

# Langzeitbeständigkeit von baulichen Sicherungsmaßnahmen

Stefan Melchior

## 1 Einführung

Vor 25 Jahren begann die Sanierung der Deponie Georgswerder: Gefühlte eine lange Zeit - im Hinblick auf die angestrebte Beständigkeit der Sicherungssysteme erst der Anfang einer undefiniert langen Geschichte. Was wurde seinerzeit von der „Einkapselung“ der Deponie erwartet und wie hat sich bisher die realisierte Oberflächenabdichtung im Vergleich zu anderen damals und heute möglichen Alternativen bewährt? Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Entwicklung des Kenntnisstandes zur Beständigkeit von Sicherungssystemen für Deponien und Altlasten und zieht ein Zwischenfazit hinsichtlich der „Einkapselung“ der Deponie Georgswerder.

## 2 Ausgangslage 1985 und Ziele der Sicherung der Deponie Georgswerder

Die an der Deponie Georgswerder 1983 festgestellten Schadstoffkonzentrationen haben maßgeblich dazu beigetragen die Altlastenproblematik in das Bewusstsein der Öffentlichkeit zu rücken. Altlasten wurden von der Öffentlichkeit als erhebliche Bedrohung und ihre Sanierung als wichtige Aufgabe wahrgenommen. Die Gesellschaft war bereit, erhebliche Finanzmittel für diese Aufgabe bereitzustellen, womit die Voraussetzung für die Entwicklung eines Standes der Technik der Altlastensanierung geschaffen wurde.

Im Bereich der Deponietechnik war bereits Ende der 70er Jahre erkannt worden, dass „wilde Müllkippen“ wie beispielsweise die Deponie Georgswerder nicht mehr tragbar waren und „geordnete Deponien“ zukünftig über natürliche und technische Barrieren an der Deponiebasis verfügen sollten, um den Schadstofftransport ins Grundwasser zu minimieren. Als technische Barrieren wurden zunächst Tondichtungen und gelegentlich auch „Kunststofffolien“ vorgeschlagen. Die zunächst dünnen „Folien“ aus unterschiedlichen Werkstoffen wurden durch Fachleute in den USA und Deutschland (hier maßgeblich unter der Regie der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, BAM) zu dickeren „Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) aus Polyethylen hoher Dichte (HDPE) weiterentwickelt, die gegen aggressive Deponiesickerwässer beständig sein sollten. Die Kombination aus KDB über Tondichtung wurde in den 80er Jahren als Basisabdichtung für Deponien etabliert, wobei die KDB in erster Linie wasserdicht sein sollte und die Tondichtung Schadstoffe zurückhalten sollte. Dieses Kombinationssystem wurde in der Folgezeit auch für die Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten vorgeschlagen, da man der Meinung war, dass es unvernünftig und aufwändig sei, kontaminierte Deponiesickerwässer erst entstehen zu lassen und dann aufwändig zu fassen und zu reinigen („Multibarrierenprinzip“). Der Grundwasserschutz genoss hohe Priorität und schadstoffbelastete Abfälle sollten möglichst wasserdicht eingekapselt werden.

Zur Deponietechnik gab es in den 80er Jahren erste Merkblätter (beispielsweise das NRW-Merkblatt zu mineralischen Dichtungen) und Fachdokumente der BAM. Die abfallrechtlichen Regelwerke TA Abfall [36] und TA Siedlungsabfall [37] wurden noch entwickelt und erst 1991 bzw. 1993 verabschiedet. Die Altlastensanierung steckte noch in ihren Kinderschuhen und wurde mit erheblichen Ängsten der Öffentlichkeit, aber auch einer gewissen Technik-Euphorie der beteiligten Fachleute begleitet. So wurden Ende der 80er und Anfang der 90er Jahre vielfältige Verfahren des Spezialtiefbaus für die Altlastensanierung in Betracht gezogen. Neben unterschiedlichen Verfahren der Einkapselung durch Dichtwände (Einphasen-Dichtwände, Zweiphasen-Dichtwände, Kombinationswände mit in Tonsuspension eingestellter KDB, Stahlspundwänden mit Schlossverbindungen, Dichtwänden aus Glas) wurde sogar die bergmännische Unterfahrung von Altlasten ernsthaft vorgeschlagen, jedoch nie realisiert.

Vor diesem Hintergrund wurde die Sanierung der Deponie Georgswerder geplant. Die Umschließung der Deponie mit einer Dichtwand wurde aufgrund der hydrogeologischen Standortverhältnisse und der Schadstoffbelastung wieder zugunsten einer hydraulischen Sicherung mit Brunnengalerien im Grundwasserabstrom verworfen. Die „Einkapselung“ der Deponie erfolgte durch die Sicherung der Deponieoberfläche in zwei Bauabschnitten (siehe auch [1] bis [6]). Die sogenannte „Obere Abdeckung“ des Kuppenbereichs lag oberhalb des Staufflüssigkeitsspiegels der Deponie und wurde zuerst hergestellt. Die Böschungsbereiche mit dem aufwändigen Randabschluss zur Fassung seitlich aus dem Deponiekörper austretender Sickerflüssigkeit wurden im zweiten Bauabschnitt, der „Unteren Abdeckung“, gesichert. In beiden Abschnitten kam unter einer Rekultivierungsschicht („Decksubstrat“) und einer Entwässerungsschicht („Flächendranage“) eine Kombinationsdichtung aus einer KDB über einer tonhaltigen Dichtung aus Geschiebemergel (0,6 m aus drei Lagen mit einem Wasserdurchlassigkeitsbeiwert  $k_f \leq 1 \cdot 10^{-9}$  m/s) zum Einsatz. Die Kosten für die flächenhafte Herstellung der Oberflächenabdichtung betragen ohne die aufwändige Randabschlusskonstruktion ca. 75 Euro / m<sup>2</sup>. Mit der Oberflächenabdichtung wurden folgende Ziele verfolgt:

- Grundwasserschutz durch Minimierung der Schadstoffmobilisierung durch eindringende Niederschläge,
- Fassung und Ableitung der aus dem Deponiekörper seitlich austretenden kontaminierten Staufflussigkeiten,
- Weitgehende Unterbindung unkontrollierter Austritte der in der Deponie entstehenden Gase in die Atmosphère,
- Landschaftsgerechte Wiedereingliederung der Deponie in ihr Umfeld.

Interessant ist im Rückblick hinsichtlich der erwarteten Langzeitbeständigkeit der Oberflächenabdichtung, dass man der Geschiebemergel-Dichtung die Hauptaufgabe der Abdichtung zuwies. Tone galten als dauerhaft beständig, da sie „in geologischen Zeiträumen“ als Verwitterungsendprodukt entstanden waren, während die mechanische und chemische Beständigkeit der „dünnen“ KDB angezweifelt wurde. Es gab insbesondere hinsichtlich der mechanischen Beständigkeit der Schweißnähte bedenken, weshalb die KDB in der Oberen Abdeckung auch dachziegelartig überlappend verlegt und nicht verschweißt wurde. Während die Geschiebemergel-Dichtung in der Planung und den begleitenden Drucksachen als Dichtung bezeichnet wurde, wurde die KDB nicht als zweite, redundante Dichtung, sondern als „Wurzel- und Nagetiersperre“ bezeichnet. Mitte der 80er Jahre waren, von den Ergebnissen einiger Kurzzeit-Laborversuche abgesehen, kaum belastbare Erkenntnisse zum Langzeitverhalten von Oberflächenabdichtungen verfügbar, so dass die Planung von solchen Systemen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet war.

### **3 Untersuchungen zur Langzeitbeständigkeit von Oberflächenabdichtungssystemen auf der Deponie Georgswerder**

Sanierungsbegleitend wurde ein vom Bund gefördertes umfangreiches FuE-Verbundvorhaben „Neue Verfahren und Methoden zur Sanierung von Altlasten – am Beispiel der Deponie Georgswerder, Hamburg“ gestartet (BMFT Förderkennzeichen 1440359 I). Eines der in diesem Rahmen realisierten Teilvorhaben wurde durch das Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg durchgeführt und befasste sich mit dem Thema „Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme“. Hauptziel dieses Vorhabens war die Erhebung von übertragbaren Daten zum Langzeitverhalten von

unterschiedlichen Oberflächenabdichtungen unter repräsentativen Feldbedingungen. Hierzu wurden zunächst sechs Großlysimeter („Testfelder“, jeweils 10 m · 50 m) mit dem damaligen Stand der Technik entsprechenden Bauverfahren hergestellt und so in die Oberflächenabdichtung der Deponie integriert, dass sie in situ den deponietypischen Alterungsprozessen ausgesetzt wurden. In den Testfeldern wird der Wasserhaushalt der System bestimmt und die Durchsickerung der untersuchten Dichtung direkt gemessen. Zahlreiche Sonderversuche und Aufgrabungen ergänzten die Testfelduntersuchungen.

Von 1986 bis 1990 wurde das Testfelder-Projekt auf der Deponie Georgswerder zu je 50 % vom Bund (BMFT) und von der Freien und Hansestadt Hamburg (Umweltbehörde) gefördert. Die Fortsetzung des Projekts von 1991 bis 1993 wurde zu 100 % von der Umweltbehörde Hamburg finanziert. Von 1994 bis 1995 schloss sich unter dem Titel „Entwicklung und Bewertung von alternativen Systemen zur Abdeckung von Altlasten“ eine Projektphase an, die zu jeweils 50 % von der Umweltbehörde Hamburg und der Deutschen Bundesstiftung Umwelt getragen wurde. In dieser Zeit wurden die ursprünglichen sechs Großlysimeter auf der Deponie Georgswerder durch zusätzliche Testfelder, in denen Bentonitmatten untersucht wurden, ergänzt. Die Untersuchung der Bentonitmantentestfelder wurde bis 1997 unter Förderung durch die Umweltbehörde Hamburg fortgesetzt (ergänzende Aufgrabungen fanden noch bis 1999 statt) und zeitgleich die Testfelderanlage umgeplant. Nach Ende der FuE-Phase (1997) wurden die Testfelderuntersuchungen im Rahmen der Langzeitüberwachung der gesicherten Altlast durch die Umweltbehörde Hamburg weitergeführt. Seit 1999 sind deshalb die Messungen auf die drei Testfelder reduziert, in denen das großflächig realisierte Dichtungssystem eingebaut ist.

Abb. 1 zeigt den Schichtaufbau der in den Testfeldern untersuchten Systeme.

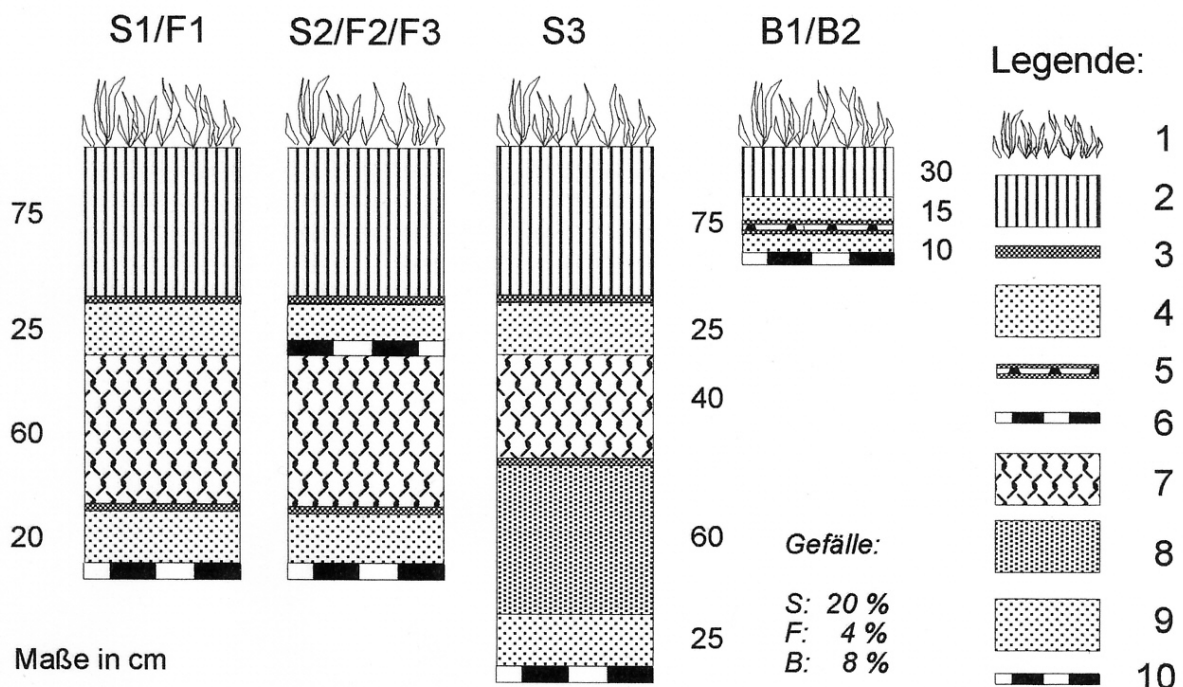


Abbildung 1: Schichtaufbau der Testfelder auf der Deponie Georgswerder

Legende: 1 Vegetation, 2 Rekultivierungsschicht (lehmgiger Sand, obere 25 cm mittel humos), 3 Geotextil, 4 Entwässerungsschicht (Grobsand/Feinkies), 5 Bentonitmatte, 6 und 10 Kunststoffdichtungsbahn (1,5 mm PEHD), 7 Bindige mineralische Dichtung (Geschiebemergel, Dicke der Einzellagen 20 cm), 8 Kapillarschicht (Feinsand), 9 Auffanggrän (Grobsand/Feinkies, auf S3 gleichzeitig Kapillarblock)

Der Aufbau, die Herstellung und das Messprogramm der Testfelder sowie die Ergebnisse der ersten Untersuchungsphase werden in [7] bis [11] ausführlich dargestellt. Die Arbeiten [12] bis [20] enthalten zusammenfassende Veröffentlichungen der wichtigsten Untersuchungsergebnisse, so dass hier auf eine ausführliche Darstellung verzichtet wird. Die Ergebnisse zum Langzeitverhalten der untersuchten Oberflächenabdichtungssysteme können wie folgt zusammen gefasst werden:

### Bindige mineralische Dichtungen

In den Feldern F1, S1 und S3, in denen die untersuchten bindigen mineralischen Dichtungen aus Geschiebemergel nicht durch eine Kunststoffdichtungsbahn geschützt werden, wurde weltweit erstmals festgestellt, dass nach dem Stand der Technik eingebaute bindige mineralische Dichtungen innerhalb weniger Jahre nach ihrer Herstellung durch Rissbildung infolge Austrocknung und Durchwurzelung irreversibel altern können. Die Alterung erfolgte in mehreren Schritten (vgl. Abb. 2 und 3):

- Nach ihrer Herstellung wiesen die Dichtungen Durchlässigkeitsbeiwerte von im Mittel  $2,4 \cdot 10^{-10}$  m/s auf (Laborergebnisse der Fremdüberwachung beim Einbau). In den ersten 1,5 Jahren der Untersuchung (1988 bis Mitte 1989) wurden auf den Testfeldern in situ Durchsickerungsmengen von 1 bis  $5 \cdot 10^{-10}$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> · s) gemessen. Ähnliche Durchlässigkeitswerte ergaben sehr aufwändige in situ außerhalb der Testfelder durchgeführte Feldversuche mit dem Doppelring-Infiltrimeter. Die Dichtungen waren also mit der gewünschten Dichtwirksamkeit eingebaut worden.
- Der Sommer 1989 war durch eine anhaltend relativ trockene Witterung gekennzeichnet. Als Folge der Wasserabgabe an die ausgetrockneten Deckschichten (kapillarer Aufstieg in die Entwässerungsschicht) traten in den mineralischen Dichtungen Wasserspannungen bis ca. 400 hPa auf. Diese erste Austrocknung hatte die Bildung von Schrumpfrissen zur Folge, die seither als bevorzugte Wasserwege für die Durchsickerung der Dichtungen dienen. Die Existenz solcher bevorzugter Wasserwege wurde durch einen Tracerversuch im Testfeld S1 im Jahre 1989 eindeutig bewiesen. In der Folgezeit traten bis 1992 Durchsickerungsmaxima der mineralischen Dichtungen von 2 bis  $7 \cdot 10^{-9}$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> · s) auf. Die Jahresraten der Durchsickerung stiegen auf rund 10 bis 30 mm/a.
- Der Sommer 1992 war gegenüber 1989 noch erheblich trockener. Die Wasserspannungen in den mineralischen Dichtungen stiegen schnell und so stark an, dass die methodisch bedingte obere Messbereichsgrenze von Tensiometern (ca. 800 hPa) überschritten wurde. Diese starke Austrocknung, an der vermutlich auch die Wasseraufnahme von Pflanzen beteiligt war, die einzelnen Aufgrabungen zufolge mittlerweile bereichsweise die Dichtungen erreicht hatten, verursachte eine zusätzliche Schrumpfrissbildung. Aufgrabungen in den Folgejahren zeigten in den Feldern unterschiedlich ausgeprägte Schadbilder. Die Dichtung in S1 war sehr spröde, wies klaffende Risse auf, die z.T. bis in 1,6 m Tiefe durch einen dichten Wurzelfilz ausgekleidet waren und an den Risswänden rot gefärbte Ausfällungen von oxidiertem Eisen aufwiesen. Die Rostfleckung belegt die wechselfeuchten Verhältnisse in der Dichtung. Beim Einbau war der Mergel noch grau gefärbt und das Eisen in reduzierter, mobiler zweiwertiger Form enthalten. Die Wassergehalte der Dichtungen beweisen, dass die Austrocknung 1992 Wasserspannungswerte von über 3.000 hPa erreicht haben muss. Im Feld F1 war der Mergel demgegenüber feuchter und noch überwiegend grau gefärbt. Zumindest in der Profilgrube der Aufgrabung 1995 wurden keine Pflanzenwurzeln in der Dichtung festgestellt. Die Schrumpfrisse waren sehr viel schmaler und nur mit Mühe mit bloßem Auge erkennbar. Trotz dieser eklatanten visuellen Unterschiede war die Wirksamkeit der Dichtungen in den Feldern S1 und F1 fast gleich geschädigt. Die maximalen Durchsickerungsraten lagen in den

Folgejahren im Bereich von  $4,1$  bis  $9,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . Die Jahresraten der Durchsickerung stiegen auf Werte zwischen rund  $100$  und  $200 \text{ mm/a}$  (zu den Einzelwerten siehe Tabellen in [19] und [20]). In den Jahren  $1992$  bis  $1997$  sickerten im Durchschnitt  $143 \text{ mm/a}$  durch die Geschiebemergeldichtungen der Felder  $F1$ ,  $S1$  und  $S3$  (das entspricht  $42 \%$  der gesamten Zusickerungsmenge in die Entwässerungsschicht). Die Maximalwerte einzelner Jahre liegen bei rund  $200 \text{ mm/a}$  oder  $78 \%$  der Zusickerung in die Entwässerungsschicht.

Die Schäden an den bindigen mineralischen Dichtungen und deren Ursachen sind durch unterschiedliche Versuche, Messdaten und Beobachtungen bei Aufgrabungen umfangreich dokumentiert (siehe insbesondere [8], [12], [16] und [18]).

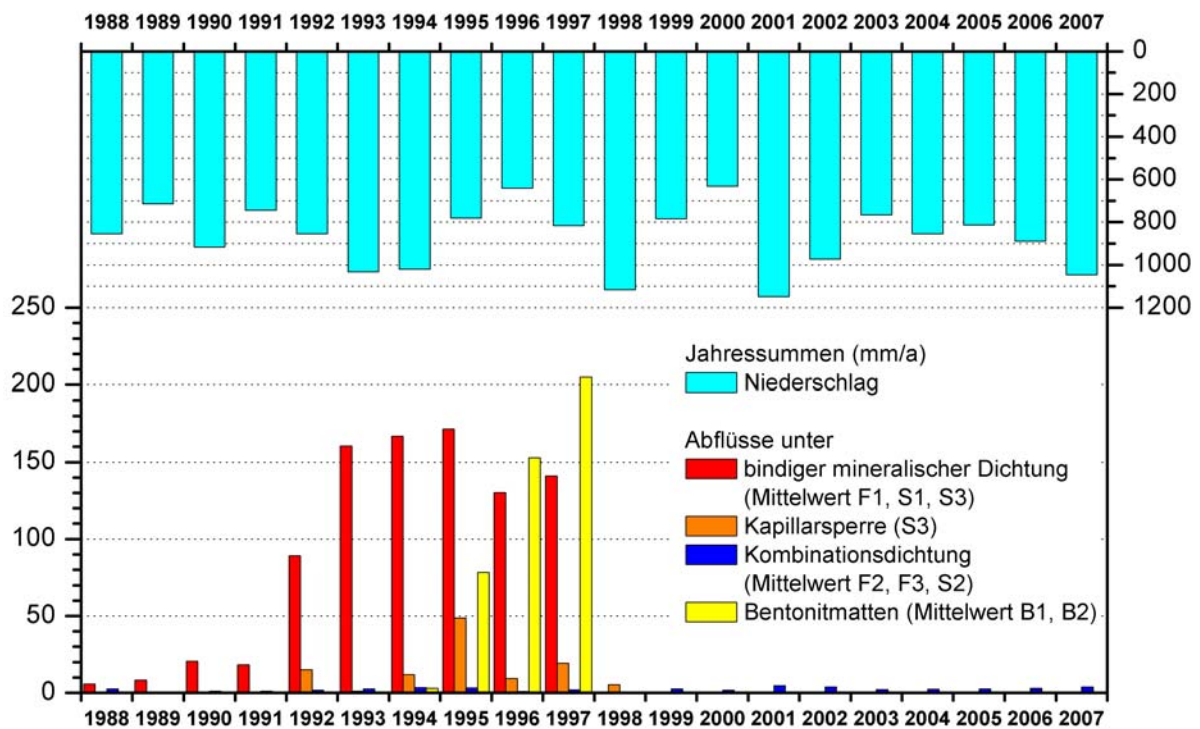


Abbildung 2: Jahressummen der Dichtungsdurchsickerung für vier verschiedene Dichtungstypen der Testfelder auf der Deponie Georgswerder im Zeitraum  $1988 - 2005$  in  $\text{mm/a}$  (Messungen Geschiebemergelfelder nur  $1988 - 1997$ , Bentonitmattenfelder nur  $1994 - 1997$ , Kapillarsperrenfeld nur  $1988 - 1998$ )

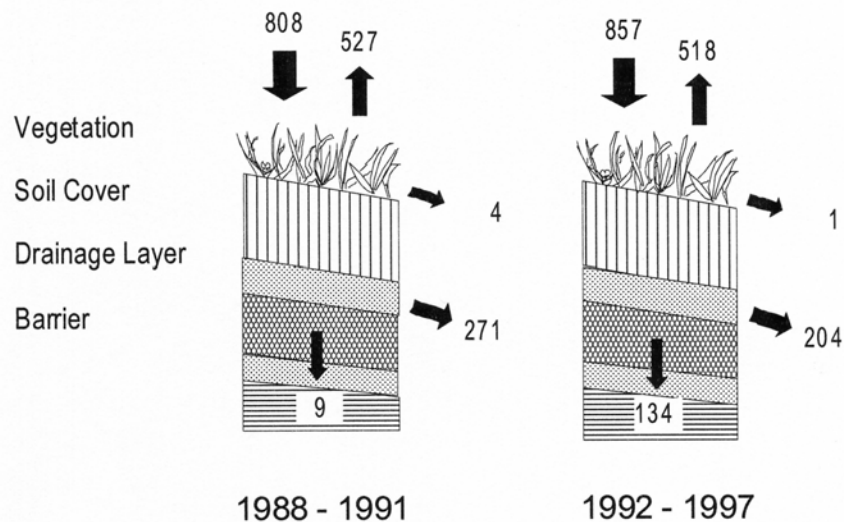


Abbildung 3: Wasserhaushalt der Testfelder mit Geschiebemergeldichtung ohne schützende Kunststoffdichtungsbahn (Felder S1 und F1) vor und nach Alterung der mineralischen Dichtungen (Flussraten als Mittelwerte in mm/a)

#### Kombinationsdichtungen (Kunststoffdichtungsbahn über Geschiebemergel)

Die Deponie Georgswerder weist in ihrem ersten Bauabschnitt, der Oberen Abdeckung, eine Kombinationsdichtung auf, wie sie in Testfeld F3 realisiert wurde. Die KDB ist dort dachziegelartig überlappend verlegt worden. Auf den Testfeldern F2 und S2 wurde die KDB wie im Bereich der Unteren Abdeckung verschweißt. Die Wirksamkeit der Kombinationsdichtung ist in allen drei Felder sehr gut (vgl. Abb. 4 und 5). Die Jahressummen an Wasser, das unter den Dichtungen aufgefangen wird, liegen zwischen 0,3 und 5,3 mm/a, im Mittel bei 2,5 mm/a. Dabei zeigt das Testfeld mit der überlappend verlegten KDB mit im Durchschnitt 3,7 mm/a geringfügig höhere Werte als das Vergleichsfeld mit verschweißter KDB (1,3 mm/a). Die Kombinationsdichtungen zeigen demgegenüber auch nach 18 Jahren einen unvermindert hohen Wirkungsgrad.

Eine genaue Analyse des Jahresganges der Abflüsse aus den Kombinationsdichtungen zeigt, dass die Abflussbildung sehr eng mit den Temperaturverhältnissen in der mineralischen Dichtung korreliert ([8], [9] und [17]). Im Sommerhalbjahr wird die Oberkante der Dichtung stärker erwärmt als ihre Unterkante, so dass Wasser in flüssiger und dampfförmiger Phase abwärts transportiert wird. Im Winterhalbjahr kehrt sich dieser Fluss um, und es bildet sich Kondenswasser unter der KDB, wie Aufgrabungen gezeigt haben. Zusätzlich zu den Testfeldern wurden daher Anfang der 90er Jahre auf der Deponie Georgswerder sehr aufwändige Sonderversuche im Feld durchgeführt, in denen der Wärmehaushalt in drei Versuchszellen, die in situ und ohne Störung der Dichtungen instrumentiert wurden, gezielt gesteuert wurde [9]. Dabei wurde versucht, zeitraffende Versuchsbedingungen einzustellen, um zu untersuchen, ob die mineralische Dichtung auch unter einer intakten KDB durch temperaturabhängige Flüsse soweit austrocknen kann, dass Schrumpfrisse auftreten können. Die Versuche ergaben, dass diese Prozesse extrem langsam verlaufen und innerhalb der Zeiten, die für die Haltbarkeit von Kunststoffdichtungsbahnen diskutiert werden (über 100 Jahre), keine Schrumpfrissbildung in der mineralischen Oberflächenabdichtung unter KDB zu erwarten sind.

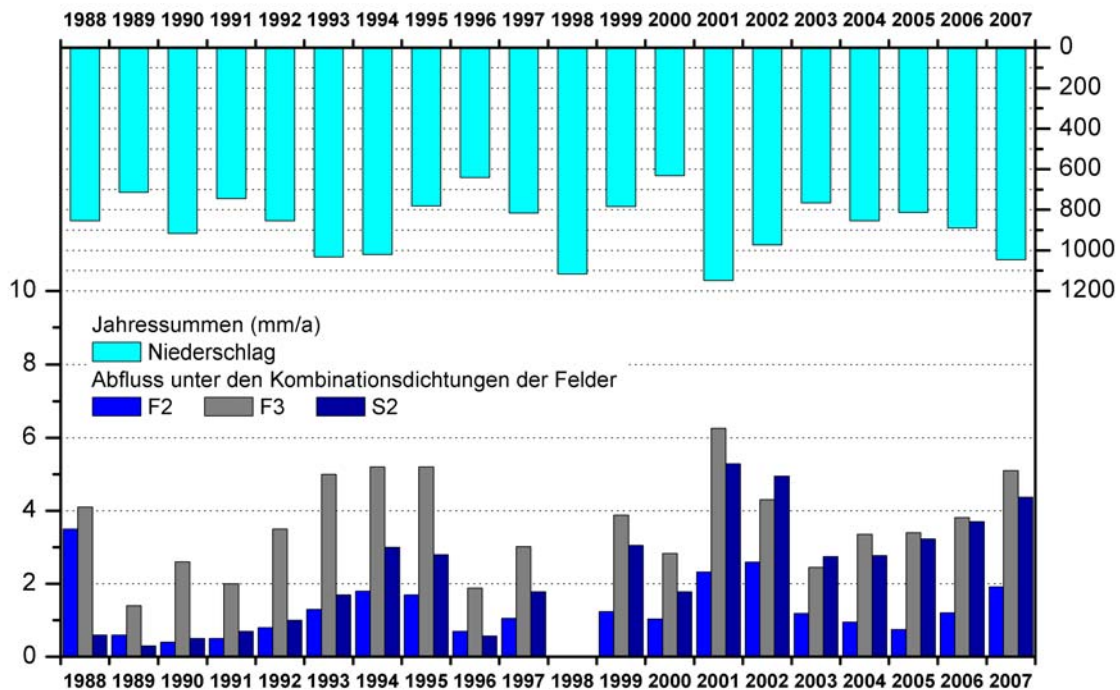


Abbildung 4: Jahressummen des Abflusses aus den Kombinationsdichtungen der Testfelder F2, F3 und S2 auf der Deponie Georgswerder im Zeitraum 1988 – 2005 in mm/a (Kombinationsdichtung aus 1,5 mm KDB über 0,60 m verdichtetem Geschiebemergel; 1998 Messlücke wegen Umrüstung der Messtechnik)

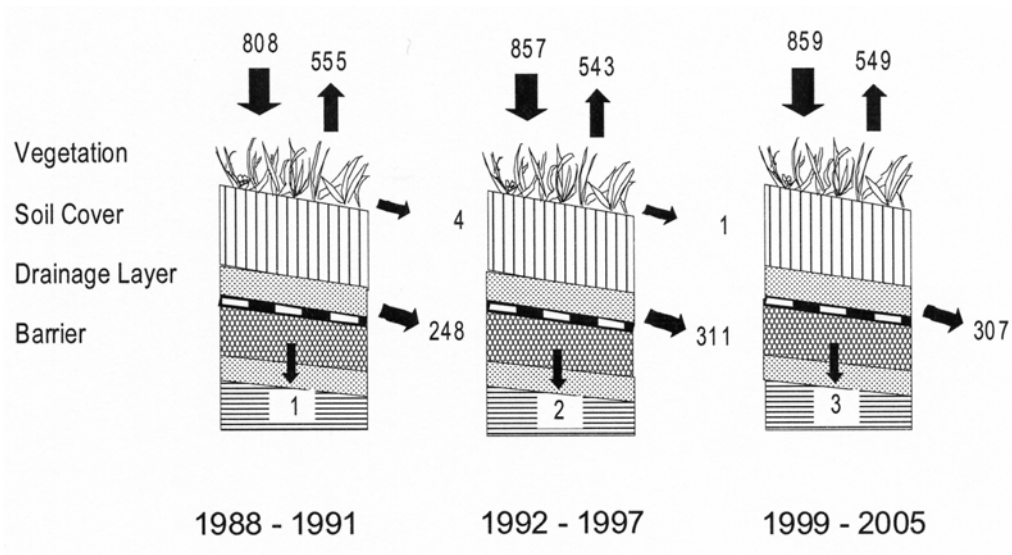


Abbildung 5: Wasserhaushalt der Testfelder mit Kombinationsdichtungen (KDB über Geschiebemergel, Testfelder S2, F2, F3, Flussraten als Mittelwerte in mm/a; 1998 Messlücke wegen Umrüstung der Messtechnik)



## Kapillarsperre

Im Testfeld S3 auf der Deponie Georgswerder wurde erstmals in Deutschland eine Kapillarsperre untersucht. Zur Materialwahl und Dimensionierung von Kapillarschicht und Kapillarblock gab es seinerzeit keinerlei Erfahrungen oder technische Regeln. Kipprinnen zur Eignungsprüfung von Kapillarsperrenmaterialien waren noch nicht bekannt. Als Kapillarblock wurde daher ohne hydrologische Voruntersuchungen der gleiche Kies eingesetzt, der ansonsten in der Testfeldanlage in der Entwässerungsschicht verwandt wurde. Als Kapillarschicht wurde ein sehr gut sortierter Feinsand eingebaut, der standortnah aus einer natürlichen Lagerstätte gewonnen wurde. Um die Kapillarsperre nicht durch zu intensive Zusickerung aus den Deckschichten zu überlasten, wurde auf der Kapillarschicht eine zweilagige Geschiebemergeldichtung eingebaut.

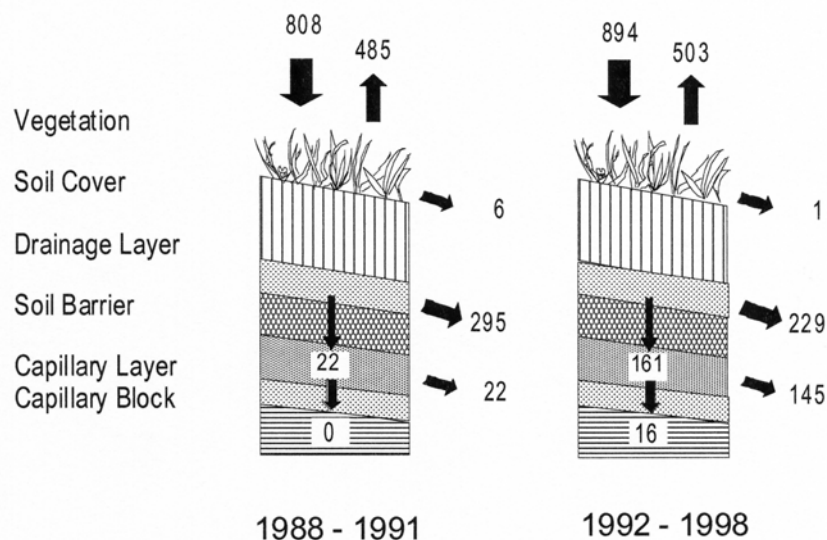


Abbildung 6: Wasserhaushalt des Testfeldes S3 mit Geschiebemergeldichtung über Kapillarsperre vor und nach der Alterung der Geschiebemergeldichtung (Flussraten als Mittelwerte in mm/a)

In den ersten Jahren der Untersuchung funktionierte diese „erweiterte“ Kapillarsperre nahezu perfekt (Abb. 2 und 6). Mit zunehmender Alterung der Geschiebemergeldichtung nahm die Zusickerung in die Kapillarschicht ab 1992 stark zu, so dass erste Durchsickerungsereignisse der Kapillarsperre auftraten. Seither wurden Jahressummen der Durchsickerung von im Mittel 17 mm/a bestimmt. Ohne die Kapillarsperre wäre die Durchsickerung des Systems um fast das Zehnfache höher (im Mittel rund 160 mm/a).

Mit dem Testfeld S3 gelang der erste in Deutschland geführte Nachweis der Funktionsfähigkeit von Kapillarsperren. Dieses gute Ergebnis ist umso erstaunlicher, wenn man rückblickend bedenkt, wie wenig Vorinformation bei der Materialwahl zur Verfügung stand, und wenn man vergleicht, um wieviel leistungsfähiger Kapillarsperren mit Kapillarschichten aus gröberen Sanden sind. Nach heutigem Stand dimensionierte Kapillarsperren haben ein noch wesentlich höheres Wirkungspotential als die im Testfeld S3 untersuchte Materialkombination. Eine im Jahr 1999 durchgeführte Aufgrabung der Kapillarsperre in Testfeld S3 ergab allerdings auch erste Hinweise auf eine Alterung durch Eisenausfällungen in Kapillarschicht und Kapillarblock. 1999 hatten diese Verockerungserscheinungen die hydraulische Leistungsfähigkeit der Kapillarschicht noch nicht eingeschränkt. Eine abschließende Bewertung der Auswirkungen dieser Prozesse ist allerdings noch nicht möglich, da nicht bekannt ist, wie lange solche Verockerungsprozesse anhalten und wann die Nachlieferung von löslichem Eisen erliegt. Leider wird die



Abflussmessung am Testfeld S3 seit 1999 nicht mehr durchgängig betrieben, da eine Kontrolle der Kapillarsperre für die Nachsorge der Deponie nicht relevant ist und eine Forschungsförderung bislang nicht zu erhalten war. Aus diesen Gründen bleibt die Chance, das Langzeitverhalten einer alternden Kapillarsperre zu dokumentieren, bis auf weiteres ungenutzt.

### Bentonitmatten

Bentonitmatten kamen Anfang der 90er Jahre in Deutschland auf den Markt. Da ihre Wirksamkeit auf dem Quellvermögen von Tonmineralen beruht und daher wie bei bindigen mineralischen Dichtungen durch Austrocknung und Schrumpfung gefährdet ist, wurde 1994 beschlossen, ihre Wirksamkeit in zusätzlichen Testfeldern auf der Deponie Georgswerder zu untersuchen. Da zu diesem Zeitpunkt bereits bekannt war, dass die bindigen mineralischen Dichtungen in den bestehenden Testfeldern auch in Tiefen von 1,60 m durch Austrocknung, Durchwurzelung und Schrumpfung geschädigt worden waren, wurde in Abstimmung mit den Herstellern entschieden, die Überdeckung der Bentonitmatten in den neuen Testfeldern deutlich zu reduzieren, um das Langzeitverhalten der Bentonitmatten unter zeitraffenden Bedingungen zu untersuchen. Die Überdeckungsmächtigkeit betrug in den Bentonitmatteentestfeldern daher nur 0,45 m. Es wurde erwartet, dass die Matten nach einer Austrocknung und Schrumpfung schnell wieder quellen und ihre ursprüngliche Dichtwirkung erreichen. Dies war jedoch nicht der Fall.

Abb. 2 zeigt, dass die Durchsickerung der Bentonitmatten innerhalb weniger Jahre auf Werte von rund 200 mm/a zugenommen hat. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Fabrikaten waren gering. Diverse Aufgrabungen und ergänzende Laboruntersuchungen ergaben, dass irreversible Schrumpfrisse für die Zunahme der Durchsickerung verantwortlich waren. Durch nahezu vollständigen Ionenaustausch von Natrium zu Calcium nahm das Quellvermögen des Bentonits stark ab. Durch die Risse stieg die Permittivität der Bentonitmatten gegenüber dem Einbauzustand um 3 bis 4 Zehnerpotenzen von  $7 \cdot 10^{-10}$  bis  $6 \cdot 10^{-9}$  1/s auf Werte zwischen  $2 \cdot 10^{-4}$  bis  $1 \cdot 10^{-5}$  1/s. Eine „Selbsteilung“ der Matten durch Rückquellung und Wiedererlangen ihrer Dichtwirkung konnte im Feld nicht beobachtet werden. Die irreversiblen Schäden wurden nicht nur in einlagig verlegten Bentonitmatten festgestellt. Auch die unteren Lagen der Überlappungsbereiche waren ab 1998 stark geschädigt, unabhängig davon, ob der Zwischenraum zwischen den beiden Mattenlagen durch Bentonitpulver gefüllt war oder nicht.

Die Untersuchungsergebnisse an den Bentonitmatten wurden in [11] bis [15] publiziert.

## **4 Beispiele von anderen Standorten und Entwicklung des Standes der Technik**

### **4.1 Sicherungssysteme für Altlasten**

Zeitgleich zur Sanierung der Deponie Georgswerder wurde in den 80er Jahren die Sanierung anderer ehemaliger Sondermülldeponien in Deutschland geplant und durchgeführt. Anders als in Georgswerder sah die Sanierung der Deponien Malsch in Baden-Württemberg und Gerolsheim in Rheinland-Pfalz zusätzlich zur Oberflächenabdichtung die vertikale Umschließung der Deponien mit Dichtwänden vor. In [21] werden diese Maßnahmen beschrieben. Obwohl auch für diese Maßnahmen erhebliche öffentliche Forschungsmittel eingesetzt wurden und seinerzeit durch den Projektträger ein regelmäßiger Austausch der Ergebnisse der Forschungsvorhaben an den Standorten Georgswerder, Gerolsheim und Malsch initiiert wurde, liegen zu den Sanierungen Malsch und Gerolsheim keine öffentlich zugänglichen Dokumente über den Erfolg der Maßnahmen vor.

Ein ähnlich gelagerter, jedoch gut dokumentierter Sanierungsfall ist die ehemalige Industriemülldeponie Prael in Sprendlingen, Rheinland-Pfalz [23]. Hier wurde eine ehemalige

Lösslehmgrube auf einer Fläche von 10 ha zwischen 1966 und 1979 mit rund 640.000 m<sup>3</sup>, teils hoch mit organischen Schadstoffen belasteten Abfällen verfüllt. Der Standort weist einen kompliziert aufgebauten Untergrund mit einer mächtigen Barriere aus Rupelton auf, die den oberen vom unteren Grundwasserleiter trennt und an ihrer Oberfläche durch Terrassenstrukturen stark pleistozän überformt wurde. Aufgrund erheblicher Verunreinigungen des oberen Grundwasserleiters wurde 1985 bis 1988 ein Sanierungskonzept zur Einkapselung und hydraulischen Sicherung der Deponie aufgestellt und umgesetzt. Die Sanierung bestand aus zwei Teilmaßnahmen. Es wurde eine Oberflächenabdichtung aus einer Rekultivierungsschicht (ca. 0,8 m dick) über einer bentonitvergüteten Lösslehm- und Tondichtung (0,3 m dick) hergestellt. Zusätzlich wurde eine vertikale Dichtwand (teils als Einphasendichtwand mit eingestellter KDB, teils als Zweiphasendichtwand ohne KDB) zur Unterbindung des Grundwasserzustroms und -abstroms gebaut. Innerhalb der Dichtwandumschließung sollte der Wasserstand unter den Grundwasserstand des umgebenden Geländes abgesenkt werden, um die Schadstoffausbreitung durch Einstellen eines inversen Strömungsgradientens zu unterbinden. Dieses Ziel wurde jedoch nicht erreicht, wie die hydraulische Bewirtschaftung des von der Dichtwand umschlossenen Bereichs und die Grundwasserüberwachung außerhalb der Dichtwand in den 90er Jahren zeigte. Eine 1997 durchgeführte Bestandsaufnahme bewies, dass die mineralische Oberflächenabdichtung durch Austrocknung, Durchwurzelung, Schrumpfrissbildung und die Tätigkeit von Regenwürmern unwirksam geworden war [22]. Zusätzliche hydraulische Tests zeigten 2000, dass auch die Dichtwand an einigen Stellen erhöhte Durchlässigkeiten zeigte, wofür mehrere Ursachen vermutet wurden: Eine Unterströmung der Dichtwand infolge unvollständiger Einbindung der Wand in den Rupelton, fehlerhafte Fugen zwischen den Dichtwandlamellen, Risse der Wand sowie eine Alterung der Dichtwandmasse. Andere Bereich der Dichtwand wurden als intakt vermutet.

Da die erste Sanierung der Deponie Prael somit fehlgeschlagen war, musste 2001 bis 2005 auf der Grundlage des Bundesbodenschutzgesetzes [38] eine aufwändige zweite Sanierung durchgeführt werden. Diese zweite Sanierung bestand aus mehreren Maßnahmen (siehe [24]): Rückbau der Deponie auf rund 2,8 ha Fläche, Ertüchtigung der Sickerwasserfassung, Schließen der durch den Rückbau entstandenen, 380 m langen Dichtwandlücke mit einer neuen Zweiphasendichtwand, Herstellung einer neuen Oberflächenabdichtung auf der verbleibenden Deponie (optimierte Rekultivierungsschicht über Entwässerungsschicht über KDB sowie Versiegelung von Betriebsflächen). Die bisher vorliegenden Informationen lassen einen Erfolg dieser zweiten Sanierung erwarten.

Die bauliche Sicherung von Altlasten durch eine vertikale Umschließung ist vergleichsweise selten und erfolgt nur bei sehr brisanten Fällen mit einer akuten Gefahrensituation. Viele Altablagerung erhielten in der Vergangenheit lediglich einfache Bodenabdeckungen. Sofern zur Gefahrenabwehr bauliche Sicherungsmaßnahmen erforderlich sind, werden in der Regel Oberflächenabdichtungssysteme hergestellt. Auf Altstandorten können diese bei entsprechender gewerblicher Nachnutzung als Asphaltabdichtung ausgeführt werden. Meist wird jedoch eine begrünbares Oberflächenabdichtungssystem mit Rekultivierungsschicht, Entwässerungssystem und Kunststoffdichtungsbahn gewählt.

## **4.2 Oberflächenabdichtung von Deponien**

Die an den Testfeldern auf der Deponie Georgswerder gewonnenen Ergebnisse zur Schrumpffähigkeit tonhaltiger Dichtungen wurden in der Fachöffentlichkeit zunächst mit großer Beunruhigung aufgenommen und kritisch hinterfragt. Da sie eine wesentliche Komponente der abfallrechtlichen Regelsysteme der TA Siedlungsabfall in Frage stellten, begannen an zahlreichen Standorten Überlegungen, welche alternativen Systeme möglicherweise besser als langzeitbeständige Oberflächenabdichtung in Frage kämen. An vielen Standorten wurden ähnliche Testfelder wie in Georgswerder zur Untersuchung und

zum Nachweis der Gleichwertigkeit alternativer Oberflächenabdichtungssysteme gebaut. Nicht immer wurden die Testfelder sorgfältig genug konstruiert und hergestellt. Oft wurde der Betrieb eingestellt, bevor Erkenntnisse über das Alterungsverhalten der Dichtungen offenbar wurden. Die Arbeiten [26] bis [31] zeigen einige ausgewählte Beispiele für erfolgreiche Langzeitstudien an Testfeldern.

Zeitgleich zur Verabschiedung der TA Abfall und der TA Siedlungsabfall wurde durch den Bund zudem ein großes Verbundforschungsvorhaben zur Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen aufgelegt [25], in dem u.a. auch Grundlagenforschung zur Kapillarsperre durchgeführt wurde. Bereits der zusammenfassende Schlussbericht der BAM zum Verbundforschungsvorhaben Deponieabdichtungssysteme [25] bestätigte die Ergebnisse aus den Testfeldern Georgswerder, die jedoch erst rund zehn Jahre nach ihrer ersten Veröffentlichung allgemein akzeptiert wurden, nachdem sich Veröffentlichungen häuften, die von ähnlichen Problemen mit tonhaltigen mineralischen Abdichtungen an anderen Standorten berichteten. [32] dokumentiert Rissbildungen und bevorzugte Versickerungswege in tonhaltigen Oberflächenabdichtungen auf der Deponie Gallenbach in Bayern, [33] enthält vergleichbare Beispiele aus den USA. 2002 wurde schließlich in der Regie der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) ein Status-Workshop „Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen“ durchgeführt. Der Tagungsband [34] dokumentiert den Stand des Wissens aus diversen Feld- und Laborversuchen sowie zur numerischen Simulation der Austrocknungs- und Schrumpfgefährdung von tonhaltigen Dichtungen. Noch immer existiert jedoch kein allgemein akzeptiertes Nachweisverfahren zur Prüfung der Schrumpfgefährdung von tonhaltigen Oberflächenabdichtungen, auf dessen Grundlage der erforderliche Schutz derartiger Dichtungen standortbezogen untersucht und dimensioniert werden könnte.

2006 folgte ein weiterer Status-Workshop der DGGT, in dem der aktuelle Kenntnisstand zu unterschiedlichen alternativen Oberflächenabdichtungssystemen (u.a. modifizierte mineralische Abdichtungen, Bentonitmatten und Kapillarsperren) präsentiert und diskutiert wurde [35]. In den einzelnen Beiträgen dieser Veranstaltung wird auch die Langzeitbeständigkeit der verschiedenen Abdichtungssysteme bewertet.

Die umfangreiche Forschung zu alternativen Dichtungen hat eine Fülle von neuen Konzepten und technischen Lösungen hervorgebracht, die im Zusammenwirken mit oder alternativ zur KDB eingesetzt werden können: Kapillarsperren, Kombikapillardichtung, Bentonitmatten, gemischtkörnige technische Mischungen wie Bentokies, auf dem trockenen Ast der Proctorkurve eingebaute tonhaltige Dichtungen, wasserglasvergütete Dichtungen, Trisoplast, Dichtungen aus METHA-Material, Dichtungen aus Asphaltbeton. Außerdem wurde erkannt, dass nicht nur die Abdichtungskomponenten selbst und deren Tragschichten, sondern der gesamte Aufbau des Oberflächenabdichtungssystems einschließlich Entwässerungsschicht, Rekultivierungsschicht und Bewuchs die Wirksamkeit und die Beständigkeit des Systems bestimmen. Beide Schichten müssen die ggf. empfindlichen tieferen Schichten des Systems vor Durchwurzelung, Austrocknung oder hydraulischer Überlastung schützen. An niederschlagsarmen Standorten kann bereits eine Rekultivierungsschicht mit einer hohen Speicherfähigkeit für pflanzenverfügbares Wasser in Verbindung mit einem stark wasserverbrauchenden Gehölzbewuchs (System Wasserhaushaltsschicht) eine langfristig abdichtende Wirkung im Sinne sehr geringer Sickerwasserbildungsraten bewirken.

Der Qualitätsstandard für Kunststoffdichtungsbahnen wird durch die Zulassungen der BAM definiert [40]. Es dürfen nur Kunststoffdichtungsbahnen aus geeigneten PEHD-Formmassen mit einer Dicke von 2,5 mm durch zugelassene Fachfirmen verlegt und qualitätsüberwacht werden. Die Fachöffentlichkeit geht heute davon aus, dass eine einwandfrei verlegte KDB ihre Funktion über Zeiträume von deutlich über 100 Jahren erfüllt, bevor die oxidative Alterung zu Versprödungen und einer nachlassenden Dichtwirkung führt. Nach wie vor ist die

KDB vor allem bei ihrer Verlegung mechanisch empfindlich. Sie kann durch geoelektrische Dichtungskontrollsysteme überwacht werden.

Mit der Zulassung mineralischer Dichtungen hat sich in den 90er Jahren auf der Grundlage des Baurechts das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) befasst und hierzu Grundsätze und einige Zulassungen verabschiedet, die mittlerweile ausgelaufen sind. 2000 bis 2002 und wieder seit 2005 befasst sich die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) mit der Eignungsbeurteilung mineralischer Abdichtungskomponenten. Die LAGA hat die DIBt-Grundsätze fortgeschrieben [41] und 2009 einige Eignungsbeurteilungen zu Trisoplast, Dichtungen aus METHA-Material, zur Kombikapillardichtung und zu Bentonitmatten, veröffentlicht. Nach den LAGA-Grundsätzen werden neben der Dichtigkeit und Herstellbarkeit auch die mechanische Widerstandsfähigkeit und die Beständigkeit der Abdichtungskomponenten geprüft und bewertet. Die mineralischen Abdichtungskomponenten müssen nach LAGA dauerhaft standsicher und ausreichend verformbar sein und eine Beständigkeit von weit über 100 Jahren haben. Die Beständigkeit ist gegen Einwirkungen durch aggressives Niederschlagswasser (pH 4 bis 11 mit gelösten Salzen, Ionenaustausch, Verockerung), Mikroorganismen und Pilze, Pflanzenwurzeln, Wassergehaltsänderungen (Vernässung, Austrocknung und Schrumpfung) und Deponiegas zu prüfen. Die bisher veröffentlichten Eignungsbeurteilungen der LAGA [41] definieren je nach Empfindlichkeit der geprüften Komponenten unterschiedliche Schutzmaßnahmen, z.B. erhöhte Mindestmächtigkeiten der Rekultivierungsschicht zwischen 1,3 m bis 1,5 m. Erstaunlicherweise wurden diese zusätzlichen Schutzmaßnahmen nur für die Anwendungen formuliert, bei denen die mineralische Abdichtungskomponente nicht durch eine KDB bedeckt und geschützt wird, woraus man im Umkehrschluss schließen könnte, dass die mineralische Komponente nicht länger beständig sein muss als die bedeckende KDB.

2009 wurde schließlich eine neue Deponieverordnung [39] verabschiedet. Die alten Regelaufbauten der Oberflächenabdichtung nach TA Siedlungsabfall sind in der neuen DepV nicht mehr enthalten. Für die Deponieklasse I wird weiterhin eine Abdichtungskomponente gefordert, die jedoch als KDB oder als mineralische Abdichtung genehmigungsfähig sein kann. Für Deponien der Klassen II und III werden zwei Abdichtungskomponenten gefordert, die sich in ihrer Wirkungsweise ergänzen müssen. Abdichtungskomponenten aus Kunststoff müssen durch die BAM zugelassen sein. Mineralische Abdichtungskomponenten müssen in ihrem Qualitätsstandard bundeseinheitlich anerkannt sein. Der Nachweis dieses Qualitätsstandards kann durch eine positive Eignungsbeurteilung der LAGA geführt werden, so dass in diesem Schritt auch die grundsätzliche Langzeitbeständigkeit der Abdichtungskomponente zu prüfen ist. Diese hängt bei mineralischen Abdichtungskomponenten jedoch weiterhin sehr viel stärker als bei der KDB von den im Einzelfall gegebenen Einwirkungen auf die Abdichtung ab (klimatische Randbedingungen, Wurzelentwicklung des Bewuchses, Trockenstress, Bodenbiologie, Lösung von Salzen und Ionen aus der Rekultivierungsschicht und deren Einwirkung auf das Quellverhalten von Tonen oder die Verockerung von Kapillarsperren). Es ist daher nach wie vor kaum möglich, die tatsächliche Beständigkeit solcher Abdichtungskomponenten quantitativ zu bemessen. Nachhaltige Konzepte versuchen daher zur langfristigen Sicherung von Deponien und Altlasten die abdichtende Wirkung technischer Komponenten (z.B. der KDB) mit natürlichen Prozessen (z.B. Wasserspeicherung und Verdunstung durch Rekultivierungsboden und Bewuchs) zu verbinden.

## **5 Zwischenfazit und Ausblick**

Die Untersuchungen in den Testfeldern auf der Deponie Georgswerder haben den Kenntnisstand zur Langzeitbeständigkeit unterschiedlicher Abdichtungen erweitert.

In den Testfeldern F1, S1, S3, B1 und B2 wurde erstmals die Gefährdung von bindigen mineralischen Dichtungen und Bentonitmatten durch Schrumfrissbildung infolge

Austrocknung, Durchwurzelung und Ionenaustausch nachgewiesen und systematisch dokumentiert. Ebenfalls erstmalig untersucht wurde die Fragestellung des Einflusses der temperaturabhängigen Wasserbewegung in der Kombinationsdichtung auf die langfristige Dichtigkeit der mineralischen Komponente (Testfelder S2, F2 und F3 sowie Sonderversuche [9]). Das Testfeld S3 enthält die erste in Deutschland gebaute Kapillarsperre.

Die Wirksamkeit der untersuchten bindigen mineralischen Dichtungen (aus Geschiebemergel) und Bentonitmatten hat in wenigen Jahren sehr stark nachgelassen, wobei die Bentonitmatten unter geringerer Überdeckungsmächtigkeit untersucht wurden als Dichtungen aus Geschiebemergel. Nach dieser Alterungsphase lag die Jahresdurchsickerung je nach Witterungsverlauf zwischen 90 und 220 mm/a. Fast die Hälfte des Wassers, das im Jahresverlauf die Entwässerungsschicht erreicht, sickert im Durchschnitt durch die geschädigten Dichtungen (in einzelnen Jahren bis zu 80 %). Eine „Selbsteilung“ der durch Risse geschädigten Dichtungen war nicht festzustellen. Auch die doppelagigen Bereiche der Bentonitmatten waren durch Schrumpfrisse geschädigt.

Die Kombinationsdichtungen zeigen demgegenüber auch nach 18 Jahren den erwarteten hohen Wirkungsgrad, es werden im Mittel nur rund 2 mm/a unter den Dichtungen als Abfluss aufgefangen.

Rückwirkend hat es sich als eine äußerst kluge Entscheidung erwiesen, dass man sich 1985 bei der Konzeption der Oberflächenabdichtung der Deponie Georgswerder nicht allein auf die tonhaltige mineralische Dichtung, sondern zusätzlich auf die damals bescheiden als Wurzel- und Nagetiersperre bezeichnete KDB verlassen hat. Die KDB hat sich als wirksame und bis heute beständige Dichtung bewährt. Sie schützt nebenbei auch die Geschiebemergeldichtung vor Pflanzenwurzeln. Diese Vorsicht hat sich gelohnt. Hätte man vor 25 Jahren aus Kostengründen auf eine der beiden Dichtungskomponenten verzichten müssen, wäre dies zum damaligen Kenntnisstand mit hoher Wahrscheinlichkeit die KDB gewesen mit der Folge, dass das auf den Testfeldern S1 und F1 festgestellte Versagen der ungeschützten Geschiebemergeldichtung großflächig zu beklagen gewesen wäre. An anderen Standorten wurde der Verzicht auf eine KDB teuer mit einer zweiten Sanierung bezahlt.

Es bleibt abzuwarten und zu überwachen, wie sich das Oberflächenabdichtungssystem der Deponie Georgswerder weiterhin, insbesondere auch im Zuge der geplanten baulichen Umgestaltung und geänderten Nutzung der Deponieoberfläche bewährt.

## Literatur

### Sanierung der Deponie Georgswerder samt Eigenkontrolle

- [1] Wolf, K. & M. Zarth (1989): Die Deponie Hamburg-Georgswerder: Entstehung, Umweltgefahren, Sanierung. In: Wasser + Boden, 9, 512-515
- [2] Klenner, P., V. Sokollek & H. Zickermann (1989): Oberflächenabdichtung der Deponie Georgswerder. In: Wasser + Boden, 9, 515-521
- [3] Freie und Hansestadt Hamburg, Umweltbehörde (1995): Deponie Georgswerder. Sanierung 1984 – 95. Eigenverlag, 76 S.
- [4] Melchior, S., K. Berger, B. Vielhaber & G. Miehlich (1994): Die Wirksamkeit unterschiedlicher Oberflächenabdichtungssysteme auf der Deponie Georgswerder. In: Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bundesumweltministerium (BMU) & Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.): Sicherung von Altisiten. Erfahrungen und Empfehlungen. 183-192
- [5] Schnittger, P. (1997): Sanierung der Deponie Georgswerder in Hamburg. In: Franzius, V., K. Wolf, (Hrsg.): Handbuch der Altlastensanierung. Beitrag 9200.06.04. Verlag C.F. Müller, Heidelberg, 29 S.

- [6] Sokollek, V. (2010): Nachsorge der Deponie Georgswerder: Erfahrungen aus der Eigenkontrolle. In: Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (Hrsg.): 25 Jahre Sanierung der Deponie Georgswerder. Umgang mit baulich gesicherten Altlasten – Erkenntnisse und Perspektiven.

#### Forschungsergebnisse Testfelderprojekt Deponie Georgswerder

- [7] Bundesministerium für Forschung und Technologie, Umweltbundesamt (Hrsg.) (1994): Verbundvorhaben: Neue Verfahren und Methoden zur Sanierung von Altlasten am Beispiel der Deponie Georgswerder. Förderkennzeichen 1440359 I. Schlussbericht 309 S.
- [8] Melchior, S. (1993): Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundl. Arb., 22, 330 S. + Anhang.
- [9] Vielhaber, B. (1995): Temperaturabhängiger Wassertransport in Deponieoberflächenabdichtungen. Feldversuche in bindigen mineralischen Dichtungen unter Kunststoffdichtungsbahn. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 29, 200 S. + Anhang
- [10] Melchior, S. & G. Miehlich (1996) (Projektleitung): Entwicklung und Bewertung alternativer Abdecksysteme für Altlasten. Forschungsbericht des Instituts für Bodenkunde der Universität Hamburg im Auftrag der Umweltbehörde Hamburg und der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Kurzübersicht mit 12 Teilberichten in 2 Bänden, bearbeitet durch S. Melchior, B. Vielhaber, K. Berger, O. Flöter, A. Steimle & W. Zieler, Hamburg, 1217 S.
- [11] Melchior, S. (1998): Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben am Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg von 1986 bis 1997. Zusammenfassung der Habilitationsleistungen für das Fachgebiet Bodenkunde. 2 Bände mit 132 S. und 15 Anlagen.
- [12] Melchior, S. (1996): Die Austrocknungsgefährdung von bindigen mineralischen Dichtungen und Bentonitmatten in der Oberflächenabdichtung - Ergebnisse von mehrjährigen In-Situ-Versuchen und Aufgrabungen auf der Altdeponie Hamburg-Georgswerder. In: Maier-Harth, U. (Hrsg.): Geologische Barriere, Basisabdichtung, Oberflächenabdichtung - Möglichkeiten zur standortbezogenen Optimierung. 3. Deponie-Seminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz am 30. Mai 1996 in Bingen-Büdesheim/Rhein. Selbstverlag, Mainz, 40 S.
- [13] Melchior, S. (1997): In-situ Studies on the Performance of Landfill Caps (Compacted Soil Liners, Geomembranes, Geosynthetic Clay Liners, Capillary Barriers). In: Land Contamination & Reclamation, 5, 3, 209-216.
- [14] Melchior, S. (1999): Bentonitmatten als Elemente von Oberflächenabdichtungssystemen. In: Süddeutsches Kunststoff-Zentrum (Hrsg.): Die sichere Deponie. 15 Fachtagung 18./19.02.1999 in Würzburg, 34. S.
- [15] Melchior, S. (2002): Field studies and excavations of geosynthetic clay barriers in landfill covers. In: Zanzinger, H., R. M. Koerner & E. Gartung (Hrsg.): Clay Geosynthetic Barriers, A.A. Balkema Publ., Lisse, Abingdon, Exton (PA), Tokyo, p. 321- 330.
- [16] Melchior, S., Berger, K., B. Vielhaber & G. Miehlich (2002): Großlysimeter Deponie Hamburg-Georgswerder: Wasserhaushalt und Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungssystemen mit bindigen mineralischen Abdichtungen. In:

- Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (Hrsg.): Status-Workshop „Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen“ an der Fachhochschule Lippe und Höxter, 18 S.
- [17] Vielhaber, B., S. Melchior & G. Miehlich (2002): Felduntersuchungen zur temperaturinduzierten Austrocknungsgefährdung einer Kombinationsabdichtung im Oberflächenabdichtungssystem der Deponie Hamburg-Georgswerder. In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (Hrsg.): Status-Workshop "Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen" an der Fachhochschule Lippe und Höxter, 12 S.
- [18] Melchior, S. & B. Vielhaber (2002): Aufgrabungen von bindigen mineralischen Oberflächenabdichtungen mit und ohne Entwässerungsschicht. In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (Hrsg.): Status-Workshop "Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen" an der Fachhochschule Lippe und Höxter, 10 S.
- [19] Melchior, S., V. Sokollek, K. Berger & B. Steinert (2007): Achtzehn Jahre Testfelderuntersuchungen auf der Deponie Hamburg / Georgswerder. In: Kilchert, M. & Hegewald (Hrsg.): 3. Leipziger Deponiefachtagung. Stilllegung, Sicherung und Nachsorge von Deponien. Beitrag B10. Leipzig, 17 S.
- [20] Melchior, S., V. Sokollek, K. Berger, B. Vielhaber & B. Steinert (2010): Results from 18 years of in-situ performance testing of landfill cover systems in Germany. Journal of Environmental Engineering, im Druck

#### Ergebnisse zur Beständigkeit von Sicherungsmaßnahmen an anderen Standorten

- [21] Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg, (Hrsg.) (1995): Sicherung von Altlasten durch Schmal- und Schlitzwände. Handbuch für Altlasten und Grundwasserschadensfälle, 229 S.
- [22] Maier-Harth, U. & S. Melchior (2002): Überprüfung der Wirksamkeit mineralischen Oberflächenabdichtung der ehemaligen Industriemülldeponie Prael in Sprendlingen, Kreis Mainz-Bingen. In: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (Hrsg.): Status-Workshop "Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen" an der Fachhochschule Lippe und Höxter, 12 S.
- [23] Land Rheinland-Pfalz, Ministerium für Umwelt und Forsten (Hrsg.) (2003): Ehemalige Industriemülldeponie Prael, Sprendlingen. Erneuerung und Optimierung der Sicherungsbauwerke. Eigenverlag, 46 S.
- [24] Melchior, S. R. Schicketanz, W. Friedrich & S. Lahham (2007): Bestandsaufnahme und Ertüchtigung der eIMD Prael/Sprendlingen, Rheinland-Pfalz. In: ITVA (Hrsg.): Altlastensymposium 2007 in Erfurt, 64 - 125
- [25] Bundesministerium für Forschung und Technologie, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Hrsg.) (1997): Verbundvorhaben: Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen. Förderkennzeichen 1440569 A und I. Schlussbericht 482 S.
- [26] Tresselt, K. (2000): Feldversuche zur Wirksamkeit von Oberflächenabdichtungssystemen mit Dichtungen aus Hafenschlick. Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften, Universität Hamburg. Hamburger Bodenkundl. Arbeiten 46, 280 S. + Anhang
- [27] Wolsfeld, N. (2005): Bodenphysikalische Eignung mineralischer Oberflächenabdichtungssysteme für Monodeponien der Stahlindustrie. Dissertation Universität Freiburg. Freiburger Bodenkundliche Arbeiten, Heft 43, 159 S. + Anhang.



- [28] Melchior, S., B. Steinert, R. Rettig & S. Raabe (2006): Zwischenergebnisse der Versuchsfelder der MEAB zu alternativen Oberflächenabdichtungssystemen auf der Deponie Deetz. In: Henken-Mellies, U. (Hrsg.): 17. Nürnberger Deponieseminar. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Nürnberg, Heft 85, S. 105-128
- [29] Melchior, S., Raabe, S., Krüger, D. B. Steinert (2007): Erfahrungen mit dem System Wasserhaushaltsschicht zur Oberflächenabdichtung von Deponien am Beispiel der Versuchsfelder auf der Deponie Deetz. In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 3. Symposium Umweltgeotechnik 2007. Schriftenreihe Geotechnik Heft 17, S. 101 - 110.
- [30] Melchior, S., B. Steinert & S. Raabe (2010): Ergebnisse ausgewählter Oberflächenabdichtungssysteme der Versuchsfelder der MEAB auf der Deponie Deetz In: Henken-Mellies, U. (Hrsg.): 21. Nürnberger Deponieseminar Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Nürnberg, Heft 89, S. 103- 116
- [31] Nydegger, R. (2010): Die Kapillarsperre - 10 Jahre Messresultate bei zwei Testfeldern auf der Deponie Heinersgrund. In: Henken-Mellies, U. (Hrsg.): 21. Nürnberger Deponieseminar Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Nürnberg, Heft 89, S. 69 - 80
- [32] Huber, W. (2001): Sickerwasseranfall bei mineralischen Oberflächenabdichtungen unter dem Gesichtspunkt der Nachsorge. In: Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): Bayerische Abfall- und Deponietage, 13 S.
- [33] Albright, W.H., Benson, C.H., Gee, G.W., Roesler, A.C., Abichou, T., Apiwantragoon, P., Lyles, B.F. & S. A. Rock (2004): Field Water Balance of Landfill Final Covers Journal of Environmental Quality, 33, 2317–2332
- [34] Ramke, H.-G., E. Gartung, G. Heibroock, W. Lükewille, S. Melchior, B. Vielhaber, K. Bohne, U. Maier-Harth & K.-J. Witt (Hrsg) (2002): Status-Workshop "Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen". Status-Workshop. Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 3, 474 S.
- [35] Ramke, H.-G., K.-J. Witt, W. Bräcker & M. Tiedt (Hrsg.) (2006): Anforderungen an Deponieoberflächenabdichtungssysteme. Status-Workshop. Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 6, 362 S.

#### Gesetze, Verordnungen und bundeseinheitliche Qualitätsstandards

- [36] TA Abfall, 1991: Gesamtfassung der Zweiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/ physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. Bonn 12. März 1991. Gemeinsames Ministerialblatt, 42. Jg., Nr. 8, S. 139-214,
- [37] TA Siedlungsabfall, 1993: Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Vermeidung, Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen. Bundesanzeiger 99a, 14. Mai 1993
- [38] BBodSchG - Bundes-Bodenschutzgesetz (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten vom 17. März 1998 . BGBl. I S. 502, zuletzt geändert durch Art. 3 G v. 9.12.2004, BGBl. I 3214
- [39] DepV - Deponieverordnung (2009): Verordnung über Deponien und Langzeitlager. (= Artikel 1 der Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts vom 27.04.2009). BGBl. I, Nr. 22, S. 900
- [40] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (2010): Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen für Deponieabdichtungen. Herausgegeben von der

Arbeitsgruppe „Kunststoffe in der Geo- und Umwelttechnik“ der Fachgruppe IV.3. 3. überarbeitete Auflage vom März 2010. Berlin, 33 S.

- [41] LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ (2005): Allgemeine Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme. 19.04.2005, 23 S. (Veröffentlicht im Internet auf [www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de](http://www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de); siehe dort auch die gültigen Eignungsbeurteilungen der LAGA).

Anschrift des Verfassers:

Dr. habil. Stefan Melchior  
melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft  
Karolinenstraße 6  
20357 Hamburg

[www.mplusw.de](http://www.mplusw.de)