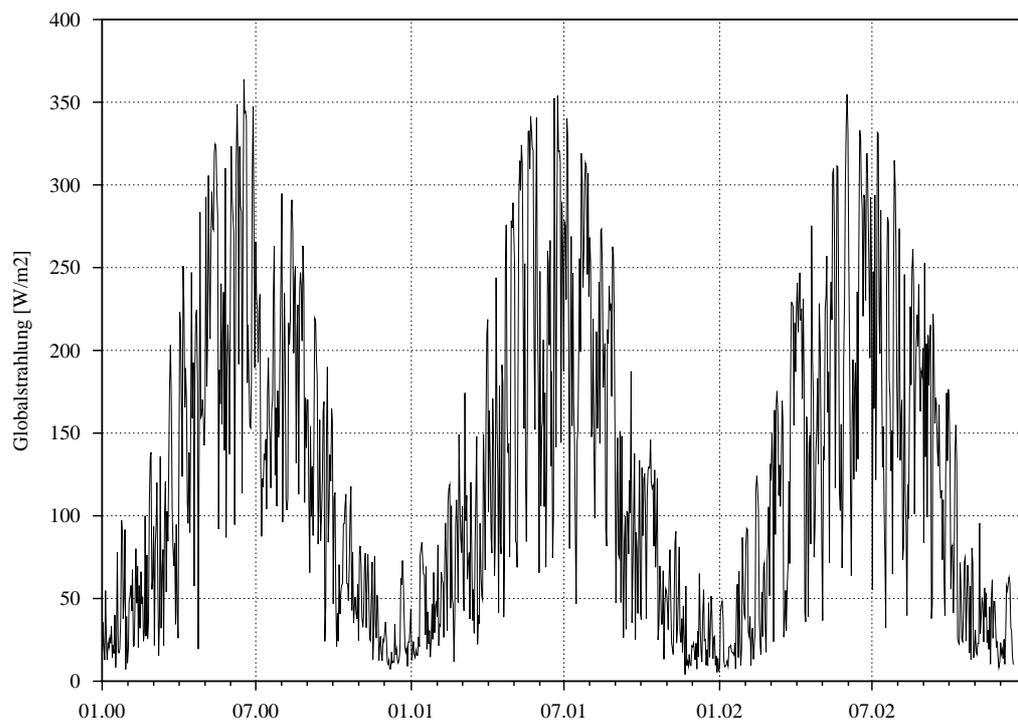


11.4 Atmosphärische Messungen

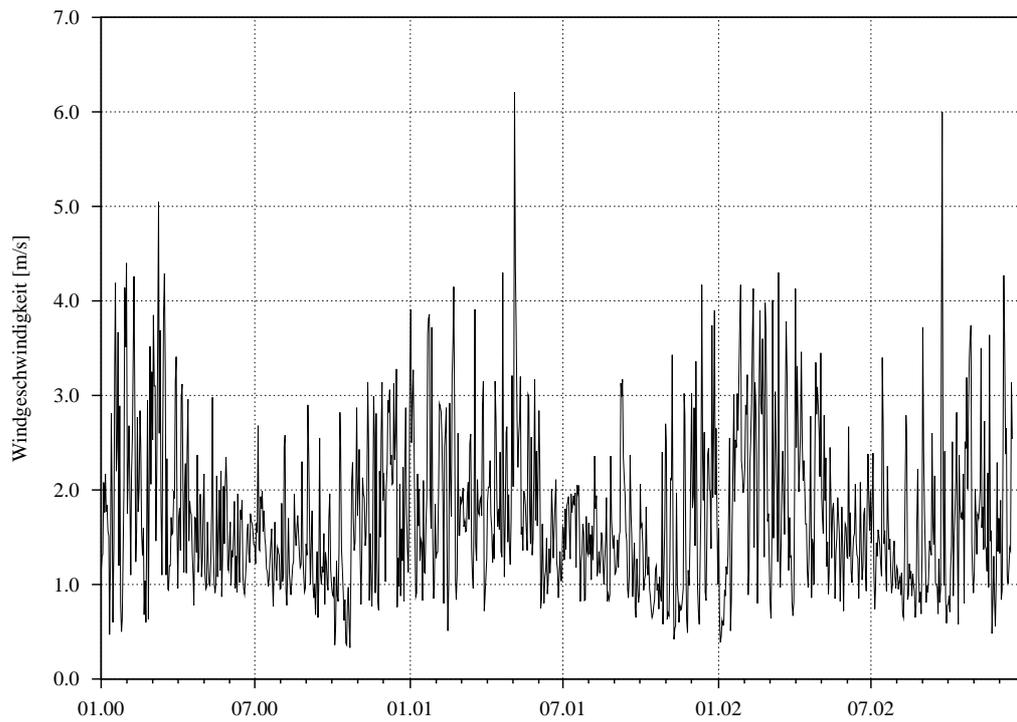
11.4.1 Tagesmittelwerte der Lufttemperatur



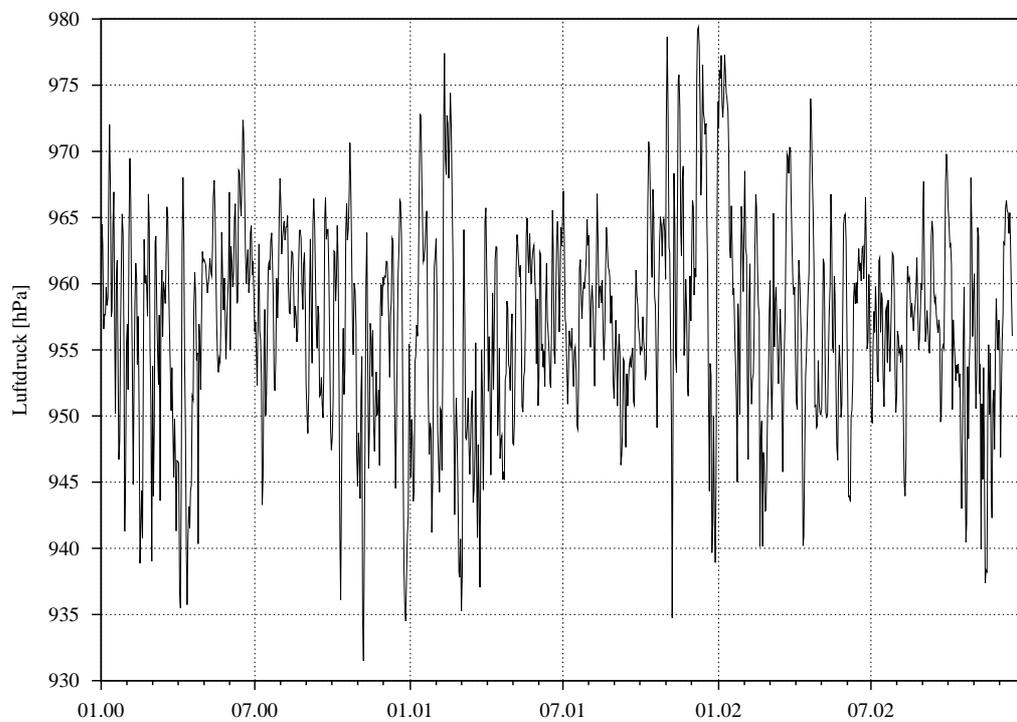
11.4.2 Tagesmittelwerte der Globalstrahlung



11.4.3 Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit



11.4.4 Tagesmittelwerte des Luftdrucks

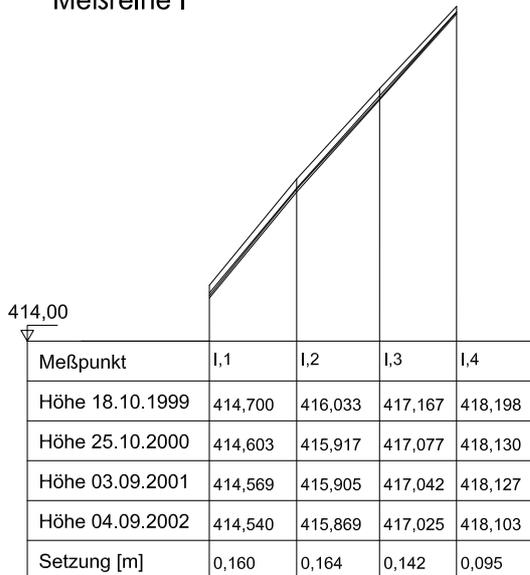


11.5 Ergebnisse der Setzungsvermessung

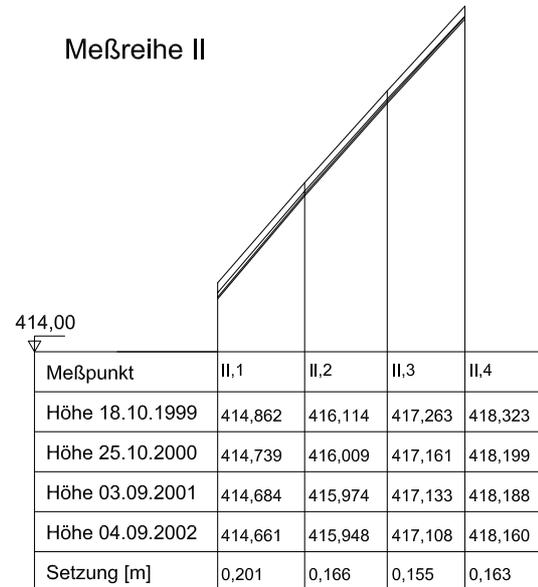
Maßstab 1 : 1000, 10fach überhöht

11.5.1 Setzungen Versuchsfeld 1

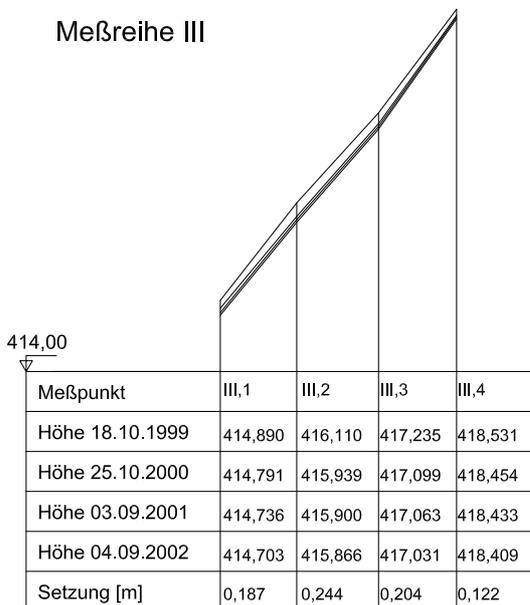
Meßreihe I



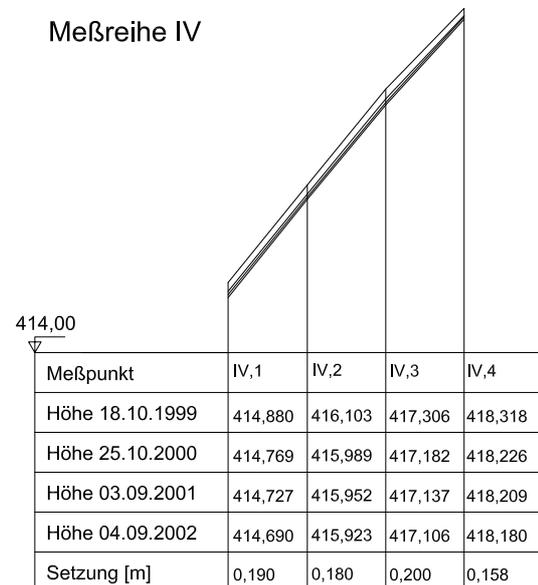
Meßreihe II



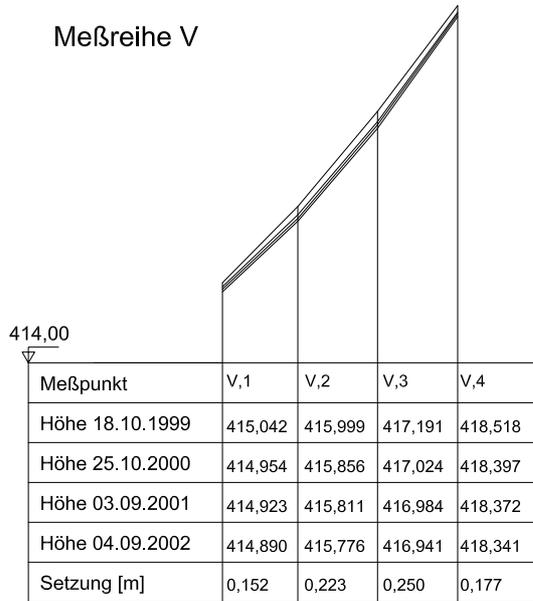
Meßreihe III



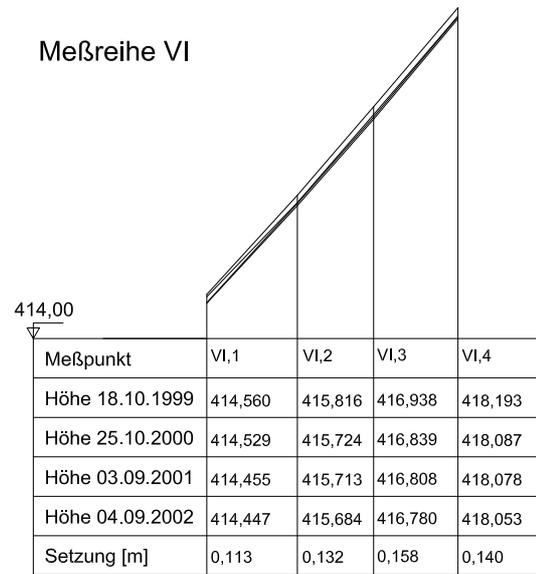
Meßreihe IV



Meßreihe V

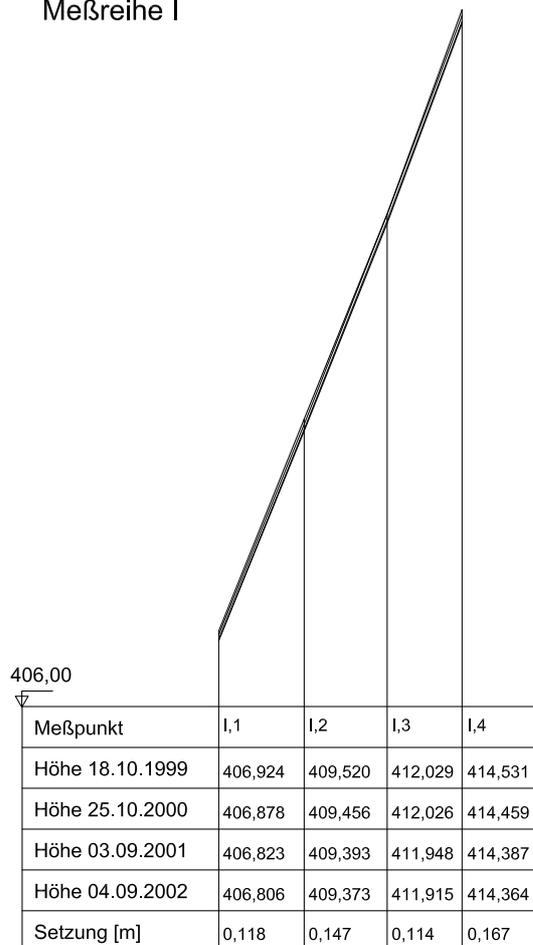


Meßreihe VI

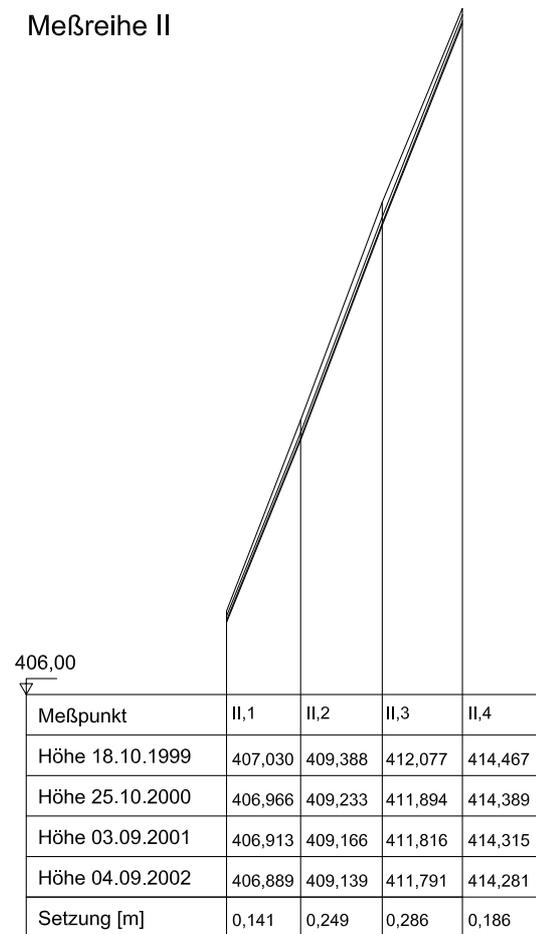


11.5.2 Setzungen Versuchsfeld 2

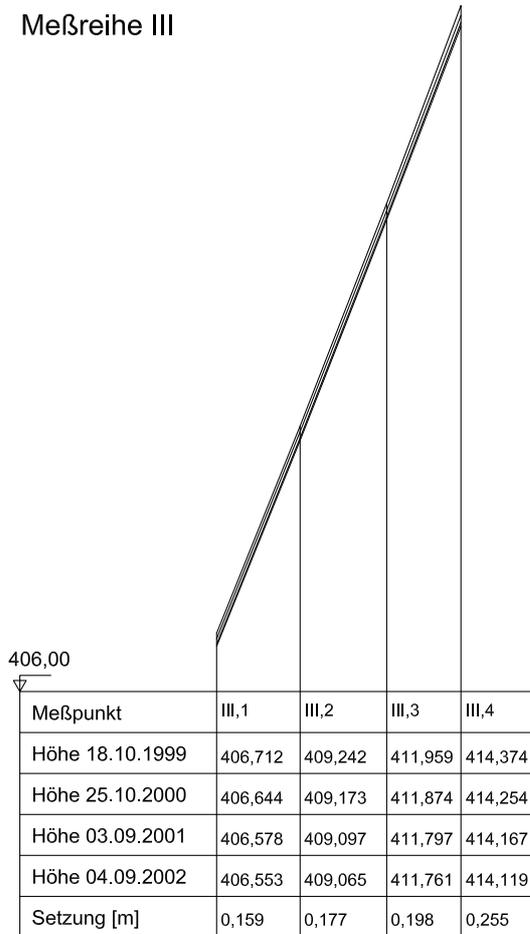
Meßreihe I



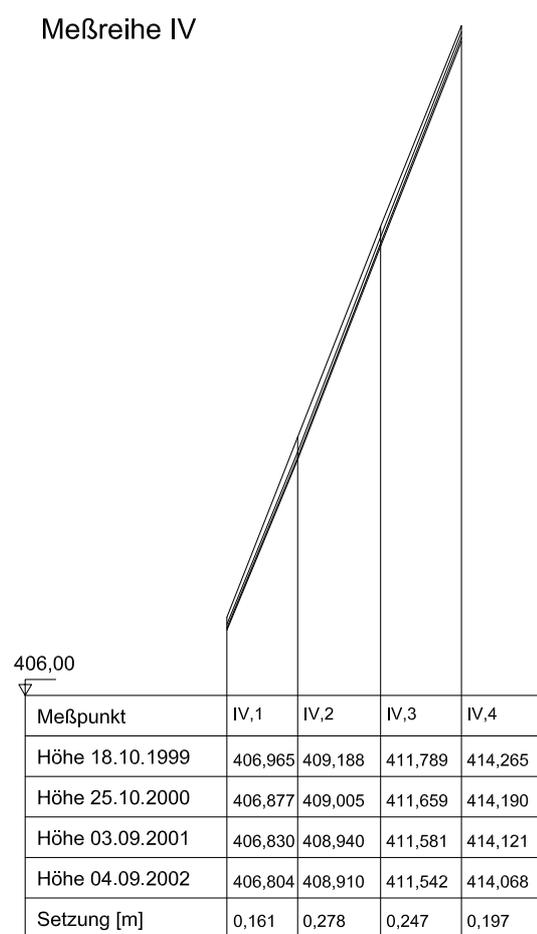
Meßreihe II



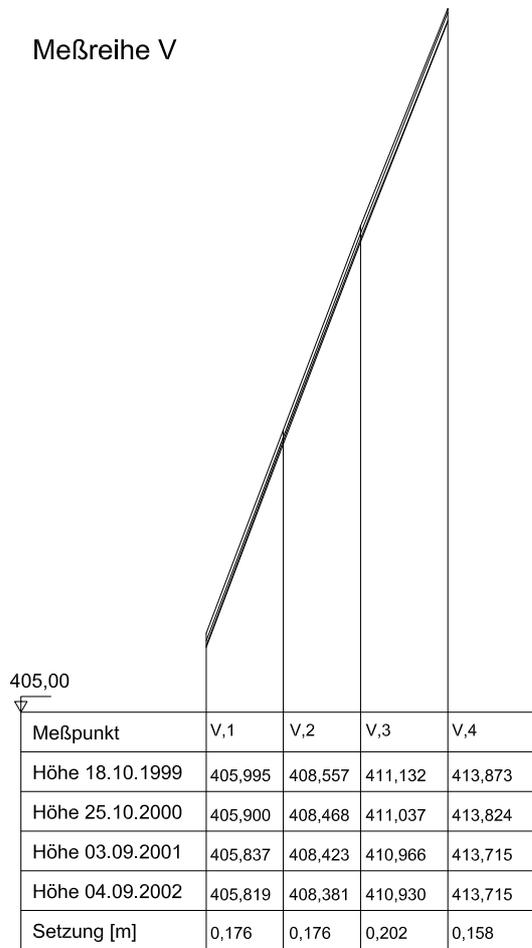
Meßreihe III



Meßreihe IV

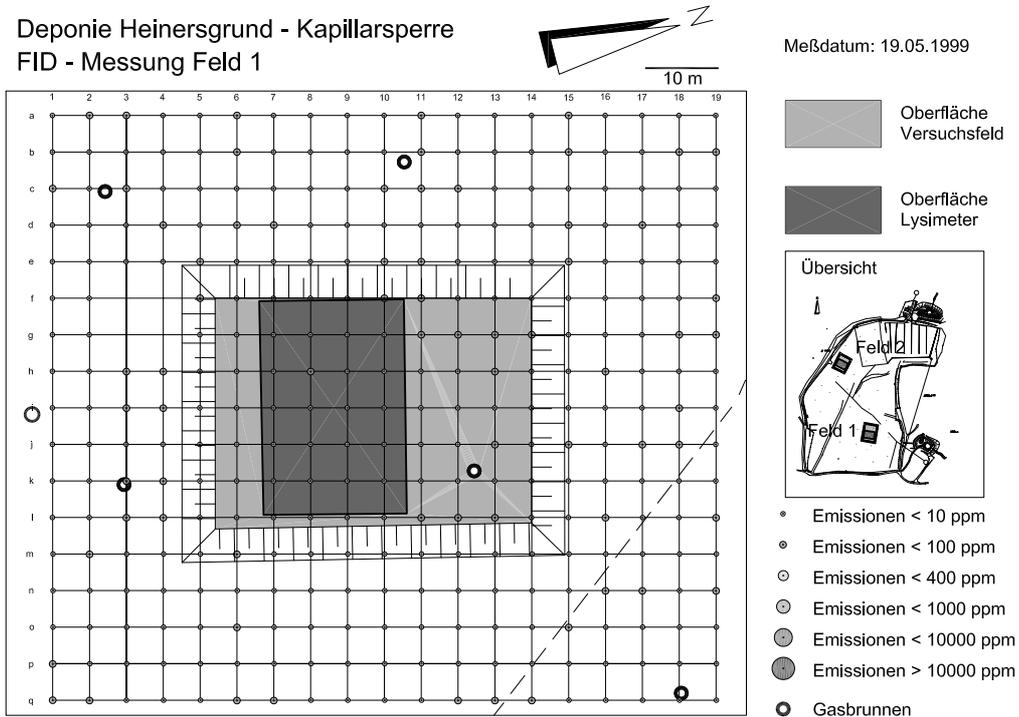


Meßreihe V

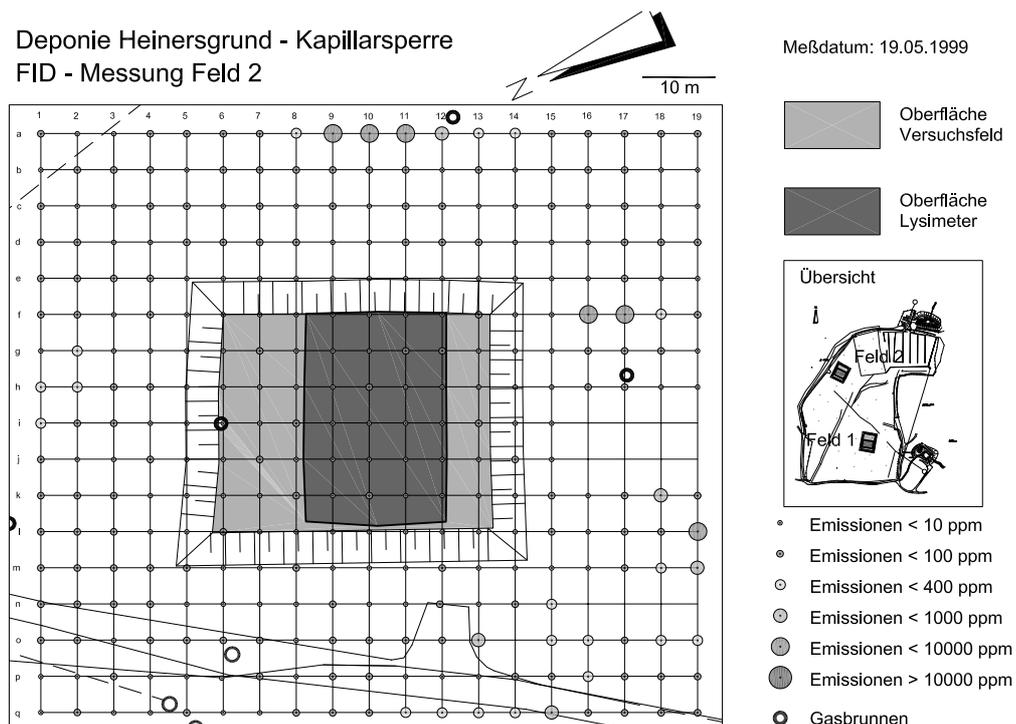


11.6 Messungen der Gasemission auf den Versuchsfeldern

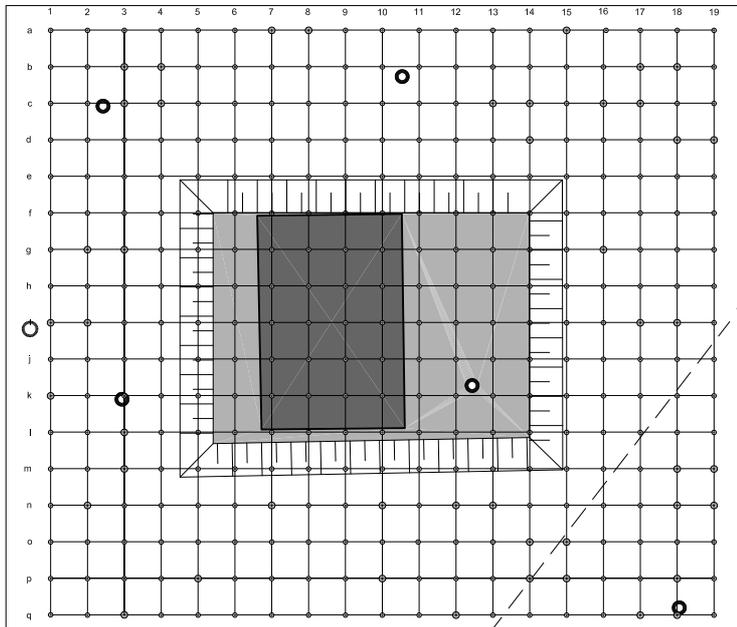
Deponie Heinersgrund - Kapillarsperre
FID - Messung Feld 1



Deponie Heinersgrund - Kapillarsperre
FID - Messung Feld 2



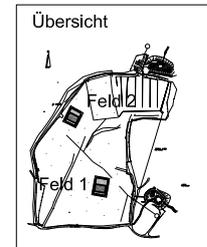
Deponie Heinersgrund - Kapillarsperre
FID - Messung Feld 1



Meßdatum: 23.09.1999

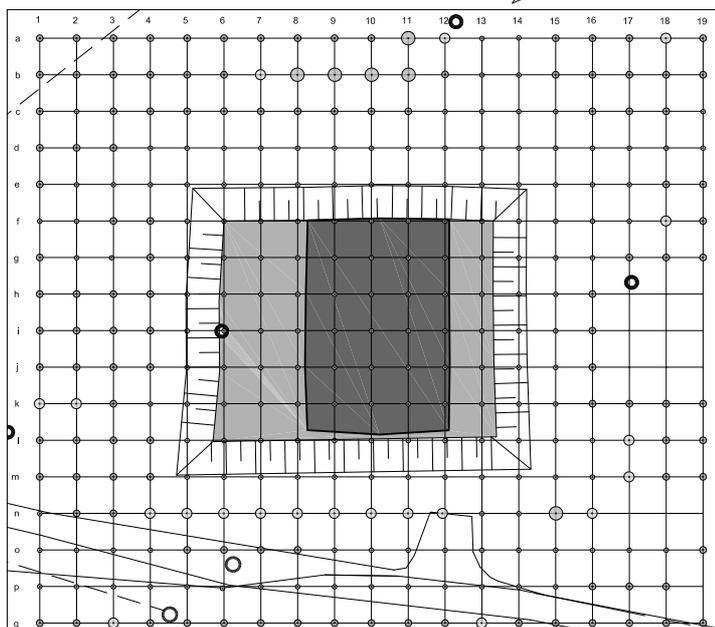
Oberfläche Versuchsfeld

Oberfläche Lysimeter



- Emissionen < 10 ppm
- Emissionen < 100 ppm
- ⊙ Emissionen < 400 ppm
- ⊖ Emissionen < 1000 ppm
- ⊙ Emissionen < 10000 ppm
- ⊙ Emissionen > 10000 ppm
- ⊙ Gasbrunnen

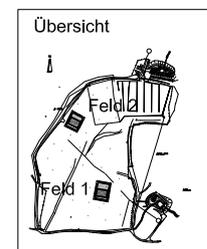
Deponie Heinersgrund - Kapillarsperre
FID - Messung Feld 2



Meßdatum: 23.09.1999

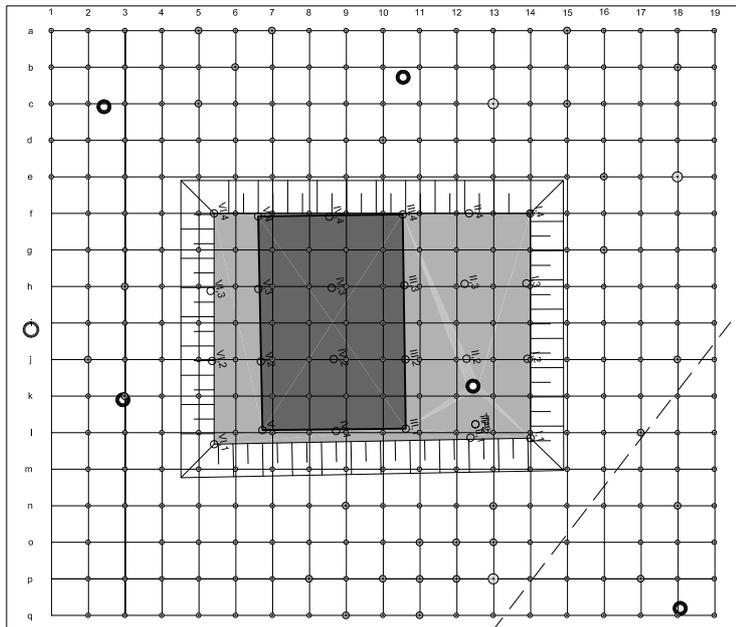
Oberfläche Versuchsfeld

Oberfläche Lysimeter



- Emissionen < 10 ppm
- Emissionen < 100 ppm
- ⊙ Emissionen < 400 ppm
- ⊖ Emissionen < 1000 ppm
- ⊙ Emissionen < 10000 ppm
- ⊙ Emissionen > 10000 ppm
- ⊙ Gasbrunnen

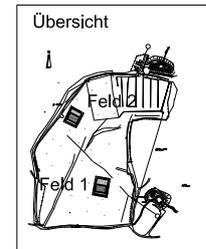
Deponie Heinersgrund - Kapillarsperre
FID - Messung Feld 1



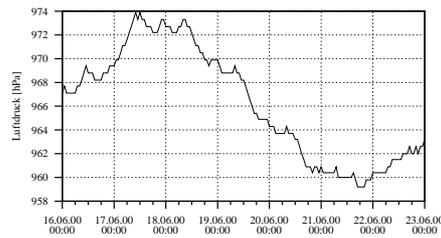
Meßdatum: 19.06.2000

Oberfläche Versuchsfeld

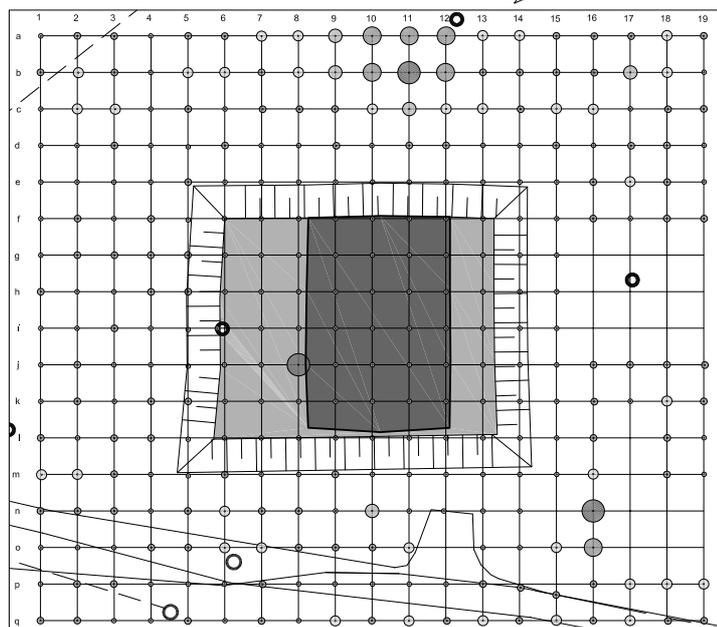
Oberfläche Lysimeter



- Emissionen < 10 ppm
- Emissionen < 100 ppm
- Emissionen < 400 ppm
- ⊙ Emissionen < 1000 ppm
- ⊕ Emissionen < 10000 ppm
- ⊗ Emissionen > 10000 ppm
- ⊙ Gasbrunnen



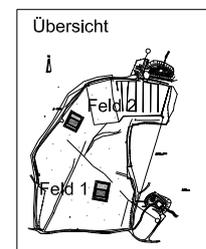
Deponie Heinersgrund - Kapillarsperre
FID - Messung Feld 2



Meßdatum: 19.06.2000

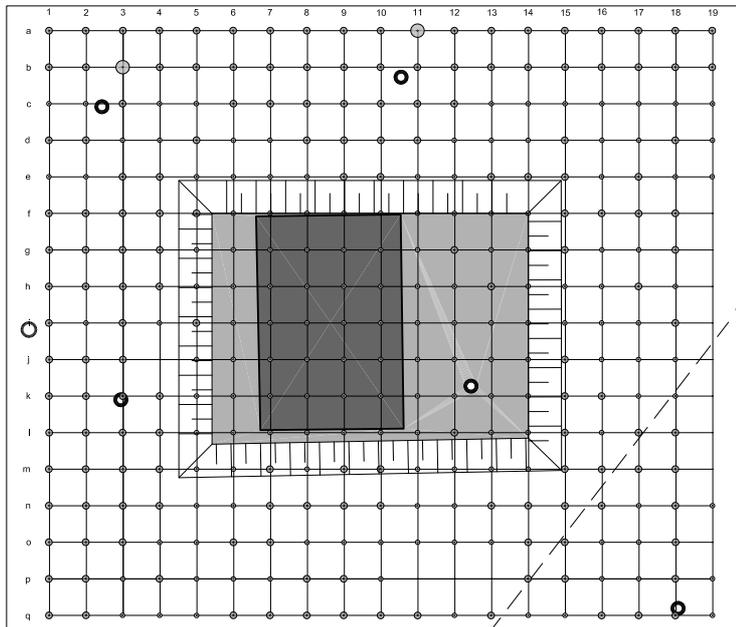
Oberfläche Versuchsfeld

Oberfläche Lysimeter



- Emissionen < 10 ppm
- Emissionen < 100 ppm
- Emissionen < 400 ppm
- ⊙ Emissionen < 1000 ppm
- ⊕ Emissionen < 10000 ppm
- ⊗ Emissionen > 10000 ppm
- ⊙ Gasbrunnen

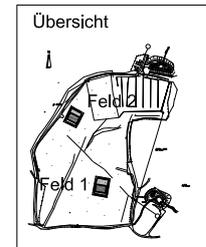
Deponie Heinersgrund - Kapillarsperre
FID - Messung Feld 1



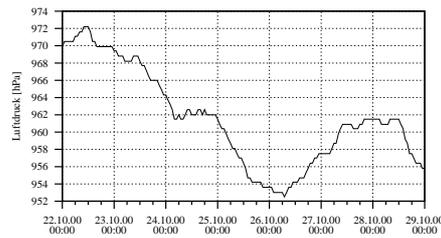
Meßdatum: 25.10.2000

Oberfläche Versuchsfeld

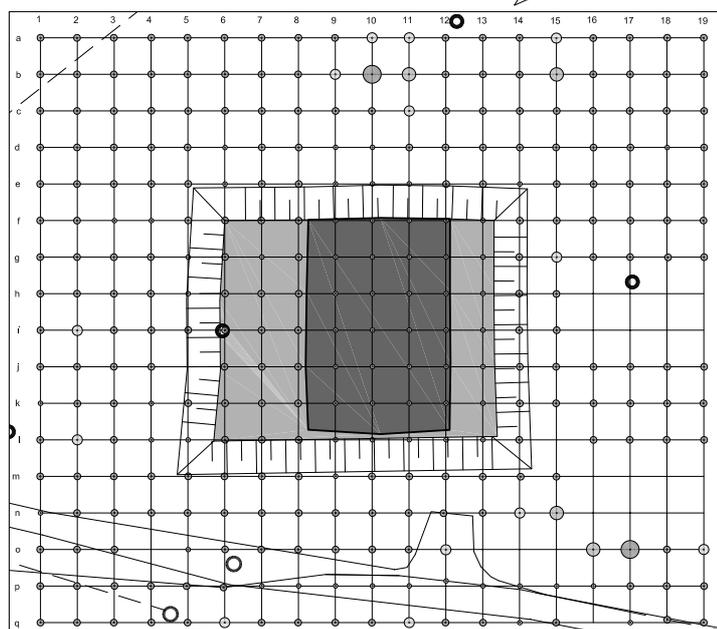
Oberfläche Lysimeter



- Emissionen < 10 ppm
- Emissionen < 100 ppm
- Emissionen < 400 ppm
- ⊙ Emissionen < 1000 ppm
- ⦿ Emissionen < 10000 ppm
- Emissionen > 10000 ppm
- ⊙ Gasbrunnen



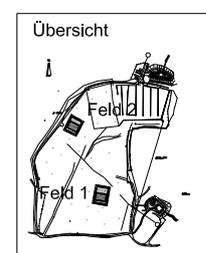
Deponie Heinersgrund - Kapillarsperre
FID - Messung Feld 2



Meßdatum: 25.10.2000

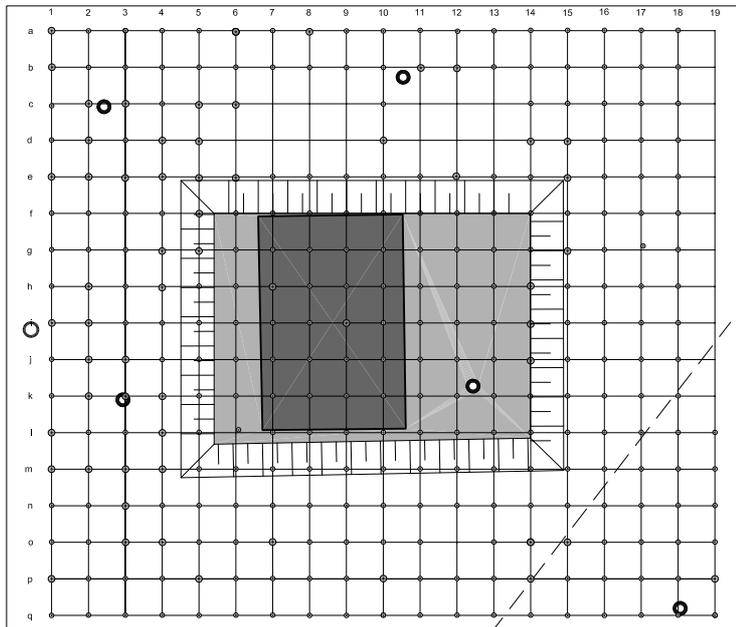
Oberfläche Versuchsfeld

Oberfläche Lysimeter



- Emissionen < 10 ppm
- Emissionen < 100 ppm
- Emissionen < 400 ppm
- ⊙ Emissionen < 1000 ppm
- ⦿ Emissionen < 10000 ppm
- Emissionen > 10000 ppm
- ⊙ Gasbrunnen

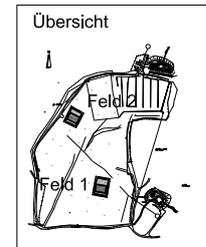
Deponie Heinersgrund - Kapillarsperre
FID - Messung Feld 1



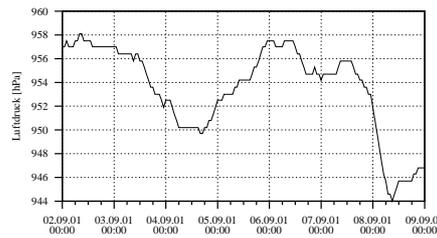
Meßdatum: 05.09.2001

Oberfläche Versuchsfeld

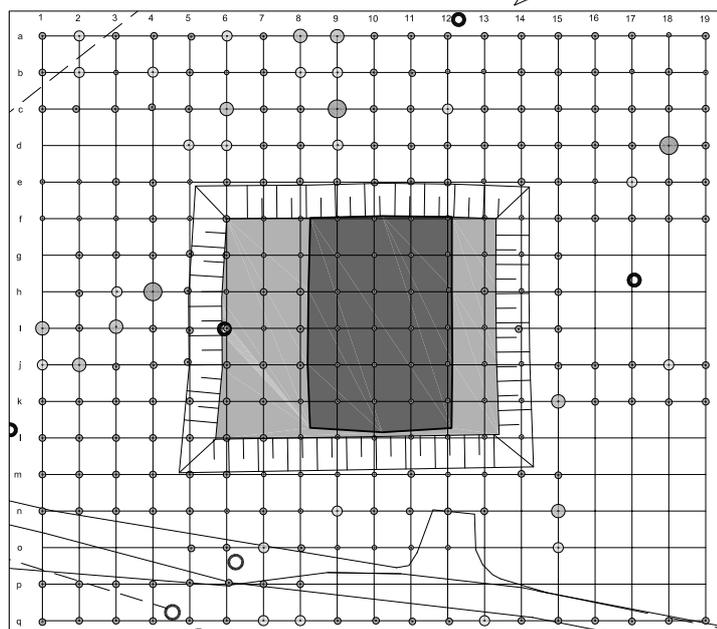
Oberfläche Lysimeter



- Emissionen < 10 ppm
- Emissionen < 100 ppm
- Emissionen < 400 ppm
- ⊙ Emissionen < 1000 ppm
- ⊗ Emissionen < 10000 ppm
- ⊕ Emissionen > 10000 ppm
- ⊙ Gasbrunnen



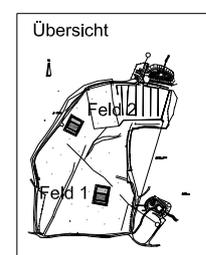
Deponie Heinersgrund - Kapillarsperre
FID - Messung Feld 2



Meßdatum: 05.09.2001

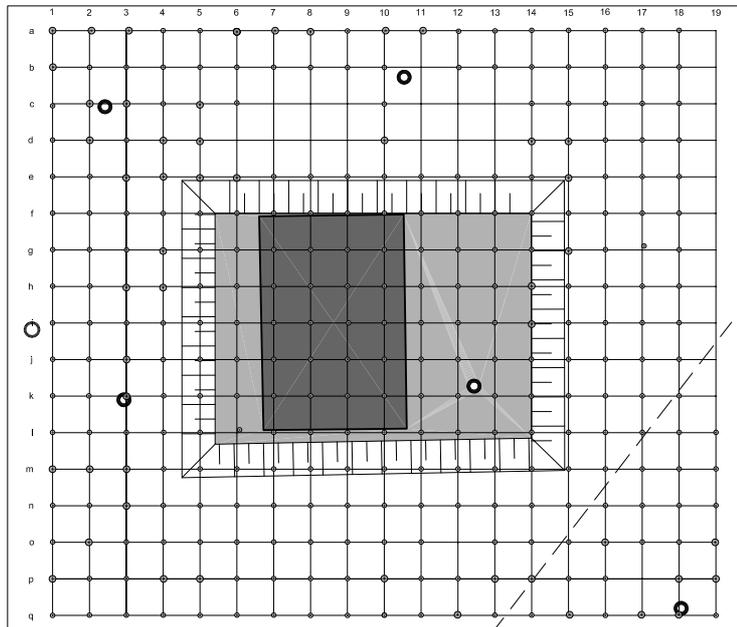
Oberfläche Versuchsfeld

Oberfläche Lysimeter



- Emissionen < 10 ppm
- Emissionen < 100 ppm
- Emissionen < 400 ppm
- ⊙ Emissionen < 1000 ppm
- ⊗ Emissionen < 10000 ppm
- ⊕ Emissionen > 10000 ppm
- ⊙ Gasbrunnen

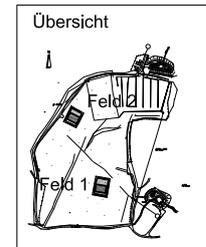
Deponie Heinersgrund - Kapillarsperre
FID - Messung Feld 1



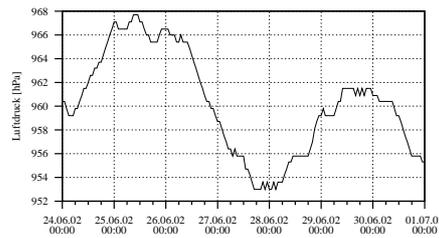
Meßdatum: 27.06.2002

Oberfläche Versuchsfeld

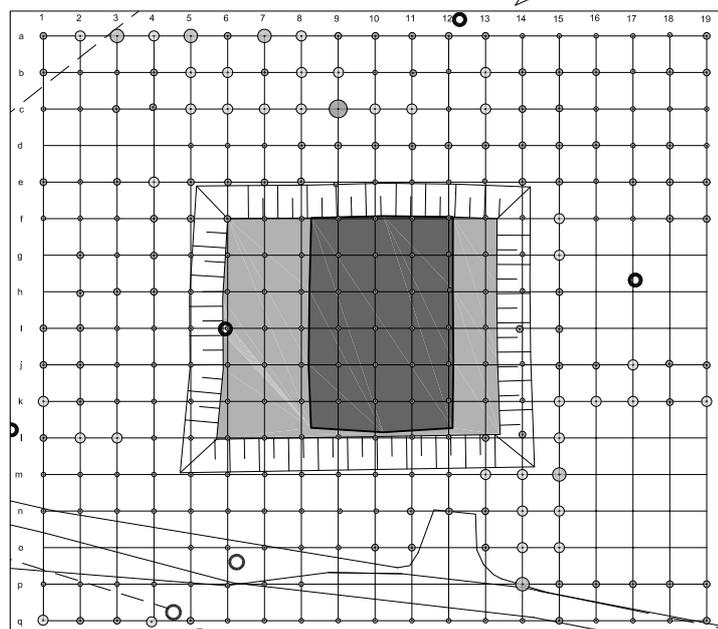
Oberfläche Lysimeter



- Emissionen < 10 ppm
- Emissionen < 100 ppm
- ⊙ Emissionen < 400 ppm
- ⊖ Emissionen < 1000 ppm
- ⊕ Emissionen < 10000 ppm
- ⊗ Emissionen > 10000 ppm
- ⊗ Gasbrunnen



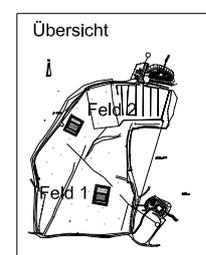
Deponie Heinersgrund - Kapillarsperre
FID - Messung Feld 2



Meßdatum: 27.06.2002

Oberfläche Versuchsfeld

Oberfläche Lysimeter



- Emissionen < 10 ppm
- Emissionen < 100 ppm
- ⊙ Emissionen < 400 ppm
- ⊖ Emissionen < 1000 ppm
- ⊕ Emissionen < 10000 ppm
- ⊗ Emissionen > 10000 ppm
- ⊗ Gasbrunnen

11.7 Auf den Versuchsfeldern eingesetzte Feldmessgeräte

Gerät	Messgröße	Einheit	Hersteller
Durchflussmesser	Wassermenge	m ³	UFT Dr. Brombach, Bad Mergentheim
Niederschlagsmesser	Niederschlagshöhe	mm	Seba Hydrometrie, Kaufbeuren
Lufttemperatursensor	Lufttemperatur	°C	Rotronic, Bassersdorf (CH)
Luftfeuchtesensor	rel. Luftfeuchte	%	Rotronic, Bassersdorf (CH)
Windrichtungssensor	Windrichtung	°	Vector Instruments, North Wales (GB)
Windgeschwindigkeitssensor	Windgeschwindigkeit	m/s	Vector Instruments, North Wales (GB)
Sternpyranometer	Globalstrahlung	W/m ²	Ph. Schenk, Wien (A)
Tensiometer	Wasserspannung	hPa	UIT, Dresden
FDR-Sonden	Wassergehalt	Vol. %	Delta-T, Cambridge (GB)
Bodentemperaturfühler	Bodentemperatur	°C	UP, Kolkwitz, Landshut
Datenlogger	Messwerterfassung und Steuerung		Delta-T, Cambridge (GB)

11.8 Kalibrierung der Durchflusszähler

Abfluss	Seriennr.	Herst. Ang. [l]	Messung [l]	Fehler [%]
KB Lysimeter 1	99-006	5,00	4,87	2,7
Obfl. Lysimeter 1	99-004	4,85	4,87	2,6
KS Lysimeter 1	99-009	4,85	4,93	1,4
KS Feld 1	99-008	5,05	5,02	-0,3
KB Lysimeter 2	99-011	5,13	5,44	-8,9
KB Lysimeter 2 (rep)	99-011	5,13	4,87	2,5
Obfl. Lysimeter 2	99-012	5,03	4,92	1,7
KS Lysimeter 2	99-007	5,15	5,01	-0,3
KS Feld 2	99-010	4,98	4,92	1,7

Lebenslauf

Name: Christoph Barth
Wohnsitz: Hochlandstraße 10
83623 Dietramszell
Geburtsdatum: 21.05.1966
Geburtsort: Burghausen
Familienstand: verheiratet, zwei Kinder

1972 bis 1979: Grund- und Hauptschule Burgkirchen

1979 bis 1983: Staatl. Realschule Altötting

1983 bis 1987: Berufsausbildung zum Energieanlagenelektroniker bei der Hoechst AG, Werk Gendorf

1987 bis 1988: Zivildienst als Rettungsdiensthelfer beim Bayerischen Roten Kreuz, Kreisverband Altötting

1988 bis 1990: Staatliche Berufsoberschule Altötting
Abschluss am 29.06.1990 mit der fachgebundenen Hochschulreife, Ausbildungsrichtung Technik

1990 bis 1997: Studium der Geologie/Paläontologie an der Ludwig-Maximilians-Universität in München
Abschluss am 25.02.1997 als Diplomgeologe

15.03.97 bis 31.08.02: wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Hydro- und Umweltgeologie von Prof. Dr. Stefan Wohnlich am Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie der Universität München
Aufgabengebiete: Konzeption und Durchführung von Labor und Feldversuchen, Grundwassermodellierung, Lehrveranstaltung „Übungen zur Anwendung von Grundwassermodellen“, Erstellen von Gutachten, Netzwerkadministration, Internetauftritt

seit 01.02.03: Mitarbeiter der ISAR CONSULT GmbH, Geretsried
mit den Aufgabenschwerpunkten Hydrogeologie und numerische Grundwassermodellierung