

E Experimentelle Nachweise zur Funktionsdauer von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten

Prof. Dr.-Ing. Werner Blümel, Hannover

Dipl.-Ing. Antje Müller-Kirchenbauer, Hannover

Experimentelle Nachweise zur Funktionsdauer von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen für Deponien und Altlasten

Werner Blümel und Antje Müller-Kirchenbauer

Henning Ehrenberg und Kent von Maubeuge

1 Einleitung

Bentonitmatten (GTD) werden weltweit im Deponie- und Wasserbau für Abdichtungszwecke eingesetzt. Im Deponiebau ersetzen sie die in den Regelsystemen vorgeschriebene mineralische Dichtungsschicht. Die Gleichwertigkeit der Bentonitmatte bzgl. der in den abfallrechtlichen Vorschriften vorgesehenen Mindestanforderungen muss durch experimentelle Untersuchungen zur Dichtungswirksamkeit und Funktionsdauer nachgewiesen werden. Die Anforderungen an ein Material zur Eignungsbeurteilung für den Einsatz als Deponieoberflächenabdichtung wurden im April 2005 von der LAGA Ad-hoc-AG definiert. Die Nachweise können demnach im Labor- bzw. Feldversuch, und/oder durch Berechnungen erfolgen. Dabei sind materialspezifische Besonderheiten zu berücksichtigen. In Feldversuchen kann das Abdichtungsverhalten der Bentonitmatte über längere Zeiträume unter deponieähnlichen Randbedingungen geprüft werden, die dabei unter Verwendung unterschiedlicher Testfeldaufbauten variiert werden können. Anhand der gemessenen Wasserhaushaltsgrößen (Abb. 1) wie Niederschlag, Drainage, Durchsickerung etc. können z. B. Rückschlüsse darauf gezogen werden, wie sich die Dichtungswirksamkeit einer Bentonitmatte langfristig entwickelt oder in welcher Weise die über der Bentonitmatte angeordneten Schichten des Dichtungssystems auszubilden und zu dimensionieren sind, um die Funktion zu erhalten. Solche Feldversuche können in Testfeldern erfolgen, deren Fläche mehrere hundert Quadratmeter groß sein kann. Hilfsweise ist aber auch eine Prüfung in kleineren Systemen -beispielsweise in Lysimetern- möglich. Die Betriebsdauer von großen Testfeldern ist oftmals aus wirtschaftlichen Gründen auf ein bis drei Jahre begrenzt, wohingegen eine Lysimeteranlage mit vergleichsweise geringem finanziellen Aufwand langfristig in Betrieb bleiben kann und zudem auch wartungstechnisch besser zu beherrschen ist.

Im Jahr 1998 wurden in Lemförde im Westen Niedersachsens sechs Lysimeter innerhalb eines Erdhügels installiert. Über den zu untersuchenden Bentonitmatten wurden sowohl die Einbaudicke als auch die Durchlässigkeit der überdeckenden Rekultivierungsschicht variiert.

Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse der bisher etwa sieben Jahre umfassenden Messreihen der Lysimeteranlage in Lemförde dokumentiert und mit Ergebnissen von anderen Testfeldern verglichen. Diese Untersuchungen dienen als ein Nachweis zur Beurteilung der Funktionsdauer und des langfristigen Dichtungsverhaltens von Bentonitmatten und wurden in Anlehnung an die Untersuchungen von MAILE durchgeführt, die schon 1997 als Grundlage für die DIBt Zulassung für das Produkt Bentofix® herangezogen worden sind.

2 Aufbau der Lysimeteranlage

Die Lysimeteranlage enthält sechs Einzellysimeter, die aus aufeinandergesetzten Betonringen mit einem Durchmesser von je zwei Metern bestehen (Abb. 2). Die Wassermengen von Niederschlag, Drainage und Durchsickerung werden mit einer Kippwaagenmesseinrichtung im 10-Minuten-Takt digital erfasst und können über eine Telefonleitung abgerufen werden. Die Lysimeter und ein Raum mit den verschiedenen Messeinrichtungen befinden sich im Inneren eines Erdhügels. Die Konstruktionsdetails der Anlage wurden von BLÜMEL et al. (2002) beschrieben.

Die Schichtensysteme der Lysimeter 1 bis 3 wurden in Anlehnung an den Aufbau von Deponie-Oberflächenabdichtungen gewählt (Abb. 4). Die bodenmechanischen Parameter für das Material der jeweils rd. 1 m dicken Rekultivierungsschicht, bei dem es sich um einen schluffigen Mittel- bis Feinsand mit einem Schluffanteil von etwa 15 bis 20 % und etwa 3 bis 10 % Kieskornanteil handelte, wurden im Labor ermittelt. Der Glühverlust beträgt weniger als 3 % und der Kalkgehalt ist kleiner als 1 %. Die Korndichte beträgt $2,60 \text{ g/cm}^3$ und die Proctordichte etwa $1,85 \text{ g/cm}^3$ bei einem Wassergehalt von 12 %. Der Rekultivierungsboden wurde 1998 mit einem Wassergehalt von etwa 15 bis 16 % und einer Dichte von etwa $1,9 \text{ g/cm}^3$ in die Lysimeter eingebracht. Die Feldkapazität des Erdstoffs beträgt etwa 20,5 % und der permanente Welkepunkt liegt bei etwa 7 %. Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert des relativ dicht eingebauten Rekultivierungsbodens wurde in mehreren Durchlässigkeitsversuchen im Labor mit etwa 10^{-7} bis 10^{-8} m/s ermittelt.

Die Rekultivierungsschicht der Lysimeter 1 und 2 wurde zwecks Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit nach etwa 3,5 Jahren Betriebszeit ausgetauscht, indem sie in Lysimeter 2 unverdichtet wieder eingebaut und in Lysimeter 1 durch einen grobsandigen Mittelsand ersetzt wurde. Der generell gut wasserdurchlässige Sand wurde zudem locker eingebaut. In diesem Zustand ergibt sich für im Labor untersuchte Materialproben des Sandes ein Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von rd. 10^{-3} bis 10^{-4} m/s .

Die Lysimeter 4 bis 6 wurden erst im August 2001 in Betrieb genommen und oberhalb der Bentonitmatten mit 0,65 bis 0,85 m (Abb. 6) schluffigem Sand, dessen Materialkenngrößen dem Rekultivierungsboden der Lysimeter 2 und 3 entsprechen, befüllt. Die Überdeckung der Bentonitmatten in diesen Lysimetern ist somit wesentlich geringer als es für eine Dichtungsschicht im Deponiebau üblich ist.

3 Messergebnisse

Zur Ermittlung der maßgeblichen Wasserhaushaltsgrößen und zur Beurteilung der Funktionalität der verschiedenen Dichtungssysteme in den Lysimetern werden die Niederschlagsdaten des Standortes, die Temperatur, die Windgeschwindigkeit, die Dränagewassermenge und die Wassermenge, die durch die Matte sickert, gemessen.

Die Abb. 3 zeigt für Lysimeter 1 bis 3 die Summenkurven der Messwerte des Niederschlags, der Dränage und der Durchsickerung in Millimetern im Zeitraum von Januar 1999 bis Oktober 2005. Zudem sind exemplarisch für Lysimeter 4 die monatlichen Messwerte als Säulendiagramme in Abb. 5 für den Zeitraum von August 2001 bis Oktober 2005 aufgetragen. Die Dränagewassermengen steigen tendenziell im Winterhalbjahr an und nehmen dann im Sommerhalbjahr wieder ab. Für die Durchsickerung der Bentonitmatten ist kein ausgeprägter jahreszeitbedingter Rhythmus erkennbar.

Nach dem in Abschn. 2 beschriebenen Umbau im Juli 2002 steigt die Dränagewassermenge der Lysimeter 1 und 2 im Vergleich zu den vorangegangenen Jahren deutlich an. Dieser Effekt wird durch die erhöhte Durchlässigkeit der eingebauten Erdstoffe sowie die verminderte Feldkapazität verursacht. Einhergehend mit der Erhöhung der Dränagewasserabflüsse hat sich die Durchsickerung in Lysimeter 1 deutlich reduziert (Abb. 7). Lysimeter 2 zeigt trotz der erhöhten Dränageabflüsse seit Juli 2003 keinerlei Durchsickerungswasserabfluss mehr. Um auszuschließen, dass dieses Phänomen durch eine Verstopfung im Abflusssystem verursacht wird, wurde das Lysimeter im Sommer 2005 aufgegeben und auf Wasserdurchgängigkeit überprüft. Diese Prüfung zeigte, dass das gesamte Abflusssystem intakt ist.

Die Lysimeter 4 bis 6 zeigen aufgrund der verminderten Dicke der Rekultivierungsschicht deutlich höhere Dränagewasserabflüsse und ebenfalls höhere Durchsickerungswassermengen als die Lysimeter 1 bis 3.

4 Langfristige Dichtungswirkung der Bentonitmatten

Zur Beurteilung der Dichtungswirkung wurden Kenngrößen berechnet, die in Abb. 1 definiert worden sind und die beispielhaft für Lysimeter 3 in der Abb. 9 grafisch und zahlenmäßig dargestellt sind. Auf der Basis der Messwerte pro hydrologischem Halbjahr wurde der Wirkungsgrad der Bentonitmatte berechnet, indem die Drainageabflussmengen auf die Wassermengen bezogen wurden, mit denen die Bentonitmatte insgesamt beaufschlagt wird (Summe der Werte aus Drainage und Durchsickerung). Die Systemwirksamkeit, die sich auf das gesamte Abdichtungssystem bezieht, wurde ermittelt, indem die um die Durchsickerung reduzierten Werte der Niederschlagswassermengen auf die Gesamtwerte des Niederschlags bezogen wurden. Zweckmäßig ist die Angabe dieser Werte in Prozent. Die Systemwirksamkeit kann auch als Wirkungsgrad des Gesamtsystems bezeichnet werden und ist beispielsweise für vergleichende Bewertungen der abdichtenden Wirkung verschiedener Oberflächenabdeckungen und –dichtungsaufbauten eine brauchbare Kenngröße. Es ergeben sich bei allen Lysimetern über den gesamten Prüfzeitraum sowohl im Winter- als auch im Sommerhalbjahr Werte auf hohem Niveau.

Die Rechenwerte der Kenngröße zur Beurteilung des Wirkungsgrads der Bentonitmatte zeigen dagegen ein komplexeres Bild. In den Sommerhalbjahren werden nur sehr geringe Durchsickerungswassermengen verzeichnet. Bei Lysimeter 3 fällt der rechnerische Wirkungsgrad der Bentonitmatte im Sommerhalbjahr zeitweise auf unter 80 %, da hier bei geringer Durchsickerung nur sehr geringe Drainagewassermengen anfallen (Abb. 9). Im darauffolgenden Winterhalbjahr zeigen die rechnerischen Wirkungsgrade der Bentonitmatten trotz der mitunter ausgeprägt trockenen Sommerhalbjahre und einer möglichen Gefügebildung in den Matten stets einen hohen Wirkungsgrad.

Bei der Bewertung und Interpretation des im Winter ansteigenden und im Sommer abfallenden rechnerischen Wirkungsgrades η der Bentonitmatte, ist allerdings zu beachten, dass für diese Kenngröße $\eta = DA/(DA+DS)$ definitionsbedingt bei sehr kleinem DA und folglich einer entsprechend geringen Differenz zwischen DA und DS entsprechend kleine Werte für η errechnet werden. Dies wird durch den in Abb. 11 dargestellten Verlauf der Kurve für Drainageabflüsse zwischen 0 und 150 mm pro Monat und für einen konstanten Wert von $DS = 1$ mm pro Monat verdeutlicht. Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies, dass der rechnerische Wirkungsgrad η bei geringen Abflüssen mehr von der Drainagewassermenge abhängt als von der Durchsickerungswassermenge.

Weiterhin ist in Abb. 9 der anhand der Durchsickerungswassermengen berechnete Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k der Bentonitmatte aufgetragen. Diese Berechnung erfordert verschiedene Annahmen, die in Abb. 10 zusammengefasst dargestellt sind. Es wurde ein hydraulischer Gradient von $i = 1$ und die Gültigkeit des Fließgesetzes nach DARCY und der Kontinuitätsbedingung vorausgesetzt. Diese Annahmen sind allerdings nicht uneingeschränkt gültig, da eine vollständige Wassersättigung des Bentonitmattenporenraums nicht zu jedem Zeitpunkt gewährleistet ist.

Die verfeinerte Darstellung einzelner Durchsickerungsereignisse auf der Basis der in 10-Minuten-Intervallen registrierten Wassermengen in Abb. 8 zeigt, dass die anfallende Dränagewassermenge bei Überschreiten eines bestimmten Quantums einen rasch einsetzenden Durchsickerungswasserabfluss auslösen kann.

Die in Abb. 8 exemplarisch dokumentierten Phänomene und Zusammenhänge werden derzeit am IGBE näher untersucht.

5 Vergleich mit anderen Testfeldern

5.1 Testfeld mit Bentonitmattendichtung in Aurach

Die über den gesamten siebenjährigen Versuchszeitraum aufsummierten Daten von Niederschlag, Dränage und Durchsickerung der Lysimeter Lemförde wurden in Abb. 13 gemeinsam mit den Daten eines rd. 520 m² großen Testfeldes „Im Dienstfeld“ in Aurach dargestellt. Die Daten wurden aus Grafiken in den Veröffentlichungen von HENKEN-MELLIES & ALEXIEW (2003) sowie HENKEN-MELLIES (2005) entnommen, weshalb nur eine begrenzte Genauigkeit erreicht werden konnte. Für qualitative Vergleichszwecke sind die so ermittelten Werte allerdings ausreichend.

Generell ergeben sich bzgl. der Dränagewassermengen für beide Feldversuche gute Übereinstimmungen, obwohl die Prüffeldgrößen (Aurach ca. 520 m² und je Lysimeter in Lemförde ca. 3 m²) und sonstige Randbedingungen voneinander abweichen. Für den kumulierten Dränagewasserabfluss ergeben sich für das Prüffeld in Aurach bis April 2004 etwa 1750 mm und für das Lysimeter 3, etwa 1500 mm. Dabei ist anzumerken, dass die klimatischen und jahreszeitlichen Bedingungen der beiden Versuchsstandorte (Lemförde/Niedersachsen und Aurach/Bayern) generell vergleichbar sind und als ein typisches Feuchtklima in Deutschland eingestuft werden könnten.

Die Durchsickerungswassermengen sind im Testfeld Aurach zu Beginn des hydrologischen Winterhalbjahres 2002/2003 stark angestiegen. Die Summenkurven der Durchsickerung verlaufen danach aber wieder etwa parallel zu den Durchsickerungen der Lysimeter, allerdings auf höherem Niveau.

Die in HENKEN-MELLIES (2005) beschriebenen Effekte bzgl. einer nachlassenden Dichtungswirkung der Bentonitmatte, können auf der Grundlage der siebenjährigen Messreihen der Lysimeter in Lemförde nicht bestätigt werden.

5.2 Testfeld mit mineralischer Abdichtung im Ruhrgebiet

Abb. 12 zeigt analog zu den in Abschn. 4 beschriebenen Wirkungsgradanalysen eine Auswertung der von WEISS & ZEPP (2004) veröffentlichten Daten eines Testfeldes im Ruhrgebiet mit einer 1 m dicken mineralischen Abdichtung. Aufgetragen sind die Wassermengen, die Wirkungsgrade der Dichtungsschicht sowie die Systemwirksamkeiten bezogen auf hydrologische Halbjahre. Die Dränagewasserabflüsse sind in diesem Testfeld bzgl. ihrer Anteile am Niederschlag geringer als die entsprechenden Werte der Lysimeter (vgl. beispielsweise mit Lysimeter 3 gemäß Abb. 9). Dies hängt möglicherweise mit der unterschiedlichen Ausbildung von Rekultivierungs- und Dränageschichten zusammen. Die Dicke der Rekultivierungsschicht des Testfeldes im Ruhrgebiet beträgt 1,3 m und die der Dränageschicht aus Schmelzkammergranulat 0,2 m.

Auch bei diesem Testfeld mit mineralischer Dichtungsschicht, nimmt der Wirkungsgrad im Sommerhalbjahr ab und steigt im Winterhalbjahr wieder auf ein hohes Niveau an. Dieser Effekt ist vor allem dann gegeben, wenn nur sehr kleine Dränageabflüsse in den Sommerhalbjahren gemessen werden.

6 Schlussfolgerungen und weitere Aktivitäten

Vorläufig können folgende Schlüsse aus den Lysimeteruntersuchungen in Lemförde gezogen werden:

- Großmaßstäbliche Versuche in Lysimetern unter in-situ-Bedingungen sind eine effektive und wirtschaftliche Möglichkeit, das Langzeitverhalten von Deponieabdichtungssystemen mit Bentonitmatten zu untersuchen. Bentonitmatten, die mit etwa 4.500 bis 5.500 g Natrium-Bentonit gefüllt und mit einer etwa 1 m mächtigen Rekultivierungsschicht überdeckt sind, zeigen im deutschen Feuchtklima eine sehr geringe Wasserdurchlässigkeit von wenigen Millimetern pro Jahr. Für den bisher siebenjährigen Untersuchungszeitraum ergibt sich beispielhaft für Lysimeter 3 eine gesamte Durchsickerungsmenge von rd. 50 mm bei einer Niederschlagsmenge von rd. 5000 mm und somit eine Systemwirksamkeit von 99 %.
- Für die vernadelten Bentonitmatten aus einer Produktpalette mit unterschiedlicher Ausbildung im Detail, ergeben sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich ihrer Wasserdurchlässigkeit im Prüfsystem.
- Die Bentonitmatten zeigen nach einer temporären Verminderung ihrer Effektivität infolge mangelnder Feuchtezufuhr bei ausreichendem Wasserdargebot ihre volle Dichtungswirkung. Eine signifikante Abnahme der Dichtungswirkung der Bentonitmatten im Laufe der Zeit konnte bisher bei den vor sieben Jahren in Lemförde begonnenen Lysimeterversuchen nicht festgestellt werden.
- Ein Austausch des schluffigen Rekultivierungsmaterials nach dreieinhalb Jahren Versuchsbetrieb gegen einen Erdstoff mit größerer Wasserdurchlässigkeit (Sand) hatte verstärkte Dränagewasserabflüsse, eine deutliche und somit eine Erhöhung der Dichtwirkung zur Folge.

Die Messungen zur Funktionsdauer von Bentonitmatten in den Lysimetern in Lemförde werden uneingeschränkt fortgeführt. Zusätzlich sollen in der Agrarwirtschaft übliche Sensoren zur Bodenfeuchtemessung (Abb. 15 und 16) in den Lysimeterhügel eingebaut werden. Die Ergebnisse dieser Messungen werden ggf. zukünftig mit in die Auswertungen einbezogen.

Untersuchungen auf der Basis von 10-Minuten-Messwerten der Wassermengen zur verfeinerten Beurteilung des Wirkungsgrads und der Wasserdurchlässigkeit der Bentonitmatten werden zur Zeit durchgeführt.

7 Literatur

REUTER (2005), Langzeitmessungen zur Dichtungswirkung vernadelter Bentonitmatten – Erfahrungen aus 7 Jahren Lysimetermessungen, Deponieworkshop Zittau/Liberec und zugehöriger Tagungsband in englischer Sprache.

LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ (2005), Allgemeine Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme, www.deponie-stief.de.

BLÜMEL, EHRENBURG, MAUBEUGE, MÜLLER-KIRCHENBAUER (2002). Langzeituntersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von Bentonitmatten in Lysimetern. 12. Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar 2002, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

HENKEN-MELLIES (2005), Oberflächenabdichtungen im Test-Versuchsfelder auf der Deponie „Im Dienstfeld“, 16. Nürnberger Deponieseminar 2005, Eigenverlag LGA.

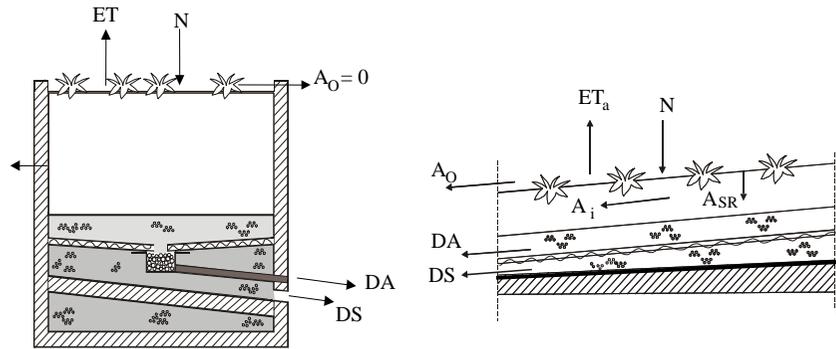
WEISS & ZEPP (2004), Wirksamkeit eines alternativen Deponie-Oberflächenabschluss-systems mit mineralischer Dichtschicht, Müll und Abfall 3 · 04, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

HEERTEN & REUTER (2002), Die Bedeutung der DIBt-Zulassungen für die Qualitätsanforderungen an Bentonitmatten heute und morgen, 18. Fachtagung „Die sichere Deponie“ am 14./15. Februar in Würzburg, Herausgeber: Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg.

WITT & ZEH (2002): Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Oberflächenabdichtungen von Hausmülldeponien. Endbericht - Ergebnisse und Empfehlungen. Bauhaus-Universität Weimar 2002.

EGLOFFSTEIN (2000): Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien, Eigenverlag Bauen und Umwelt

Wasserhaushaltsgrößen



...für ein Lysimeter

...für ein Testfeld

Es bedeuten:

- N: Niederschlag
- ET: Evapotranspiration / Verdunstung
- A_O: Oberflächenabfluss
- A_i: Zwischenabfluss (interflow)
- A_{SR}: Durchsickerung der Rekultivierungsschicht
- DA: Dränabfluss
- DS: Durchsickerung

Alle Größen sind auf denselben Zeitraum zu beziehen.

Gewählte Definitionen zur Beurteilung der Wirksamkeit

$$\text{Wirkungsgrad der Bentonitmatte} = \frac{(DA + DS) - DS}{DA + DS} \cdot 100[\%]$$

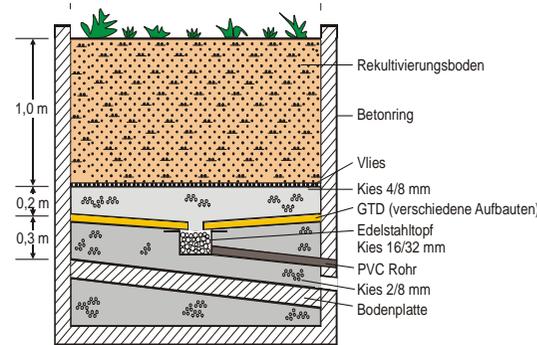
$$= \frac{DA}{DA + DS} \cdot 100[\%]$$

$$\text{Systemwirksamkeit} = \frac{N - DS}{N} \cdot 100[\%]$$

Abb. 1: Wasserhaushaltsgrößen und gewählte Definitionen zur Beurteilung der Wirksamkeit von Dichtungen



Anordnung der Lysimeter im Erdhügel



Prinzipieller Aufbau der Lysimeter



Bewuchs im Sommer 2005



Wetterstation



Messraum im Hügel



Kippwaage

Abb. 2: Ausbildungsformen der Lysimeter und Messeinrichtungen

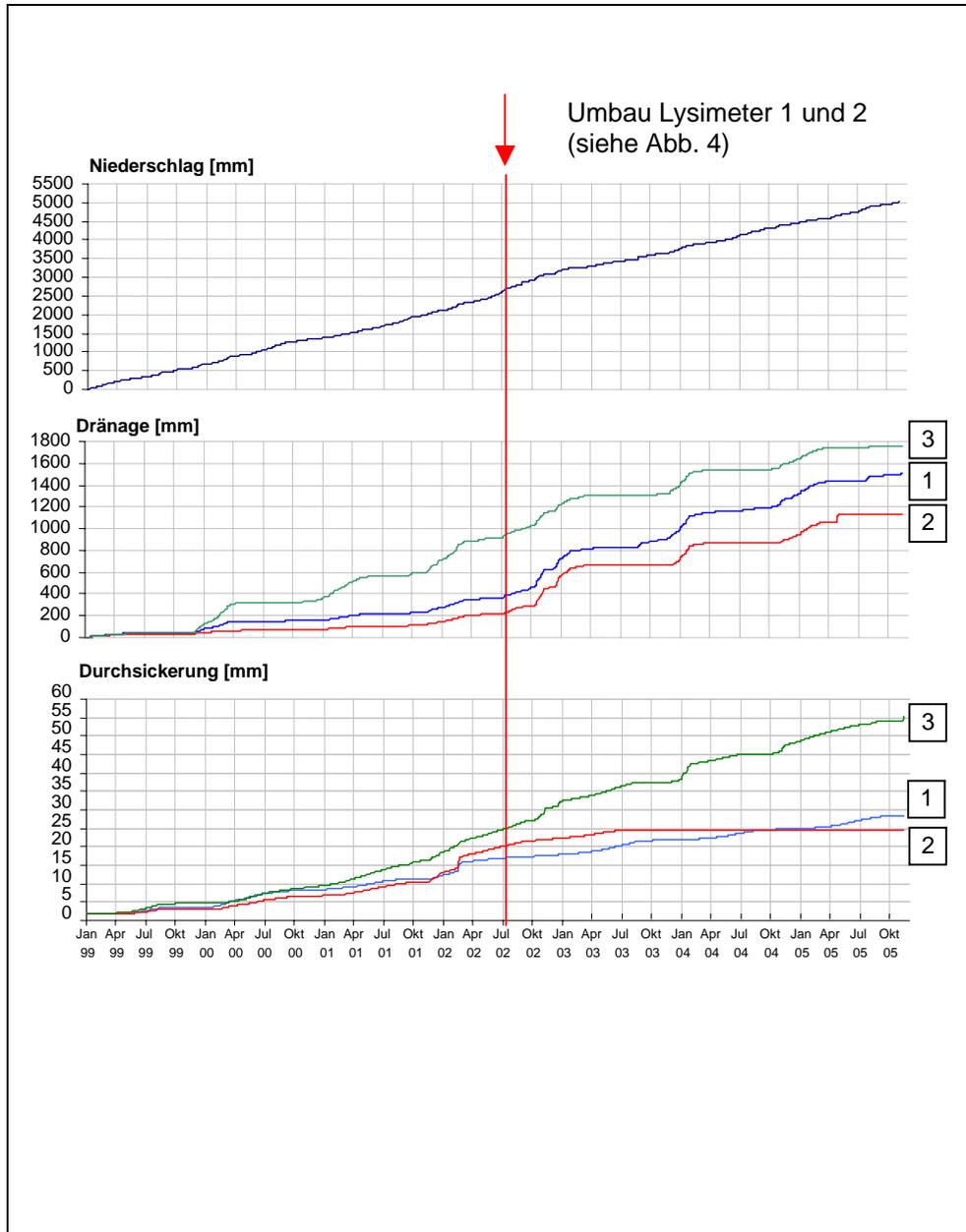


Abb.3: Kumulierte Wassermengen von Niederschlag, Dränage und Durchsickerung für Lysimeter 1 bis 3

Lysimeter Nr.	Rekultivierungsschicht		Dränschicht	Bentonitmatte	
	Schichtdicke	Material		oberes Geotextil:	Bentonit:
1	100 cm	schluffiger Sand, verdichtet eingebaut $k_f = \text{rd. } 10^{-7} \text{ m/s}$ ab Sommer 2002: 15 cm Mutterboden 75 cm Mittelsand, unverdichtet eingebaut $k_{(ms)} = \text{rd. } 10^{-3} \text{ m/s}$	Kies 4/8	oberes Geotextil: Bentonit: unteres Geotextil:	Vlies, 220 g/m ² 4500 g/m ² Pulver Gewebe, 110 g/m ²
2	100cm	schluffiger Sand, verdichtet eingebaut $k_f: \text{rd. } 10^{-7} \text{ m/s}$ ab Sommer 2002: schluffiger Sand, unverdichtet eingebaut	Kies 4/8	oberes Geotextil: Bentonit: unteres Geotextil:	Vlies, 300 g/m ² , bentonitimpregniert 5000 g/m ² Pulver Gewebe, 200 g/m ²
3	100 cm	schluffiger Sand, verdichtet eingebaut $k_f = \text{rd. } 10^{-7} \text{ m/s}$	Kies 4/8	oberes Geotextil: Bentonit: unteres Geotextil:	Vlies, 220 g/m ² 4500 g/m ² granuliertes Material Gewebe, 110 g/m ²

Abb. 4: Angaben zu den Schichten in Lysimeter 1 bis 3

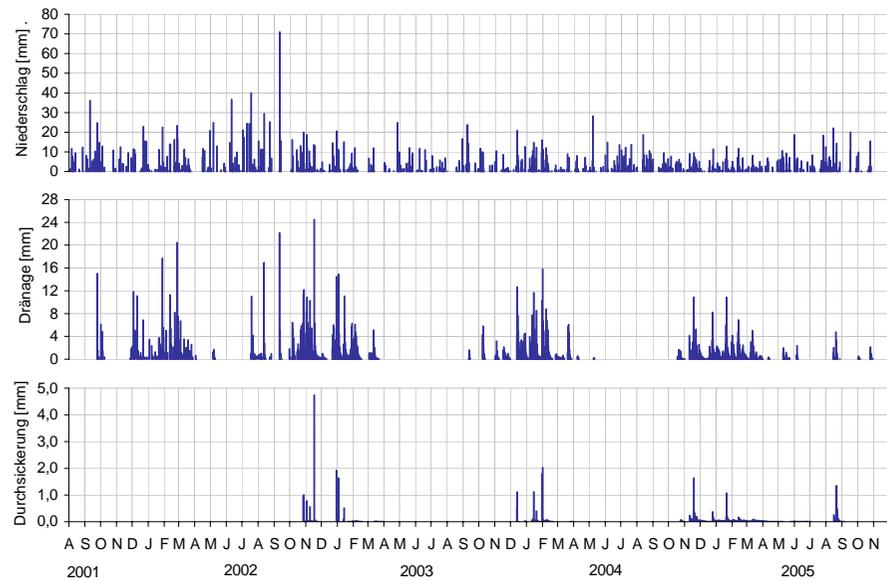


Abb. 5: Säulendiagramme der Monatswerte für Niederschlag, Dränage und Durchsickerung für Lysimeter 4

Lysimeter Nr.	Rekultivierungsschicht		Dränschicht	Bentonitmatte	
	Schichtdicke	Material		oberes Geotextil:	Bentonit:
4	65 cm	schluffiger Sand, verdichtet eingebaut $k_f = rd. 10^{-7} \text{ m/s}$	Secudrän R201 DS601 R201	oberes Geotextil: Bentonit:	Vlies, 220 g/m ² 4500 g/m ² Pulver Gewebe, 110 g/m ²
5	85 cm	schluffiger Sand, verdichtet eingebaut $k_f = rd. 10^{-7} \text{ m/s}$	Secudrän R201 DS601 R201	oberes Geotextil: Bentonit:	Vlies, 220 g/m ² 4500 g/m ² Pulver Gewebe, 110 g/m ²
6	85 cm	schluffiger Sand, verdichtet eingebaut $k_f = rd. 10^{-7} \text{ m/s}$	Secudrän R201 DS601 R201	oberes Geotextil: Bentonit:	Vlies, 220 g/m ² 4500 g/m ² Pulver Gewebe, 110 g/m ²

Abb. 6: Angaben zu den Schichten in Lysimeter 4 bis 6

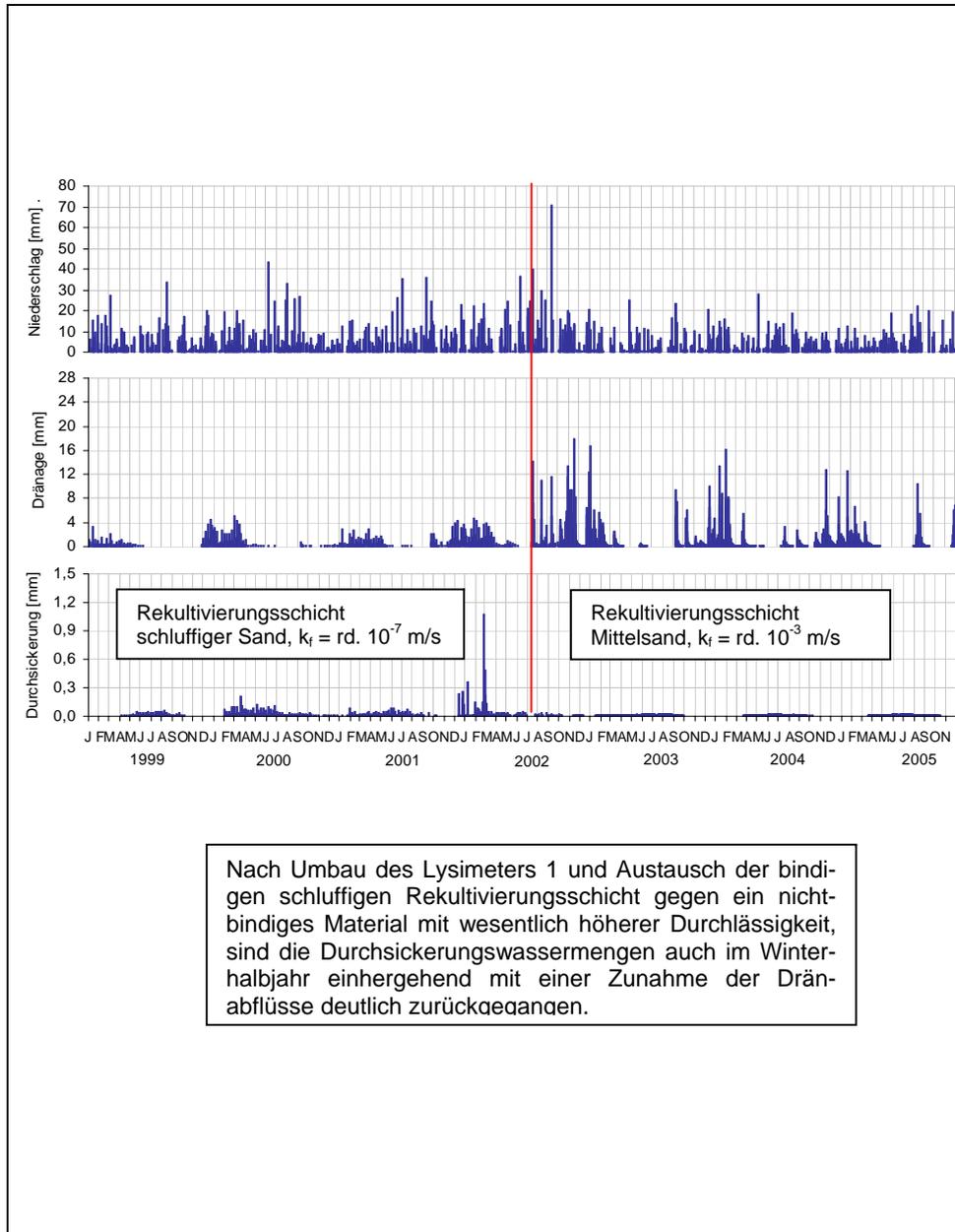


Abb. 7: Säulendiagramme der Monatswerte für Niederschlag, Dränage und Durchsickerung für Lysimeter 1

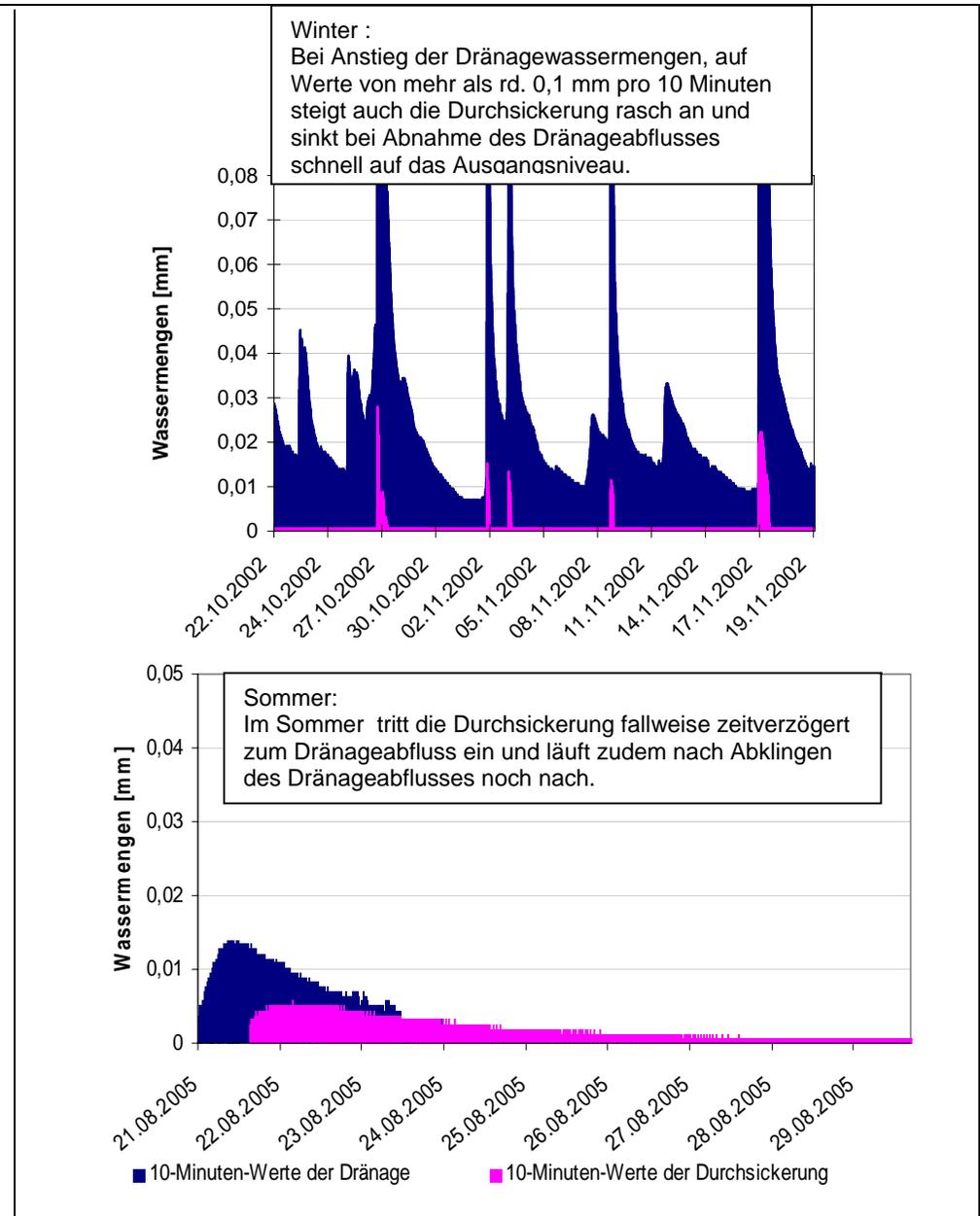


Abb. 8: Ausgewählte Beispiele zur Darstellung des Zusammenhangs von Dränage- und Durchsickerungsabfluss im Winter und Sommer

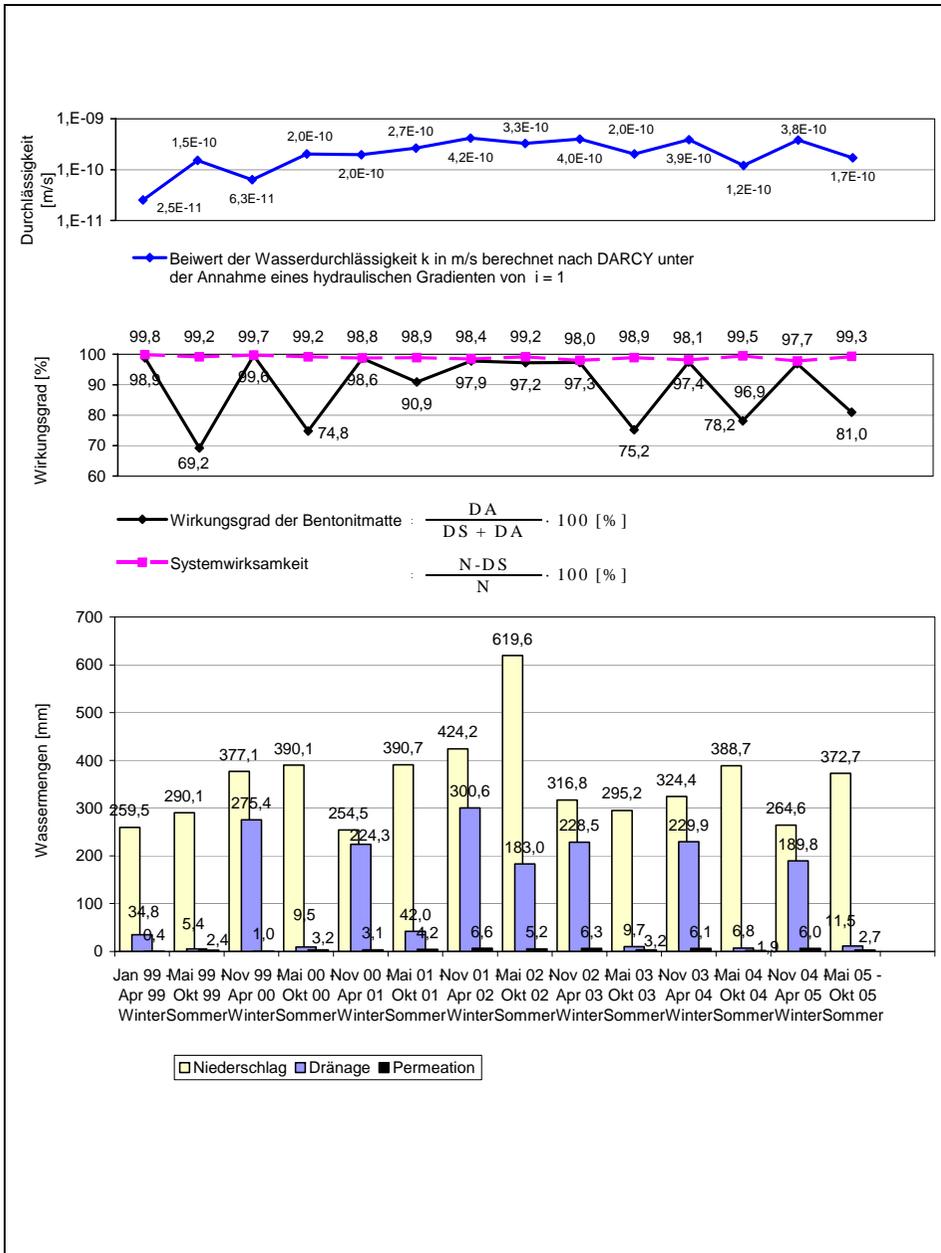


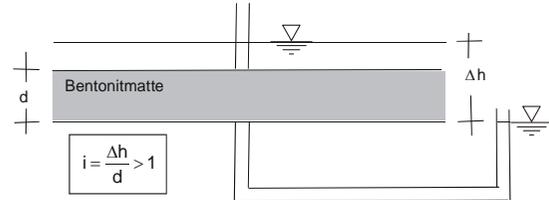
Abb. 9: Wassermengen, Systemwirksamkeiten, Wirkungsgrade der Bentonitmatte und anhand der Durchsickerungen berechnete Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte bezogen auf hydrologische Halbjahre für Lysimeter 3

Zur Berechnung des k-Wertes anhand der gemessenen Wassermengen:
 Die Berechnung des k-Wertes anhand der Durchsickerungswassermengen basiert auf folgenden Annahmen:

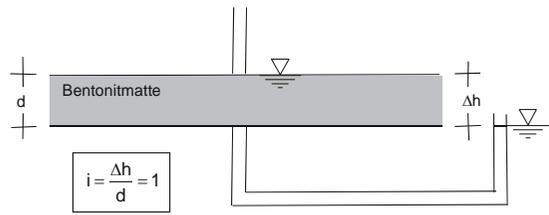
- $v = k \cdot i$ (Filtergesetz von DARCY)
- $i = \text{konst.} = 1$
- $v = Q / A$ (Kontinuitätsbedingung)

Diese Annahmen sind jedoch nicht uneingeschränkt gültig, da unter anderen die nachfolgend aufskizzierten Fälle zu unterscheiden sind.

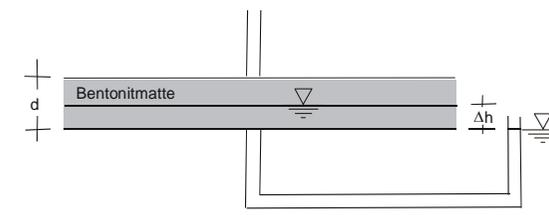
Fall 1: Das System ist wassergesättigt.
 Das Gesetz von DARCY und die Kontinuitätsbedingung sind gültig (2-Phasen-System).



Fall 2: Das System ist wassergesättigt.
 Das Gesetz von DARCY und die Kontinuitätsbedingung sind gültig (2-Phasen-System).



Fall 3: System ist nicht wassergesättigt und Gas (Luft) dringt in den Porenraum ein.
 Das Gesetz von DARCY sowie die Kontinuitätsbedingung sind nicht gültig (3-Phasen-System).



Weitere Fälle mit fortschreitender Austrocknung und anschließender Widervernässung sind zu betrachten.

Abb. 10: Annahmen und Randbedingungen zur Berechnung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts k

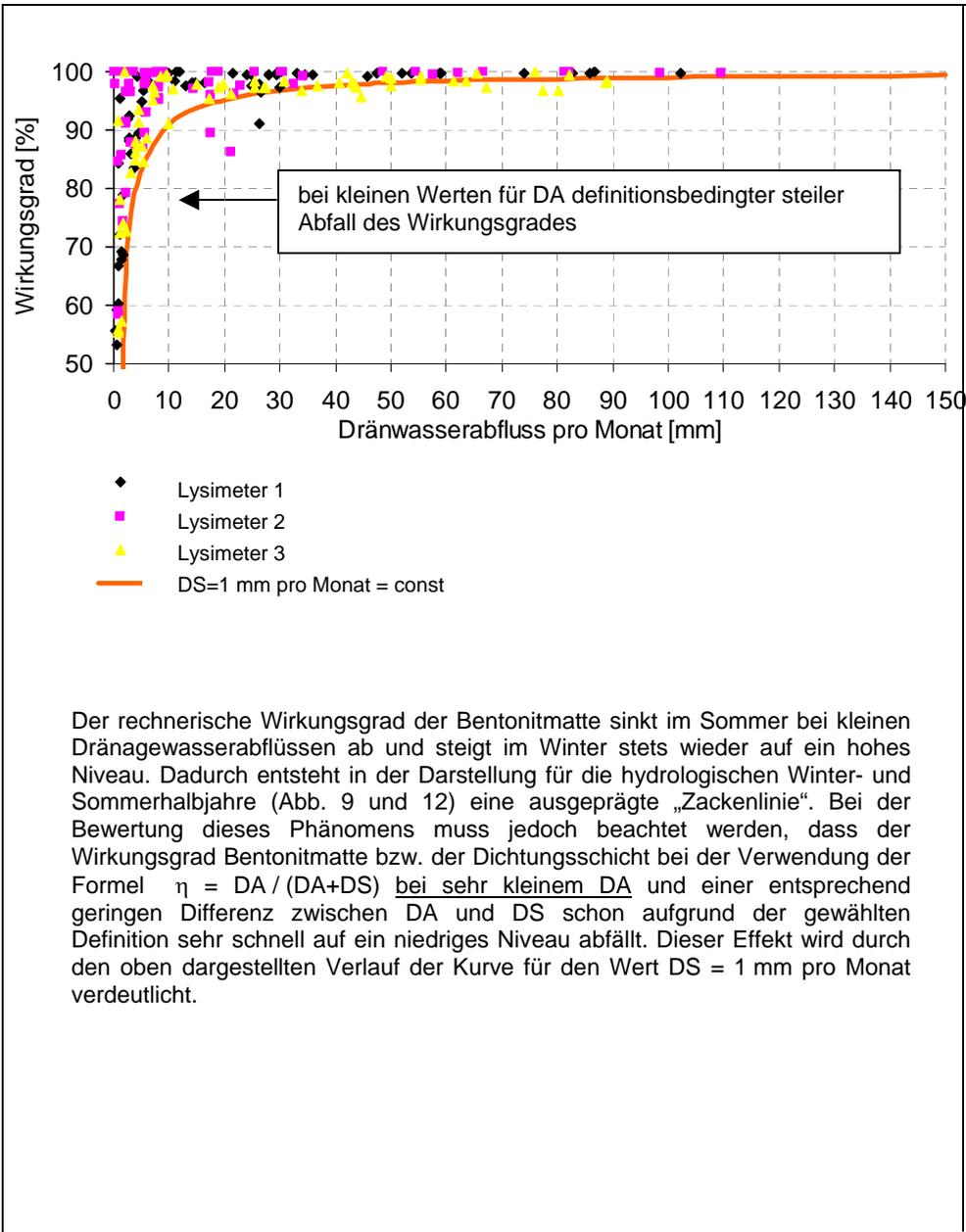


Abb. 11: Zusammenhang zwischen Dränagewasserabfluss und rechnerischem Wirkungsgrad der Bentonitmatte

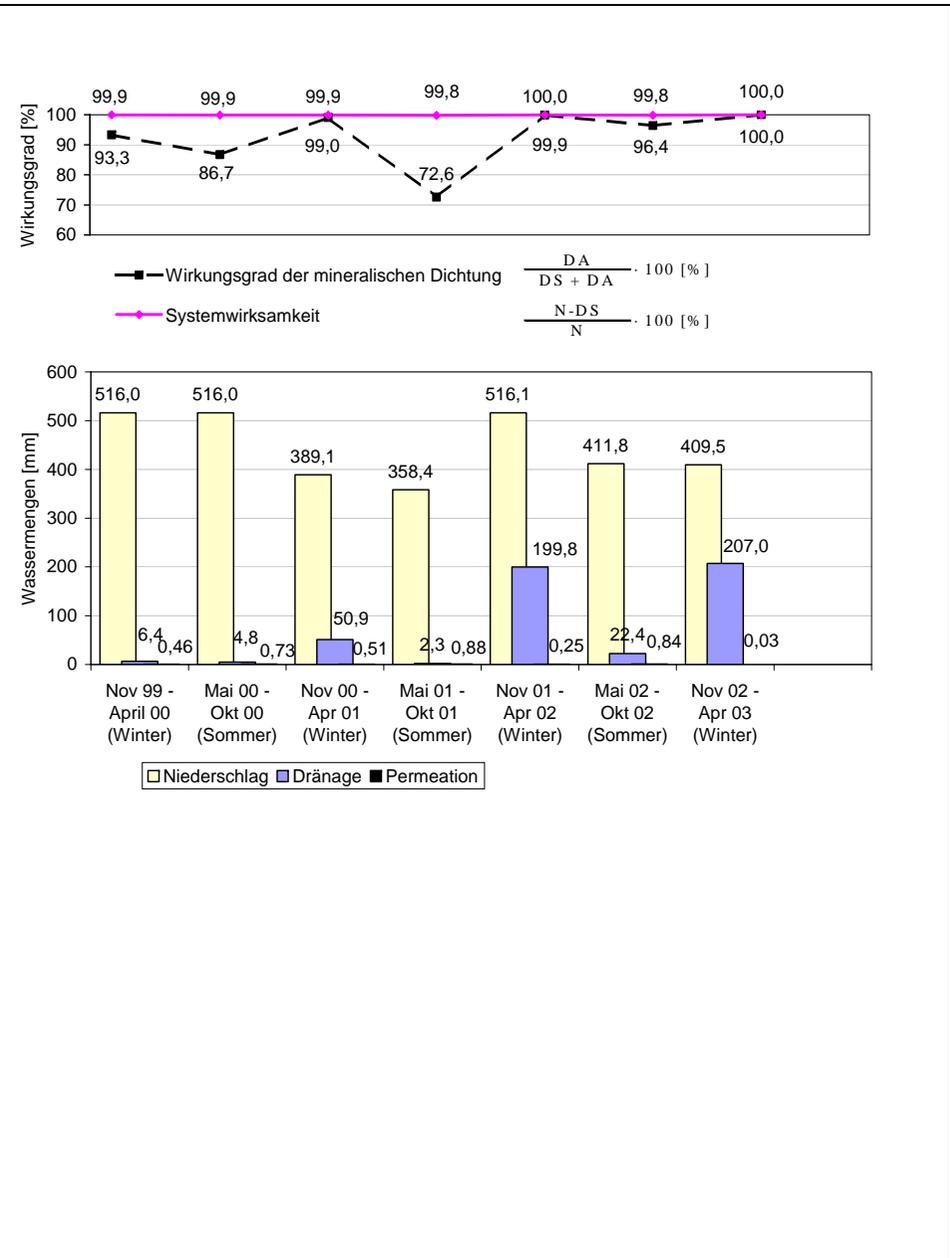


Abb. 12: Wassermengen, Wirkungsgrad und Systemwirksamkeit einer mineralischen Abdichtung [WEISS u. ZEPP (2004)]

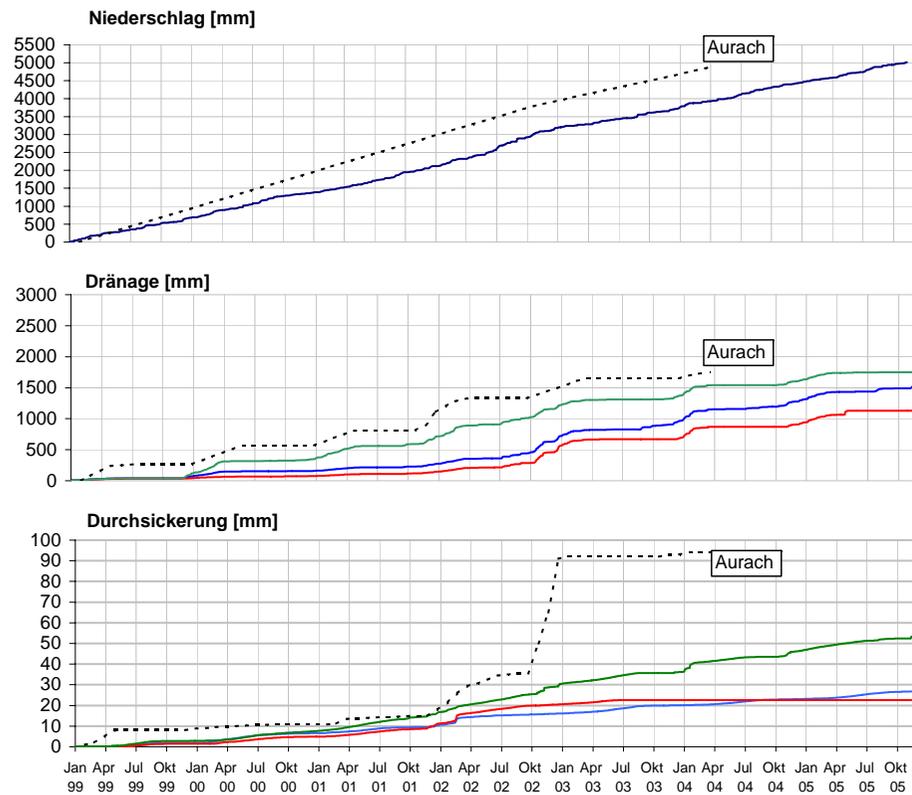


Abb. 13: Vergleich der Ergebnisse der Lysimeter 1 bis 3 mit den Ergebnissen von einem Testfeld in Aurach [HENKEN-MELLIES et al., 2003 und 2005]

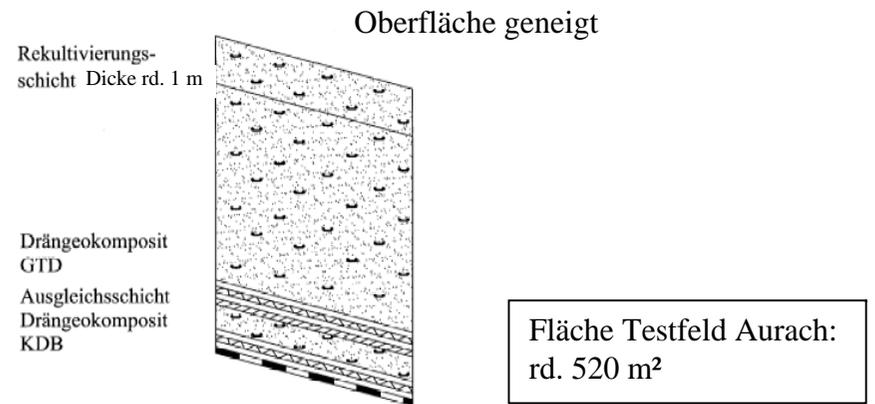
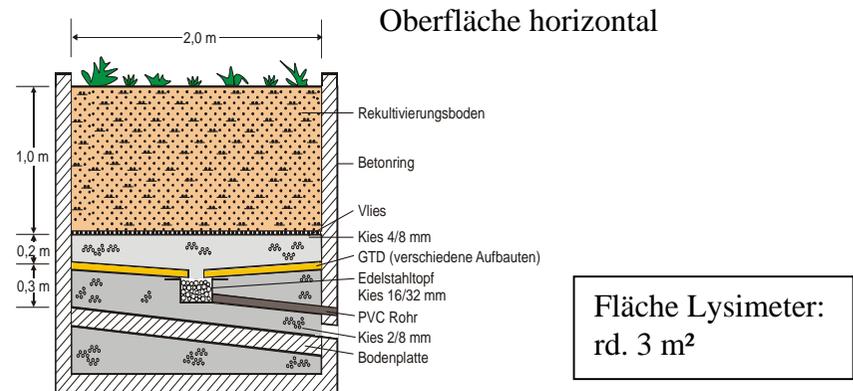


Abb. 14: Schichtsystem der Lysimeter und des Testfeldes in Aurach (zum Vergleich)

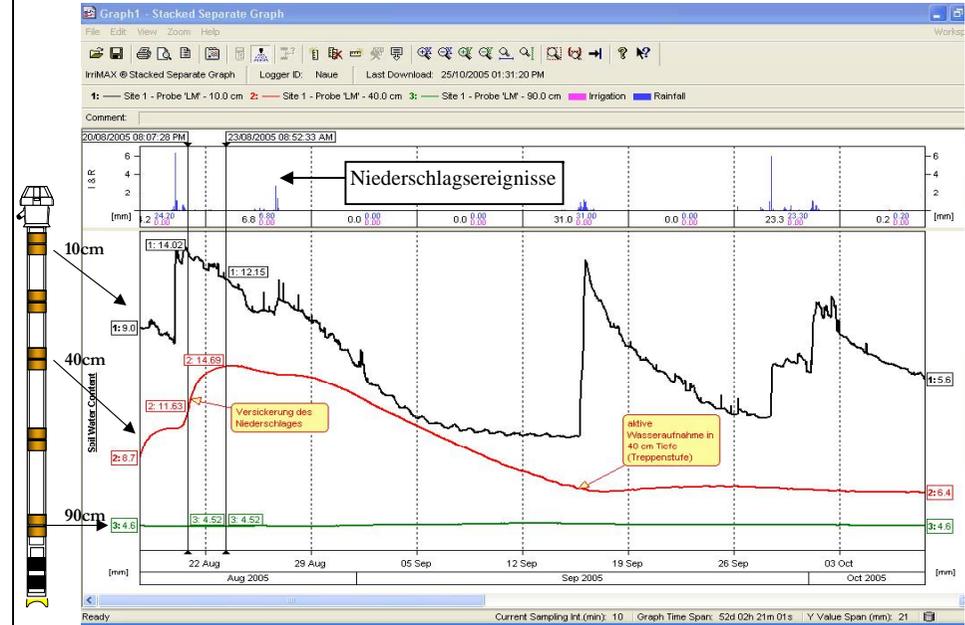


Abb. 15: Testinstallation von Sensoren der Firma AGROSAT, Baasdorf zur Messung der Bodenfeuchte im Lysimeterhügel

Abb. 16: Exemplarische Messergebnisse zur Beurteilung der Bodenfeuchte