

Aktuelle Entwicklungen beim Einsatz von Kapillarsperren in Oberflächenabdichtungssystemen – Neue Regelwerke, Systeme und Konsequenzen für die Praxis

Dr. Bernd Steinert

Dr. habil. Stefan Melchior

- 1. Klassische Kapillarsperren und aktuelle Entwicklungen**
 - 1.1 Grundlagen
 - 1.2 Forschung und Entwicklung
 - 1.3 Grenzen der Anwendung
- 2. Einsatzmöglichkeiten in Oberflächenabdichtungssystemen**
 - 2.1 Grundsätze und Regelwerke
 - 2.2 Abdichtungssysteme mit Kapillarsperren
- 3. Konsequenzen für die Praxis**
 - 3.1 Planung und Bemessung
 - 3.2 Eignungsprüfung und Dimensionierung
 - 3.3 Ausführung und Qualitätssicherung vor Ort
- 4. Fazit**
- 5. Literatur**

1. Klassische Kapillarsperren und aktuelle Entwicklungen

1.1 Grundlagen

Kapillarsperren werden in der Regel aus zwei Schichten aufgebaut. Die obere Schicht, die Kapillarschicht, besteht meist aus Sand und liegt über einem grobkörnigen Kapillarblock aus Kies. Kapillarsperren können als mineralische Abdichtungskomponente ausschließlich an Böschungen mit einer deutlichen Neigung eingesetzt werden. Eine feste Mindestböschungneigung gibt es dabei nicht. Sie hängt projektspezifisch von der Dimensionierung der Kapillarsperre ab.

Sickert Wasser von oben in eine Kapillarsperre, so verteilt sich dieses Wasser zunächst in dem Porensystem der Kapillarschicht und wird von Kapillarkräften (Wasserspannung) in dem Sand der Kapillarschicht gehalten. Der Wassergehalt der Kapillarschicht steigt, wodurch die ungesättigte Wasserleitfähigkeit des Sandes zunimmt. In dem unter der Kapillarschicht liegenden Kapillarblock herrschen dagegen grobe Poren vor, die bei den sich an der Schichtgrenze einstellenden Wasserspannungen luftgefüllt sind und kein Wasser führen. Somit ist das Wasser in der Kapillarschicht gezwungen, oberhalb der geneigten Schichtgrenze lateral abzufließen. Dieser Fließprozess wird in einem Farbtracerversuch in einer neigbaren Versuchsrinne mit einer Kapillarsperre verdeutlicht (s. Bild 1).



Bild 1: Farbtracerversuch in einer Kippbinne: Injektion des Farbtracers in Kapillarschicht und Kapillarblock entlang einer senkrechten Linie (links) und laterale Verlagerung des Farbtracers mit dem Wasserfluss nach 60 min (rechts)

In der einfachsten Anwendung der Kapillarsperre auf einer Deponieböschung liegt die Kapillarsperre direkt unter einer Rekultivierungsschicht, die je nach Aufbau und Jahreszeit mehr oder weniger Wasser zwischenspeichern kann und den Überschuss der Schwerkraft folgend

verlangsamt in die Kapillarschicht abgibt. Das Wasser, das in einer Kapillarschicht auf einer Deponieböschung lateral abfließt, wird spätestens am Böschungsfuß, je nach Dimensionierung der Kapillarsperre auch schon an Zwischenwasserfassungen, gefasst und in Rohrleitungen abgeleitet. Auf verschiedene Anwendungsmöglichkeiten von Kapillarsperren in Oberflächenabdichtungssystemen in Kombination mit anderen Systemkomponenten wird im Abschnitt 3 näher eingegangen.

Die Funktion der Kapillarsperre beruht auf der lateralen Ableitung von Wasser in der Kapillarschicht oberhalb der Schichtgrenze zum Kapillarblock. Über die Böschungslänge akkumuliert sich die in der Kapillarschicht abzuführende Wassermenge und erreicht am Böschungsfuß bzw. vor der Wasserfassung das Maximum, das von der Kapillarschicht abgeführt werden muss, ohne vertikal in den Kapillarblock zu versickern. Die projektspezifische Dimensionierung einer Kapillarsperre ergibt sich aus den Materialparametern für Kapillarschicht und Kapillarblock, der erwarteten Zusickerung in die Kapillarsperre sowie der Böschungsneigung, -länge und -geometrie. Grundlage der Dimensionierung ist die Bestimmung der so genannten "lateralen Dränkapazität" in der Einheit $l/(m \times d)$ als Maß für die Leistungsfähigkeit einer Kapillarsperre. Die laterale Dränkapazität ist nach Steinert et al. (1997) definiert als die maximale Wassermenge, die bei der gegebenen Böschungsneigung pro Zeit von einer Kapillarschicht lateral, d. h. in Böschungsfallrichtung abgeleitet werden kann, bevor eine nennenswerte Wassermenge vertikal in den Kapillarblock sickert. Der Übergang von einer unerheblichen zu einer „nennenswerten“ vertikalen Absickerung von Wasser ist nach Steinert (1999) definiert als der Übergang von der Filmflussphase, während der das Wasser nur in dünnen Wasserfilmen entlang der Kornkontaktpunkte fließt, zur Porenflussphase, in der ganze Porenabschnitte wassergefüllt sind und am Fließgeschehen teilhaben. Die Einheit der lateralen Dränkapazität ist normiert auf einen ein Meter breiten Böschungsausschnitt.

1.2 Forschung und Entwicklung

Frühe Untersuchungen zu Kapillarsperren stammen aus Kanada, USA, Frankreich und Dänemark. In Deutschland wurde die Kapillarsperre erstmals 1987 in einem Testfeld (Großlysimeter) auf der Deponie Hamburg-Georgswerder eingesetzt (Melchior 1993). Es folgten weitere Testfelder auf den Deponien „Am Stempel“, „Monte Scherbelino“, „Karlsruhe West“, „Esch-Belval“, „Heinersgrund“ und „Breiner Moor“ (von der Hude 1999, Jelinek 1997, Zischak 1997, Schnatmeyer 1998, Barth 2003, von der Hude, Melchior & Möckel 1999).

Die Grundlagenuntersuchungen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Kapillarsperren wurden in den 90er Jahren in Kipprinnen an den Universitäten Hamburg, Darmstadt und München durchgeführt (Steinert et al. 1997, Steinert 1999, von der Hude 1999, Wohnlich & Bauer 1999). Seither haben auch andere Hochschulen und Prüfinstitute vergleichbare Messanlagen aufgebaut, um Eignungsuntersuchungen an Kapillarsperren durchführen zu können.

Mittlerweile gibt es allein in Deutschland rund 20 Testfelder mit Kapillarsperren, zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten zu dem Thema sowie eine größere Zahl umgesetzter Großprojekte (s. a. Melchior & Steinert 2001, Melchior & Jelinek 2007 sowie die im Literaturverzeichnis aufgeführten wissenschaftlichen Arbeiten).

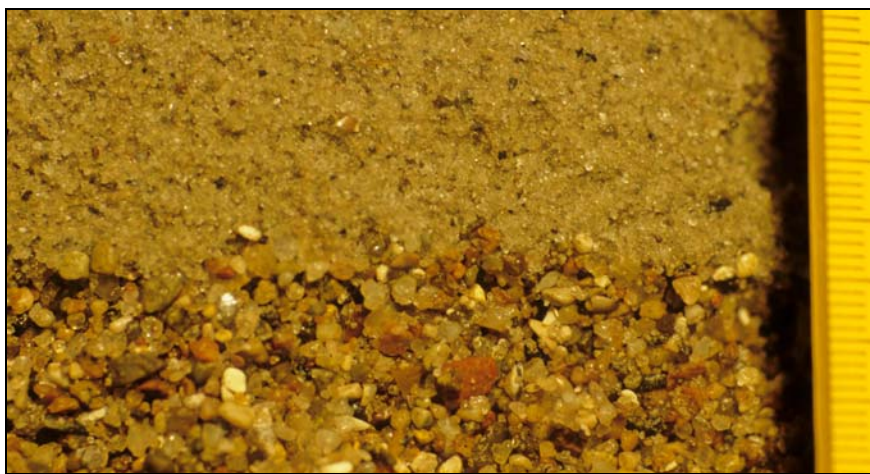


Bild 2: Schichtgrenze einer klassischen Kapillarsperre

Neben der in Bild 2 exemplarisch abgebildeten klassischen Kapillarsperre, bestehend aus einem Kapillarblock aus Kies mit einer Schichtmächtigkeit von 0,2 m bis 0,3 m und einer darüber liegenden Kapillarschicht aus Sand ($\geq 0,3$ m) wurde in den 90er Jahren die Kapillarblockbahn (KBB) entwickelt.

Die Kapillarblockbahn besteht aus einer ca. 2 cm dicken Matte aus einem so genannten PEHD-Doppelabstandsgewebe mit einer definierten Kiesfüllung aus gereinigtem und klassiertem Kies der Körnung 2 mm bis 5 mm (vgl. Bild 3). Hersteller der Kapillarblockbahn ist die Firma G quadrat aus Krefeld. Die KBB wird im Werk gefertigt, in Rollen mit einer Bahnbreite von 2,2 m und einer Länge von bis zu 80 m auf die Baustelle geliefert, auf einem vorbereiteten Auflager ausgerollt und mit vorher eignungsgeprüften Sand für die Kapillarschicht überschüttet.



Bild 3: Kapillarblockbahn der Fa. G quadrat, seitlich geöffnet (im Vordergrund die Abstandsäden des Gewebes freigelegt)

In Versuchsfeldern der MEAB (Märkische Entsorgungsanlagen-Betriebsgesellschaft mbH) auf der Deponie Deetz in Brandenburg werden seit der Herstellung der Felder im Jahr 2002 neben verschiedenen technischen Dichtungen und Wasserhaushaltsschichten im Feld 7 eine Kapillarsperre mit klassischem Aufbau und im Feld 8 eine Kapillarsperre mit Kapillarblockbahn bei einer Böschungsneigung von 1:6,7 getestet (vgl. Melchior, Steinert & Raabe 2010). Der Schichtaufbau der Versuchsfelder ist im Bild 4 dargestellt. Der Aufbau der Rekultivierungsschicht (1 m) und der Kapillarschicht (0,3 m) sind in beiden Feldern identisch.

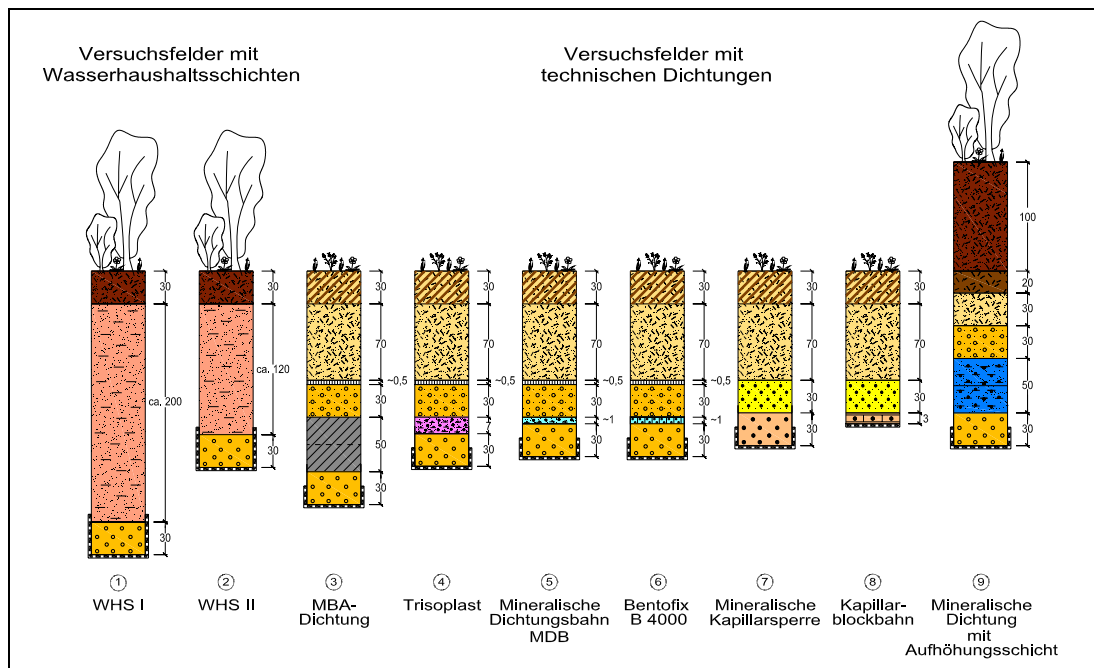


Bild 4: Aufbau der Versuchsfelder der MEAB in Brandenburg

Bei der Verlegung der KBB im Versuchsfeld 8 gab es eine Besonderheit hinsichtlich der Beschaffenheit der KBB: Das Bändchengewebe der KBB ist üblicherweise mit LDPE beschichtet. Für den Test im Versuchsfeld 8 auf der Deponie Deetz wurde die KBB jedoch ohne diese Beschichtung produziert und geliefert, um im Versuchsfeld die Wirksamkeit der Kapillarsperre mit KBB und nicht die Dichtigkeit der Beschichtung zu untersuchen.

Die Bilder 5 und 6 zeigen die Summenkurven von lateralem Kapillarschichtabfluss und vertikaler Versickerung in den Kapillarblock (Feld 7) bzw. in die Kapillarblockbahn (Feld 8) über den Untersuchungszeitraum von sieben Jahren.

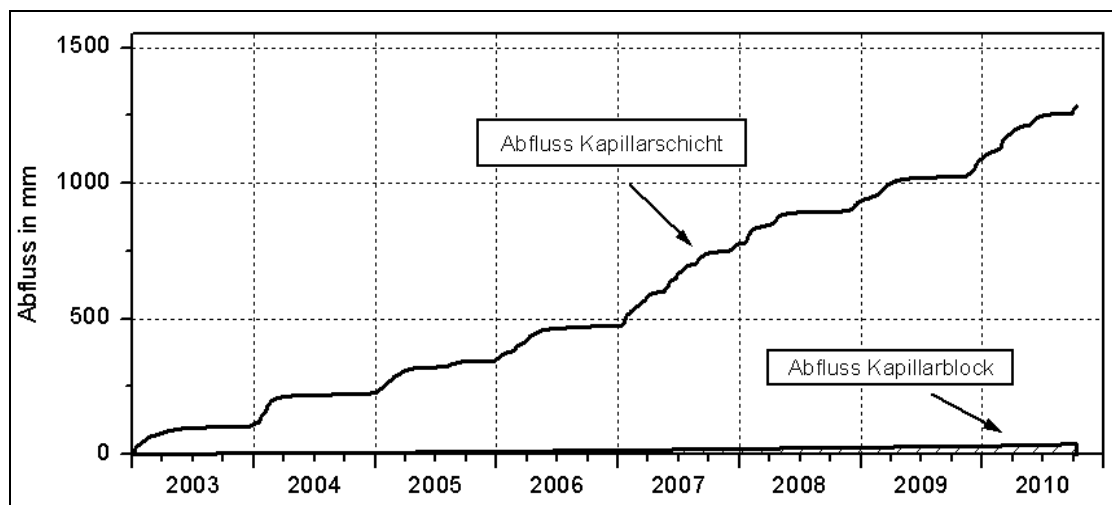


Bild 5: Kapillarsperre mit geschüttetem Kies als Kapillarblock in Versuchsfeld 7 auf der Deponie der MEAB in Deetz, Summenkurven Kapillarschichtabfluss und Abfluss aus dem Kapillarblock

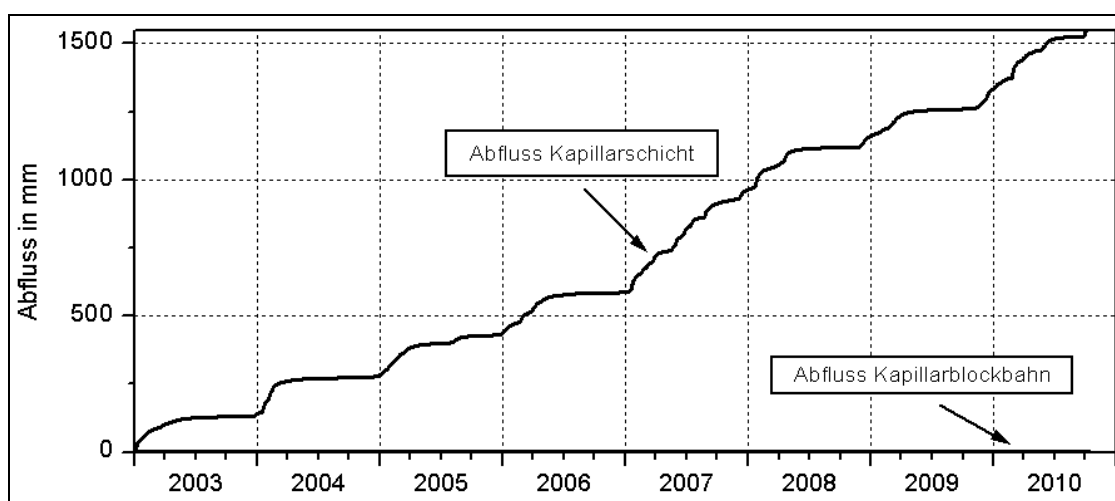


Bild 6: Kapillarsperre mit Kapillarblockbahn in Versuchsfeld 8 auf der Deponie der MEAB in Deetz, Summenkurven Kapillarschichtabfluss und Abfluss aus der Kapillarblockbahn (KBB)

Tabelle 1 zeigt die Wasservolumina, die pro Wasserhaushaltsjahr (Anfang April bis Ende März des folgenden Jahres) vertikal durch die Kapillarsperre der beiden Versuchsfelder versickert sind. Sie werden als absolute Zahlen in mm/a, in Bezug auf den Niederschlagseintrag in Prozent des Niederschlags (N) sowie in Bezug auf das Wasservolumen, das die Kapillarsperre erreicht hat, in Prozent der Dränspende (D) angegeben. Die Wirksamkeit der klassischen Kapillarsperre liegt im Mittel gleichbleibend bei 97,1 %, die Systemwirksamkeit der Kapillarsperre mit Kapillarblockbahn im Mittel bei 99,8 %.

Jahr	Nieder- schlag mm/a	Durchsickerung Kapillarsperre mit klassischem Kapillarblock			Durchsickerung Kapillarsperre mit Kapillarblockbahn		
		mm/a	% von N	% von D ¹	mm/a	% von N	% von D ¹
2003/04	528	3,7	0,7	2,7	0,2	0,0	0,1
2004/05	579	2,6	0,5	2,7	0,1	0,0	0,1
2005/06	653	4,1	0,6	3,6	0,1	0,0	0,1
2006/07	592	4,5	0,8	2,7	0,3	0,1	0,2
2007/08	941	6,8	0,7	2,5	0,4	0,0	0,1
2008/09	590	4,5	0,8	2,8	0,2	0,0	0,1
2009/10	618	6,2	1,0	3,2	1,5	0,2	0,7

¹ Dränspende (D) = Summe der Abflüsse aus Kapillarschicht und Kapillarblock
 N = Niederschlag

Tabelle 1: Jahressummen der Wasserhaushaltsjahre 2003/04 bis 2009/10 - Kapillarsperren in den Versuchsfeldern 7 und 8 auf der Deponie Deetz der MEAB

1.3 Grenzen der Anwendung

Kapillarsperren können nur auf Böschungen eingesetzt werden. Daraus folgt, dass die Kapillarsperre bei den meisten Objekten mit einem anderen Dichtungssystem kombiniert werden muss, das zur Abdichtung der schwach geneigten Kuppen und Böschungen zum Einsatz kommt. Bei der Planung muss geklärt werden, wie die Entwässerung des Abdichtungssystems im Kuppenbereich erfolgen soll, ohne die Wirksamkeit des Kapillarsperrensystems auf den Böschungen zu beeinträchtigen, und wie der konstruktive Anschluss der unterschiedlichen Abdichtungssysteme auch mit Blick auf mögliche Setzungsdifferenzen gestaltet wird.

Kapillarsperren sind hinsichtlich der entwässerbaren Böschungslängen begrenzt. Auf langen Böschungen müssen gegebenenfalls Zwischenfassungen im Kapillarschichtabfluss vorgese-

hen werden, um zu verhindern, dass die Böschungfußpunkte hydraulisch überlastet werden.

Weiterhin bestehen bei Kapillarsperren folgende systemspezifische Einschränkungen und Risiken:

- Kapillarsperren sind nicht gasdicht. Üblicherweise ist die Kapillarschicht feucht und bietet aufgrund ihres Wassergehaltes einen Strömungswiderstand gegen Gastransport, so dass die Methanmigration begrenzt wird. Bei hohen Druckdifferenzen in der Gasphase und, sofern der Systemaufbau dies zulässt, bei starken Wassergehaltsabnahmen in der Kapillarschicht kann der Gastransport jedoch zunehmen.
- Auch Kapillarsperren unterliegen, wie alle anderen Dichtungen auch, einer Alterung. Als wesentlicher Prozess, der die Leistungsfähigkeit der Kapillarsperre langfristig reduzieren kann, ist der auch im Zusammenhang mit Entwässerungselementen diskutierte Eintrag von gelösten Fremdstoffen (im wesentlichen Eisen- und Mangan, ggf. auch Huminstoffe) und deren Fällung zu nennen, die zur Bildung von Inkrustationen (Verockerung) führen kann. Dies ist insbesondere bei der Eignungsprüfung von Rekultivierungsböden zu beachten, die oberhalb von Kapillarsperren zum Einsatz kommen sollen.
- Die Bemessung und die Planung von Kapillarsperren erfordern Erfahrungen mit dem System und seinem Funktionsprinzip (wasserungesättigtes Fließen). In Fällen, in denen diese Erfahrungen fehlen, werden gelegentlich unnötig komplizierte und dann ggf. auch mit gewissen Risiken behaftete Einzellösungen der Wasserfassung konzipiert. Infolge des Verzichts auf Kipprinnenversuche oder den Rückgriff auf veraltete Versuchsdaten und Literaturinformationen wird zudem das Leistungspotential von Kapillarsperren häufig bei weitem nicht ausgeschöpft. In Einzelfällen werden sogar ungeeignete Materialkombinationen ausgewählt.

2. Einsatzmöglichkeiten in Oberflächenabdichtungssystemen

2.1 Grundsätze und Regelwerke

Bereits vor der Verabschiedung der Deponieverordnung (DepV 2009) wurden Kapillarsperren auf Altlasten, Altablagerungen, Altdeponien und auf Deponien der Klassen I und II nach TA Siedlungsabfall genehmigt. Es liegen Einzelfallzulassungen des Deutschen Instituts für

Bautechnik sowie Genehmigungen der Landesbehörden für Abfall, meist auf der Grundlage standortbezogener Wirksamkeitsnachweise, vor.

Kapillarsperren können heute auf der Grundlage der DepV 2009 als mineralische Abdichtungskomponente in Oberflächenabdichtungssystemen eingesetzt werden. Auf Deponien der Klassen I und II darf die vertikale Durchsickerung der Kapillarsperre im fünfjährigen Mittel nicht mehr als 20 mm/Jahr, auf Deponien der Klasse III im fünfjährigen Mittel maximal 10 mm/Jahr betragen. Zusätzlich schreibt die DepV die Überwachung der Funktion des Abdichtungssystems mit einem Kontrollfeld vor, sofern das Oberflächenabdichtungssystem ohne Konvektionssperre hergestellt wird.

Für die bundeseinheitlichen Eignungsbeurteilungen und die Festlegung der bundeseinheitlichen Qualitätsstandards von mineralischen Abdichtungskomponenten nach DepV (2009, Anhang 1, Nr. 2.1) ist die LAGA Ad-hoc-AG "Deponietechnik" zuständig (LAGA 2010).

Die LAGA empfiehlt bereits seit 2002 den Einsatz von Kapillarsperren (LAGA 2002):

- als Oberflächenabdichtung bei Deponien mit geringem Gefährdungspotential und weitgehender abgeklungener Gasproduktion
- als Oberflächenabdichtung bei Deponien der Klasse I
- als mineralische Komponente der Regelabdichtung in Deponien der Klasse II und bei Altdeponien (Hausmülldeponien)

Im Jahr 2009 wurde von der LAGA die Empfehlung zur Verwendung der Kombikapillarsperre verabschiedet, die als patentrechtlich geschütztes System eine Kunststoffdichtungsbahn zwischen Kapillarblock und Kapillarschicht anordnet (LAGA 2009).

Seit 2010 liegt für den Einsatz von Kapillarblockbahnen (KBB) in Kapillarsperren bei der LAGA Ad-hoc-AG "Deponietechnik" ein Antrag zur *Eignungsbeurteilung der Kapillarblockbahn (KBB) als Abdichtungskomponente in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien der Klassen I, II und III* vor. Diese Eignungsbeurteilung beschreibt den Ersatz des herkömmlichen Kapillarblocks einer Kapillarsperre durch die werksseitig gefertigte Kapillarblockbahn (KBB) samt Qualitätsmanagement, Entwurf und Bemessung sowie Herstellung der Kapillarsperre mit KBB. Eine Verabschiedung der Eignungsbeurteilung durch die LAGA wird noch im Frühjahr 2011 erwartet.

Der aktuelle Qualitätsstandard von Kapillarsperren in Oberflächenabdichtungssystemen liegt seit Ende letzten Jahres in der neuen Fassung der GDA Empfehlung E 2-33 vor (DGGT 2010). Die neue GDA-Empfehlung wurde gegenüber der alten aus dem Jahr 2000 im Wesentlichen um Hinweise zur Bemessung und zum Qualitätsmanagement von Kapillarsperren angepasst. Auf beide Punkte wird auf der Grundlage der neuen Empfehlung im Abschnitt 3 näher eingegangen.

2.2 Abdichtungssysteme mit Kapillarsperren

Kapillarsperren können an Böschungen als alleinige wasserableitende Komponenten in einem Oberflächenabdichtungssystem oder im Verbund mit anderen Dichtungen eingesetzt werden.

Einfache Kapillarsperre

Die einfache Kapillarsperre kommt ohne weitere dichtende Komponente aus. Sie funktioniert im Zusammenspiel mit der darüber liegenden Rekultivierungsschicht, die dafür sorgt, dass Niederschlagswassers gespeichert und relativ gleichmäßig in die Kapillarschicht abgegeben wird. Die Kapillarschicht leitet das Wasser dann zur Wasserfassung ab. Von dem in der Rekultivierungsschicht zwischengespeicherten Wasser wird je nach geografischer Lage und Ausprägung der Vegetation ein mehr oder weniger großer Teil wieder verdunsten. Durch die Wahl der Böden, Anpassung der Mächtigkeiten und die Auswahl des Vegetationsbestandes kann die aus der Rekultivierungsschicht in eine Kapillarsperre absickernde Wassermenge vermindert werden.

Der alleinige Einsatz von Kapillarsperren kommt für Deponien der Klasse I und für Altlasten wie z. B. für Halden mit teilweise besonders steilen Böschungen in Frage. Auf wärmebildenden Halden wie noch nicht ausreagierten Erz- oder Schlackehalden kann die Kapillarsperre sogar eine der wenigen Abdichtungsmöglichkeiten bieten, wenn die Oberfläche nicht mit einer Kunststoffdichtungsbahn gedichtet werden kann und tonhaltige Dichtungen aufgrund des hohen Temperaturgradienten sehr schnell austrocknen und damit ihre abdichtende Wirkung verlieren würden. Kapillarsperren sind dagegen für höhere Temperaturen und große Temperaturgradienten unempfindlich. Sie profitieren in ihrer Wirksamkeit sogar von einem aufwärts gerichteten Wasserdampftransport.

Kapillarsperren im Verbund

Bei dem Verbund von Kapillarsperren mit einer zweiten technischen Dichtung kann man drei Fälle nach der Lage der zweiten Dichtung über oder unter der Kapillarsperre bzw. in der Mitte zwischen Kapillarschicht und Kapillarblock unterscheiden.

Für eine über der Kapillarsperre liegende Dichtung kommen grundsätzlich alle auf dem Markt befindlichen Dichtungen wie beispielsweise bindige mineralische Dichtung, Kunststoffdichtungsbahn, Trisoplast oder Bentonitmatte in Frage. Bei fehlender Konvektionssperre (meist Kunststoffdichtungsbahn) muss die Wirksamkeit der Abdichtung allerdings mit einem Kontrollfeld beobachtet und nachgewiesen werden, weshalb vermutlich primär die Kunststoffdichtungsbahn als zweite Abdichtungskomponente zur Kapillarsperre in Frage kommt. Die zweite Dichtung hält, solange sie als Dichtung wirksam ist, das meiste Wasser von der Kapillarsperre ab. Sollte die Dichtung jedoch unwirksam werden, muss die unterliegende Kapillarsperre so bemessen sein, dass sie die absickernden Wassermengen ableiten kann. Ein kostenwirksamer grundsätzlicher Nachteil einer Anordnung der zweiten Dichtung über einer Kapillarsperre ist das Erfordernis einer zusätzlichen Dränageschicht, die das Wasser oberhalb der Dichtung abführt. Dieser Aufbau erfordert zudem in der Regel getrennte Wasserfassungen für Kapillarsperre und Dränageschicht.

Liegt die Kapillarsperre oberhalb der zweiten Dichtung, so ist die Kapillarsperre ähnlich zu bemessen wie im umgekehrten Fall. Eine Kombination mit allen gängigen Dichtungen ist grundsätzlich möglich. Bei Verwendung der Kunststoffdichtungsbahn kann jedoch wiederum das Kontrollfeld entfallen.

Die letzte Möglichkeit einer Dichtung zwischen Kapillarschicht und Kapillarblock macht nur mit einer Kunststoffdichtungsbahn Sinn und wurde als Sonderform der so genannten Kombikapillarsperre patentrechtlich geschützt (LAGA 2009). In diesem Fall muss die sandige Kapillarschicht neben der Bemessung als Kapillarschicht zusätzlich auch als Dränage bemessen werden, da die Kapillarschicht gleichzeitig die Dränageschicht für die Kunststoffdichtungsbahn darstellt. Gleiches gilt auch grundsätzlich beim Einsatz einer Kapillarblockbahn in einer Kapillarsperre, da das beschichtete Gewebe der KBB zunächst eine weitgehend wasserundurchlässige Schicht darstellt, so dass Wasser bei hohen Abflussraten in der Kapillarschicht auf dem Gewebe aufgrund der behinderten vertikalen Versickerung in den Kapillarblock aufsättigen kann.

3. Konsequenzen für die Praxis

3.1 Planung und Bemessung

Bei der Planung von Kapillarsperren sollte möglichst frühzeitig die grundsätzliche Eignung eines Standortes und möglicher Böschungen für den Einsatz von Kapillarsperren geprüft werden. Anschließend folgt die standortbezogene Bemessung des gesamten Oberflächenabdichtungssystems mit Kapillarsperre unter Berücksichtigung von Systemaufbau, Böschungsgeometrie und klimatischen Verhältnissen. Für die Bemessung von Kapillarsperren sind grundsätzlich folgende drei Größen von entscheidender Bedeutung:

1. Wie viel Wasser sickert im Jahresverlauf vertikal und lateral in die Kapillarschicht zu?
2. Wie lang ist die Böschung?
3. Wie hoch ist die laterale Dränkapazität der Kapillarsperre bei der gegebenen oder geplanten Böschungsneigung?

Eine Kapillarsperre muss in der Lage sein, die im Laufe eines Jahres zufließenden Wassermengen möglichst vollständig lateral abzuleiten. Wasser sickert überwiegend vertikal aus Schichten zu, die über einer Kapillarsperre liegen (z. B. aus einer Rekultivierungsschicht). Es kann aber z. B. auch über Dränagen lateral von einem Oberhang in die Kapillarschicht fließen. Die laterale Dränkapazität einer Kapillarsperre gibt an, wie viel Wasser eine Kapillarsperre bei einer bestimmten Böschungsneigung maximal lateral ableiten kann bevor Wasser vertikal in den Kapillarblock versickert. Sie ist abhängig von der Materialkombination der Kapillarsperre, bestehend aus Kapillarschicht und Kapillarblock sowie von der Böschungsneigung. Werden beispielsweise auf einer 50 m langen und 1 : 3 geneigten Böschung maximal 6 mm/d als Zusickerung in die Kapillarschicht erwartet, so muss die laterale Dränkapazität zur vollständigen Ableitung dieser Zusickerung bei der gegebenen Böschungsneigung 300 l/(m·d) betragen. Laterale Dränkapazitäten dieser Größenordnung können in der Praxis durchaus erreicht werden. Auf längeren Böschungen oder bei zu geringen lateralen Dränkapazitäten der örtlich zur Verfügung stehenden Materialien muss die Böschung ggf. in einzelne Abschnitte unterteilt werden, um den Kapillarschichtabfluss in zusätzlichen Rigolen am Ende dieser Abschnitte zu fassen. Für weitere Ausführungen zur Bemessung wird an diese Stelle auf die GDA-Empfehlung 2-33 (2010) verwiesen.

Die Bemessung von Oberflächenabdichtungen mit Kapillarsperren erfolgt in der Regel wie folgt:

- Definition des Abdichtungsziels
- Festlegung des Systemaufbaus (Einzel- oder Verbunddichtung)
- Gestaltung der Rekultivierungsschicht
- Ermittlung bzw. Festlegung der Böschungsgeometrie (Böschungslänge, -gefälle und -form)
- Ermittlung der zu erwartenden Zusickerung zur Kapillarschicht
- Vorgabe von möglichen Abschlagslängen und der dafür erforderlichen lateralen Dränkapazität der Kapillarsperre
- Festlegung von Körnungsbändern für die Materialrecherche
- Recherche der Verfügbarkeit geeigneter Materialien für die Kapillarschicht und den Kapillarblock (kann beim Einsatz von Kapillarblockbahnen entfallen) sowie ggf. auch für die Rekultivierungsschicht
- Eignungsprüfung der Materialien mit Ermittlung der lateralen Dränkapazität
- Systemplanung mit abschließender Bemessung der Kapillarsperre und Planung aller konstruktiver Details sowie Vorgaben für den systemabhängigen Bauablauf

In dem gesamten Ablauf von Planung und Bemessung einer Kapillarsperre spielt der Zeitpunkt einer Materialrecherche und Eignungsprüfung der Materialien eine entscheidende Rolle. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten: Die Materialrecherche und Eignungsprüfung (vgl. Abschnitt 3.2) kann planungsbegleitend durchgeführt oder in die Ausschreibung verlagert werden.

➤ Planungsbegleitende Materialrecherche und Eignungsprüfung

Die planungsbegleitende Materialrecherche und Eignungsprüfung ermöglicht, dass der Planer die gesamte Bemessung der Kapillarsperre einschließlich der Detailplanung von Böschungslängen und Wasserfassungen mit der lateralen Dränkapazität des eignungsgeprüften Materials durchführen kann. Eine spätere Anpassung der Planung an zu einem späteren Zeitpunkt ermittelte Materialeigenschaften ist nicht notwendig. Voraussetzung für eine planungsbegleitende Materialprüfung ist die Bereitschaft des Bauherrn sich das geprüfte Material vorzeitig zu sichern und für die Baumaßnahme zu stellen. Allgemeine Bedenken gegenüber Ausschreibungen von bauseits gestellten Böden bestehen in diesem Fall kaum, da der Einbau von eignungsgeprüften Sanden und Kiesen keine besonderen Schwierigkeiten erwarten lässt.

➤ Ausschreibung von Materialrecherche und Eignungsprüfung

Die Ausschreibung der Materialrecherche und Eignungsprüfung zusammen mit der Baumaßnahme setzt voraus, dass für die Bemessung in der Planung Mindestanforderungen an die laterale Dränkapazität der Kapillarsperre gestellt werden. Der Bieter müsste Materialien recherchieren und die laterale Dränkapazität der Materialien nachweisen. Einfache Materialparameter wie Korngrößenverteilungen reichen hierfür nicht aus. Dies ist für den Bieter in der Angebotsphase daher kaum zumutbar. Sollten jedoch die geforderten Materialien zu einem späteren Zeitpunkt nicht wirtschaftlich beschaffbar sein, besteht das Risiko, dass die Bemessung der Kapillarsperren nachträglich angepasst und die Planung überarbeitet werden muss. Daher wird von der Verlagerung der Materialrecherche und Eignungsprüfung in die Bauphase abgeraten, es sei denn, es ist bekannt, dass für Kapillarsperren geeignete Materialien ortsnah definitiv ausreichend zur Verfügung stehen.

Im Zusammenhang mit der Planung und Ausschreibung von Kapillarsperren ist es schwierig, Nebenangebote über alternative mineralische Dichtungen zur Kapillarsperre zuzulassen, da sich beispielsweise die geplanten Mächtigkeiten der Dichtungskomponente ändern, die Wasserfassungen unterscheiden sowie Durchdringungen der Dichtungen und Anschlüsse an Bauwerke verändern. Die Beauftragung von Nebenangeboten mit anderen Dichtungen als der geplanten Kapillarsperre würde erhebliche Umplanungen nach sich ziehen müssen.

Großes Augenmerk ist bei der Planung von Kapillarsperrensystemen in jedem Fall auf die Gestaltung der Wasserfassung zu legen. Sie ist so aufzubauen, dass ein Übergang von ungesättigten zu gesättigten Abflüssen möglich ist, ohne dass Wasser in der Kapillarschicht rückstaut und vor der Wasserfassung vertikal in den Deponiekörper versickern kann. Voraussetzung für die einwandfreie Funktion dieser Fassungselemente ist ein gedichteter Bereich, in dem das in der Kapillarschicht oberhalb der Schichtgrenze zum Kapillarblock ungesättigt fließende Wasser sich aufsättigen kann ohne zu versickern. Dies erfordert die Ableitung einer Sicherheitshöhe H_s über dem tiefsten Punkt der Kapillarschicht. In Bild 7 ist exemplarisch eine Wasserfassung skizziert (s. a. Melchior & Jelinek 2007)

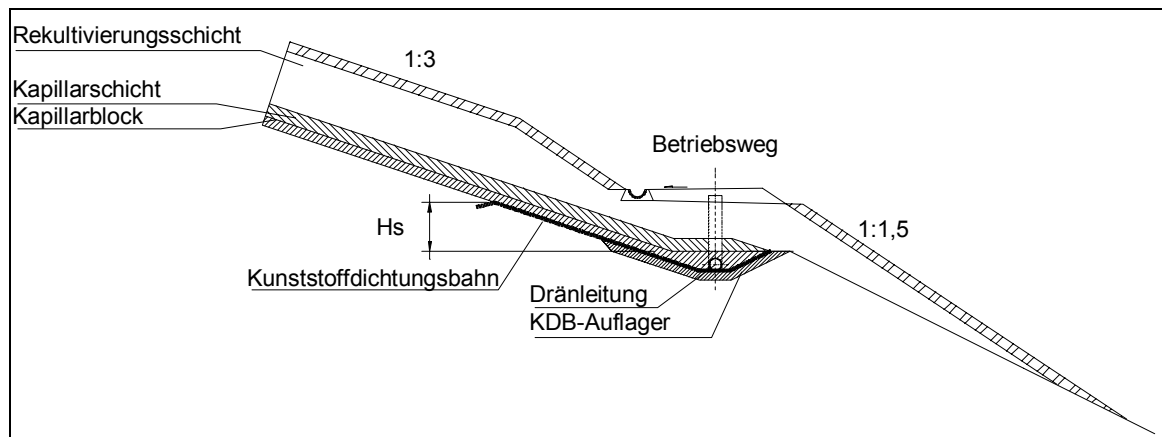


Bild 7: Aufbau und Entwässerung eines einfachen Kapillarsperrensystems (exemplarisch, Hs: Sicherheitshöhe für die Aufsättigung des zu fassenden Wassers)

3.2 Eignungsprüfung und Dimensionierung

Für die Eignungsprüfung und Dimensionierung von Kapillarsperren wird auf die GDA-Empfehlung E2-33 (2010) verwiesen. Die Materialprüfung läuft nach folgendem Schema ab:

- Beprobung der Materialien vor Ort
- Vorprüfung und Vorauswahl aufgrund einfach im Labor zu bestimmender Parameter (z. B. Korngrößenverteilungen, gesättigte Wasserdurchlässigkeit etc.), aufgrund visueller Prüfung von Mineralbestand, Kornformen, Kornoberflächen, Fremdstoffen sowie aufgrund von Vergleichen mit Referenzproben bereits untersuchter Kapillarsperren
- Vortest der sich ergebenden Materialkombination in einer kleinen Kipprinne
- Bestimmung der lateralen Dränkapazität von ein oder zwei Materialkombinationen in einer großen, mehrere Meter langen Kipprinne bei den geplanten Böschungsneigungen

Kleine Kipprinnen mit z. B. Längen von 1 m sind für die Bestimmung der lateralen Dränkapazität von Kapillarsperren zu kurz, da sich keine vom Ort und der Technik der Wasserzugabe und Wasserfassung unbeeinflussten Gleichgewichtszustände einstellen lassen. Sie eignen sich jedoch für Vorversuche, um die Leistungsfähigkeiten einer großen Anzahl Materialkombinationen schnell und kostengünstig miteinander vergleichen zu können und erste Anhaltspunkte über die Größenordnung der lateralen Dränkapazität zu erhalten. Durch diese Voruntersuchung werden aufwändige Fehlversuche in der großen Rinne vermieden. Die Ergebnisse der Voruntersuchung erlauben zudem eine sehr genaue Schätzung der einzustellenden

Zusickerungsraten bei der Durchführung der Versuche in der großen Rinne und führen somit zu einer beschleunigten Versuchsdurchführung.

In der Tabelle 2 ist der Parameterumfang der bauvorbereitenden Eignungsprüfung einschließlich Probefeld aus der GDA-Empfehlung E2-33 (2010) zusammengestellt, wobei der Parameterumfang des Probefeldes auch für die baubegleitenden Prüfungen herangezogen werden können. Die Parameter der Prüfungen sind in folgenden drei Stufen angegeben:

- Stufe A: Vorauswahl von Materialien für Kapillarschicht und Kapillarblock bzw. für Materialien, die als Kapillarschicht zur Kapillarblockbahn passen, auf der Grundlage von einfachen Materialkennwerten. Die Materialien müssen in ausreichenden Mengen und gleich bleibender Qualität verfügbar sein.
- Stufe B: Eignungsprüfung der Kombination Kapillarschicht/Kapillarblock oder Kapillarschicht/Kapillarblockbahn in Kipprinnenuntersuchungen unter den projektspezifischen Randbedingungen (Böschungsneigung, Zusickerung in die Kapillarschicht) mit Bestimmung der lateralen Dränkapazität
- Stufe C: Eignungsprüfung der Bautechnik im Probefeld (Der Parameterumfang des Probefeldes kann auch für baubegleitende Prüfungen nach projektspezifischem Qualitätsmanagementplan herangezogen werden.) Die Prüfungen im Probefeld erfolgen nach Aufgrabung und Freilegung der Schichtgrenze zwischen Kapillarschicht und Kapillarblock bzw. Kapillarblockbahn. Das Bild 8 zeigt eine im Probefeld freigelegte Schichtgrenze, die durch Raupenbewegung auf der Kapillarschicht beeinträchtigt wurde.



Bild 8: Überprüfung der Ebenheit der Schichtgrenze zwischen Kapillarschicht und -block im Probefeld nach einem Wendemanöver der Raupe auf der Kapillarschicht um 180°

Prüfparameter/Nachweise	Stufe	Stufe	Stufe
	A	B	C
Korngrößenverteilung (Nasssiebung)	x	x	x
mineralogische Materialbeschreibung	x		
Glühverlust	x	x	x
Kalkgehalt	x	x	x
Wassergehalt	x	x	x
Fremdbestandteile	x	x	x
geometrische Filterstabilität		x	
Kornstabilität		x	
Kornform und -oberflächen		x	
Proctordichte (nur Kapillarschicht)		x	x
Trockendichte und Verdichtungsgrad (nur Kapillarschicht)		x	x
Wasserdurchlässigkeit		x	x
pF-Kurve (nur Kapillarschicht)		x	
pH-Wert		x	
zweiwertiges und oxalatlösliches Eisen (nur Kapillarschicht)		x	
Schwefel		x	
laterale Dränkapazität in Kipprinntest		x	
visuell frei von Verunreinigungen			x
Schichtmächtigkeit			x
Oberflächenebenheit			x
Bauvermessung (Lage und Höhen)			x
Stufe A: Vorauswahl Materialien			
Stufe B: Eignungsprüfung Materialkombination mit Kipprinntest			
Stufe C: Baubegleitende Prüfungen einschl. Probefeld			

Tabelle 2: Vorschlag Parameterumfang zur Prüfung von Materialien für Kapillarschicht und Kapillarblock (aus: GDA E2-33 (2010))

3.3 Ausführung und Qualitätssicherung vor Ort

Baumaßnahmen haben gezeigt, dass beim Bau von Kapillarsperren Baufortschritte von ca. 1.000 m²/d Kapillarblock und ca. 2.000 m²/d Kapillarschicht bzw. 1000 m²/d Kapillarschicht und Kapillarblockbahn einschließlich Wasserfassung möglich sind. In der Summe ergeben

sich Wochenleistungen von ca. 5.000 m² Kapillarsperre. Die Abstimmung von Einbaurichtung und Maschineneinsatz auf die Böschungsneigung ist dabei für eine effiziente bauliche Umsetzung wesentlich. Folgende Punkte sollten dabei beachtet werden:

- Prüfung der Materiallieferung auf Konformität mit Ausschreibung und Eignungsprüfung
- Konsequente Trennung der Materialien bei Lagerung und Einbau mit entsprechender Reinigung der Baugeräte
- Robuste, überfahrbare, erosionssichere und filterstabile Ausbildung der Wasserfassung am Böschungsfuß
- Nachweis der Eignung der vorgesehenen Einbautechnik (Baugeräte und -abläufe) in einem Probefeld
- Einbau von Kapillarblock einlagig vor Kopf durch Raupen mit ausreichend niedrigem spezifischen Bodendruck zur Vermeidung von Kornzertrümmerung (Bild 10) oder Ausrollen der Kapillarblockbahn (KBB) mit einer Traverse (Bild 12) gemäß Verlegeplan und Verlegeanleitung unter exakter Einhaltung der Verlegerichtung und der Richtung der Überlappungen der Bahnen
- Glätten des Kapillarblocks vor dem Einbau der Kapillarschicht (entfällt bei Verwendung der KBB)
- Einbau von Kapillarschicht einlagig vor Kopf
- Sicherung von Baufeldrändern und freiliegenden Schichtgrenzen gegen Erosion mit Baufolien bzw. kurzfristige Überdeckung mit der nächsten Bodenschicht (Wind- und Wassererosion am Übergang zum freiliegenden Kapillarblock bzw. Ansammlung von Feinpartikeln an der Unterkante des freiliegenden Endes der Kapillarschicht auf der Kapillarblockbahn)
- Wasserfassungen, Schächte und andere Durchdringungen der Kapillarsperre vor dem Einbau der Kapillarschicht fertig stellen und durch Anschüttung der Kapillarsperre integrieren, da die nachträgliche Durchdringung der Kapillarsperre an einzelnen Stellen sehr aufwändig und fehleranfällig ist.
- Qualitätssicherung durch die Prüfung der angelieferten Materialien, durch Eignungsnachweis der Bautechnik im Probefeld, durch Beobachtung von Bauablauf und Einbautechnik beim flächenhaften Einbau und durch gezielte Aufgrabungen der eingebauten Schichten



Bild 10: Einbau Kapillarblock mit Raupe (Kapillarsperre Deponie Breinermoor)



Bild 11: Einbau Kapillarschicht auf Kapillarblock (Testfeld Wieringermeer)

Besonders kritisch für die Funktion der Kapillarsperre ist neben der Materialqualitäten die Herstellung der Schichtgrenze zwischen Kapillarblock und Kapillarschicht (Bild 11). Bei der Herstellung der klassischen Kapillarsperre mit einem lose geschütteten Kapillarblock ist die genaue Planierung des Kiesel, die meist besondere bautechnische Verfahren zur Glättung des rolligen Materials erfordern, und der vorsichtige Einbau der Kapillarschicht zur Erhaltung der planen Schichtgrenze wesentlich. Bei der Verwendung einer Kapillarblockbahn entfallen diese bautechnisch aufwändigen Schritte. Die Planierung des Auflagers der Kapillarblockbahnen erfolgt mit üblicher Bautechnik. Dagegen erfordert die Verlegung der mehrere Tonnen schweren kiesgefüllten KBB-Rollen einige Erfahrung. Die KBB-Rollen werden üblicherweise am Lagerplatz von einem Radlader mit einem Transportdorn aufgenommen und am Baufeld abgelegt. Das Abrollen im Baufeld erfolgt mit einer Traverse (Bild 12), die von einem Bagger oder einer Seilwinde gezogen wird. Dabei dürfen die Ebenheit des Auflagers nicht

beeinträchtigt und die bereits verlegte KBB nicht befahren werden. Die Verlegerichtung der KBB ist genau einzuhalten. Die Kapillarblockbahnen sind mit einem Winkel von 6° bis 20° zur Gefällerrichtung dachziegelartig zu überlappen, damit das Wasser auf dem Gewebe der KBB nicht in die Überlappungsbereiche zur nächsten Bahn läuft. Diese Verlegung erfordert vor allem bei Gefällewechseln und unregelmäßig geformten Böschungen in Verbindung mit Querstößen der KBB viel Sachverstand von der Verlegefirma und eine lückenlose Überwachung vor Ort. Insgesamt sind die Einbautechniken für eine klassische Kapillarsperre und die Kapillarsperre mit KBB gut beherrschbar.



Bild 12: Ausrollen Kapillarblockbahnen (Versuchsfeld Deetz)



Bild 13: Kapillarschicht auf Kapillarblockbahn (Versuchsfeld Deetz)

4. Fazit

Kapillarsperren sind Komponenten in Oberflächenabdichtungssystemen, die unter ganz bestimmten Randbedingungen (Neigung, Böschungslängen, Materialverfügbarkeiten) eingesetzt werden können. Sie sind geeignet, um Böschungen "abdichten", in dem das Wasser lateral zum Hangfuß geleitet und dort gefasst wird. Eine Kapillarsperre ist jedoch kein universelles Abdichtungselement wie beispielsweise die Kunststoffdichtungsbahn. Kapillarsperren müssen projektspezifisch bemessen werden.

Durch die Entwicklung der Kapillarblockbahn (KBB) ist die Herstellung des Kapillarblocks und der für die Funktion der Kapillarsperre wichtigen Schichtgrenze zwischen Kapillarblock und Kapillarschicht deutlich einfacher geworden. Die Verlegung der KBB erfordert jedoch auch spezielle Fachkenntnis und eine gute Überwachung zur Sicherstellung der Funktion der Kapillarsperre. Gleiches gilt auch für das System Kombikapillarsperre.

Kapillarsperren sind unter Berücksichtigung der notwendigen Randbedingungen sowohl als klassische Kapillarsperre als auch mit Kapillarblockbahn einzelfallbezogen genehmigungsfähig. Sowohl die LAGA als auch die neue GDA-Empfehlungen zu Kapillarsperren beschreiben den notwendigen Rahmen für die Planung, Bemessung, Herstellung und Qualitätssicherung von Kapillarsperren. Durch den Verzicht auf quellfähige, empfindliche Tonminerale und durch ihre Schichtdicke sind Kapillarsperrensysteme vergleichsweise robust. Zudem ist der Umgang mit Sanden und Kiesen bei der Herstellung einer Kapillarsperre den Baufirmen vertraut. Insbesondere für den Einsatz an steilen Böschungen und an Sonderstandorten von beispielsweise Abraum- und Erzhalde sind Kapillarsperren gut geeignete und gegenüber anderen mineralischen Abdichtungen konkurrenzfähige Systeme.

Letztendlich zeigen die mittlerweile seit über sieben Jahren laufenden sehr guten Versuchsergebnisse der MEAB auf der Deponie Deetz, dass fachgerecht geplante und hergestellte Kapillarsperren in der klassischen Form und mit Kapillarblockbahnen sehr gut funktionieren und hohe Wirksamkeiten erreichen.

5. Literatur

- BARTH, C. (2003): Die Wirksamkeit der Kapillarsperre als Deponieoberflächenabdichtung. Feldversuche auf der Deponie Bayreuth. Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München. 100 S. + Anhang
- BAUER, E. (2000): Eignung verschiedener Materialien für Kapillarsperren. Auswahl und Dimensionierung. Dissertation am Lehrstuhl für Allgemeine, Angewandte und Ingenieur-Geologie der Technischen Universität München. 142 S.
- DEPV - DEPONIEVERORDNUNG (2009): Verordnung über Deponien und Langzeitlager BGBl. I, Nr. 22, S. 900
- DGGT - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK (2010): GDA Empfehlung E2-33 Kapillarsperren in Oberflächenabdichtungssystemen. Bautechnik, 87, Heft 9, S. 553 – 561
- HOLFELDER, T. (2002): Temperaturbeeinflusste Transportprozesse in Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. Dissertation am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt, Mitteilungen TU Darmstadt, Heft 125
- JELINEK, D. (1997): Die Kapillarsperre als Oberflächenbarriere für Deponien und Altlasten. Langzeitstudie und praktische Erfahrungen in Feldversuchen. Dissertation am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft an der TU Darmstadt, Mitteilungen TU Darmstadt, Heft 97, 141 S.
- KÄMPF, M. (2000): Fließprozesse in Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. Grundlagen zur hydraulischen Bemessung. Dissertation am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt, Mitteilungen TU Darmstadt, Heft 109, 145 S. und Anlagen
- LAGA AD-HOC-AG „DEPONIETECHNIK“ (2010): Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard [5-0] – Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten. Übergreifende Anforderungen vom 16.08.2010. 23 S. (gewerbeaufsicht.niedersachsen.de)
- LAGA AD-HOC-AG „DEPONIETECHNISCHE VOLLZUGSFRAGEN“ (2009): Beurteilung der grundsätzlichen Eignung der Kombikapillarsperre als Oberflächenabdichtung vom 12.12.2007, 9 S. + 1 Anhang (www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de)
- LAGA -LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (2000): Empfehlungen der LAGA Ad hoc Arbeitsgruppe „Oberflächenabdichtungen und -abdeckungen“. Erschienen als Abfallwirtschaftsfakten 6 der Niedersächsischen Landesämter für Ökologie und für Bodenforschung, 22 S. (eine 1. Revision erschien 2002 als Abfallwirtschaftsfakten 6.1 im Umfang von 34 S., download unter: <http://www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de>)

- MELCHIOR S. & D. JELINEK (2007): Kapillarsperren in Oberflächenabdichtungssystemen. In: Ramke et al.: Anforderungen an Deponie-Oberflächenabdichtungssysteme. Statusworkshop der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik und der Fachhochschule Lippe und Höxter. Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, 6, S. 265-284
- MELCHIOR, S. & B. STEINERT (2001): Die Kapillarsperre - Stand der Technik, Leistungsfähigkeit und Kosten. In: Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der TU Berlin, Heft 29, S. 19-32.
- MELCHIOR, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Dissertation an der Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 22, 330 S. und Anhang.
- MELCHIOR, S., B. STEINERT & S. RAABE (2010): Ergebnisse zur Wirksamkeit ausgewählter Oberflächenabdichtungssysteme der Versuchsfelder der MEAB auf der Deponie Deetz. Tagungsband 21. Nürnberger Deponieseminar, 105-118
- OSTERKAMP, K. (2004): Wassertransport in Kapillarsperren. Markierungsversuche im Labormaßstab. Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München. 135 S.
- PFEIFFER, B. M. (2006): Vergleichende Untersuchungen von Kapillarsperren aus Natur- und Recyclingbaustoffmaterialien als Beitrag zur Deponieoberflächenabdichtung und Ressourcenschonung. Dissertation am Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement der Justus-Liebig-Universität Gießen. 220 S.
- SCHNATMEYER, C. (1998): Alternative Oberflächenabdichtungssysteme für Halden und Altstandorte am Beispiel einer Gichtstaubdeponie. Dissertation an der Fakultät der Bio- und Geowissenschaften der Universität Karlsruhe. 162 S. + Anhang
- STEINERT, B. (1999): Kapillarsperren für die Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten – Bodenphysikalische Grundlagen und Kipprinnenuntersuchungen. Dissertation an der Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 45, 250 S. + Anhang.
- STEINERT, B., S. MELCHIOR, K. BURGER & K. BERGER, M. TÜRK & G. MIEHLICH (1997): Dimensionierung von Kapillarsperren zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 32, 362 S.
- VON DER HUDE, N, S. MELCHIOR & S. MÖCKEL (1999): Bau einer Kapillarsperre im Oberflächenabdichtungssystem der Deponie Breiner Moor, Teil 2. In: Müll und Abfall, 31, H. 4, S. 186-193.
- VON DER HUDE, N. (1999): Kapillarsperren als Oberflächenabdichtungen auf Deponien und Altlasten – Laborversuche und Bemessungsregeln. Dissertation am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt, Mitteilungen TU Darmstadt, H. 41, 161 S.

- VON DER HUDE, N. S. MELCHIOR & S. MÖCKEL (1999): Construction of a Capillary Barrier in the Cover of the Breinermoor Landfill. In: CISA Sardinien
- WOHNLICH, S. & E. BAUER (1999): Aufbau und Wirkungsweise der Kapillarsperre. In: Krajewski, W. W. & S. Wohnlich [Hrsg.]: Die Kapillarsperre - Beiträge zum Stand der Technik. Springer Verlag, Heidelberg. S. 27-44
- WOHNLICH, S. (1991): Kapillarsperren – Versuche und Modellberechnungen. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, 15, 127 S. + Anhang
- ZISCHAK, R. (1997): Alternatives Oberflächenabdichtungssystem „Verstärkte mineralische Abdichtung mit untenliegender Kapillarsperre“ – Wasserbilanz und Gleichwertigkeit. Dissertation an der Universität Karlsruhe. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, 47, 179 S. + Anhang.