

Vom Durchlässigkeitsbeiwert zur Systemwirksamkeit

– Langzeiterfahrungen mit mineralischen Deponieabdichtungen –

Dr.-Ing. Ernst Reuter

Zusammenfassung

Die Beschreibung und Beurteilung der Durchlässigkeitseigenschaften mineralischer Dichtungskomponenten im abfallrechtlichen Vollzug stützt sich auch heute noch vorrangig auf die Bestimmung von Labor-Durchlässigkeitsbeiwerten. Die dokumentierten Felduntersuchungen belegen jedoch, dass gute Laborergebnisse nicht automatisch zu einer entsprechend guten und dauerhaften Wirksamkeit im Feld führen, wenn nur die Mindestanforderungen der TASI/ Deponieverordnung bezüglich des Schichtenaufbaus des Oberflächenabdichtungssystem (OAS) eingehalten werden. Demzufolge kann der Labor-Durchlässigkeitsbeiwert lediglich als Indexwert zur Beurteilung des stationären hydraulischen Leistungsvermögens einer mineralischen Dichtungskomponente unter optimalen Randbedingungen herangezogen werden.

Die komplexen Einwirkungen, denen mineralische Dichtungskomponenten im OAS in der Realität unterliegen, haben häufig ein instationäres Durchlässigkeitsverhalten zur Folge. Im Sinne einer bestmöglichen Prognose sollte dieses Durchlässigkeitsverhalten standort- und systemspezifisch durch ausreichend langjährig dokumentierte Messdaten aus Lysimeteruntersuchungen beschrieben werden. Beispielhaft wird die Wirksamkeitsanalyse als eine aussagekräftige Vorgehensweise zur Beurteilung des gesamten OAS und der Funktionsschichten bei ausgeprägt instationärem Durchlässigkeitsverhalten vorgestellt.

Hinweis: Der Beitrag steht farbige zum download unter www.iwa-minden.de zur Verfügung!

1. Einleitung

Die Wasserdurchlässigkeit von Böden wird in der Geotechnik durch den Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s] auf der Grundlage des DARCY-schen Gesetzes (Gl.1) angegeben.

$$v = k \cdot i \text{ [m/s]} \quad (\text{Gl. 1})$$

Der hydraulische Gradient i [-] beschreibt dabei die Potentialdifferenz der Wasserstände zwischen Probeneinlauf- und Auslaufseite dividiert durch den Fließweg. Der Durchlässigkeitsbeiwert k errechnet sich im Laborversuch bei den gewählten Probenabmessungen A und dem hydraulischen Gradienten i aus den Messgrößen Wassermenge Q und Zeit t unter Ansatz der Kontinuitätsbedingung (Gl.2).

$$Q = A \cdot v \cdot t = A \cdot k \cdot i \cdot t \text{ [m}^3\text{]} \quad (\text{Gl. 2})$$

Versuchsmethodik und Randbedingungen zur Bestimmung des k -Wertes sind in DIN 18130 definiert. Gängige Praxis ist die Versuchsdurchführung bei voller Wassersättigung der Probe und einem hydraulischen Gradienten $i = 30$. Unter der Annahme einer vollständigen Wassersättigung ohne Überstau beträgt der hydraulische Gradient einer benetzten 0,5 m

dicken mineralischen Abdichtung in der Praxis dagegen nur $i = 1$, bei Volleinstau einer 0,3 m dicken Entwässerungsschicht steigt der Gradient auf $i = 1,6$. Die nach TASI/Deponieverordnung (DepV) theoretisch zulässige Durchsickerung einer lediglich benetzten mineralischen Dichtung (DK I/DK II) errechnet sich nach Gleichung 2 bei $i = 1$ zu ca. 158 mm/Jahr!

Obwohl das DARCY-sche Gesetz als empirische Beziehung in Laborversuchen an Sandproben ermittelt worden ist, wird es in der Praxis auch auf feinkörnige Böden übertragen. Der Durchlässigkeitsbeiwert k gilt in der Definition des DARCY-schen Gesetzes jedoch nur bei laminarer Strömung; unterhalb des für eine laminare Strömung erforderlichen hydraulischen Gradienten wird bei feinkörnigen Böden vielfach die Existenz eines sogenannten „Stagnationsgradienten“ i_0 angenommen, bei dessen Unterschreitung Fließvorgänge in Porensystemen aufgrund von Molekularkräften zum Stillstand kommen (Bild 1).

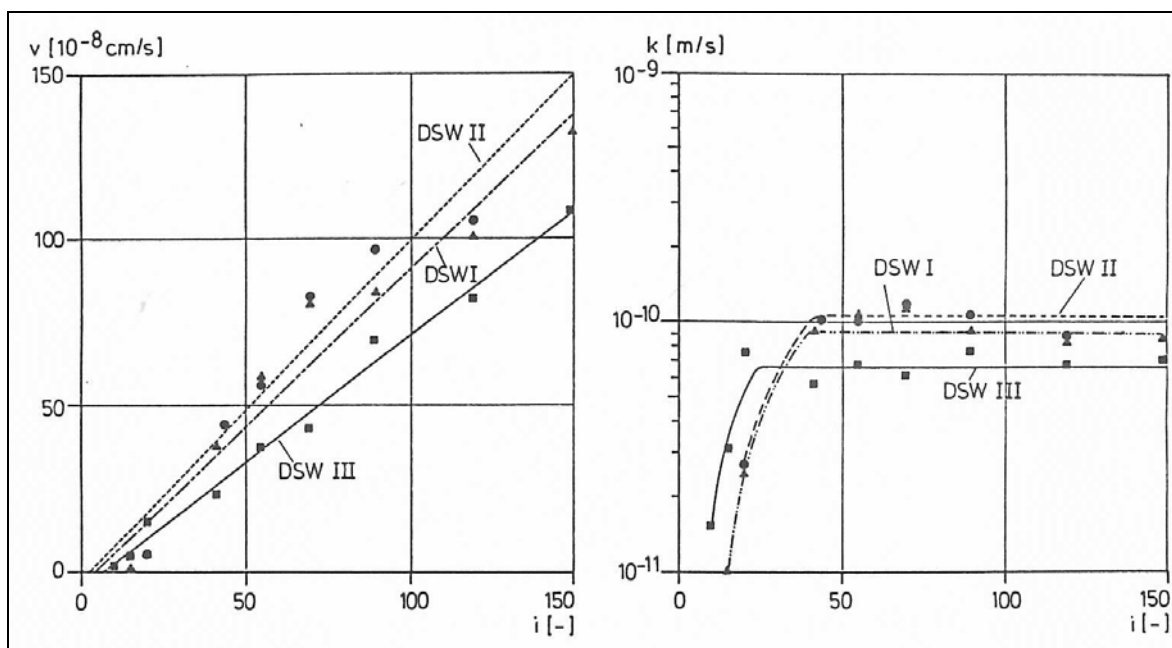


Bild 1: Einfluss des hydraulischen Gradienten i auf Filtergeschwindigkeit und k -Wert bei einem ausgeprägt plastischen Ton unter Verwendung verschiedener Prüflüssigkeiten [1]

Im Hinblick auf die Übertragbarkeit der Labordurchlässigkeit einer mineralischen Dichtungskomponente auf die Systemdurchlässigkeit im Feld ist neben den hydraulischen Randbedingungen der Wasserhaushalt in der mineralischen Dichtung und den umgebenden Bodenschichten von besonderer Bedeutung. Es bedarf keiner weiteren Erläuterungen, dass der Wasserhaushalt in einem solchen Schichtsystem komplexen Einwirkungen unterliegt und insbesondere von den Wechselwirkungen zwischen Niederschlag und Evapotranspiration in der Rekultivierungsschicht bestimmt wird. Typischer Weise kommt es in einem Oberflächenabdichtungssystem unter unseren nord- und mitteldeutschen Klimaverhältnissen während eines Jahres immer auch zu sogenannten „dränabflussfreien“ Tagen; damit sind die Tage gemeint, an denen die Evapotranspiration und das Wasserspeichervermögen (ggf. auch der Oberflächenabfluss) größer sind als der Niederschlag (Bild 2). Die Folge ist, dass keine Dränspende aus der Rekultivierungsschicht absickert und demzufolge auch keine Durchsickerung der Dichtung stattfinden kann. Aus diesen Gründen (Hydraulischer Gradient

im Bereich des Stagnationsgradienten und keine ständige Benetzung/Aufstau der Dichtung) wird die oben berechnete, maximale theoretische Durchsickerung in der Praxis bei weitem nicht erreicht. Wasserhaushaltsmodellierungen, die hierzu verstärkt in den neunziger Jahren eingesetzt wurden, lassen bei durchschnittliche Klimaverhältnissen und Umsetzung des TAsi/DepV-Mindeststandards eine Sickerwasserneubildung von näherungsweise 5 bis 10 % des Niederschlags (entsprechend ca. 40 bis 80 mm/Jahr) bei $k = \text{konstant} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ erwarten.

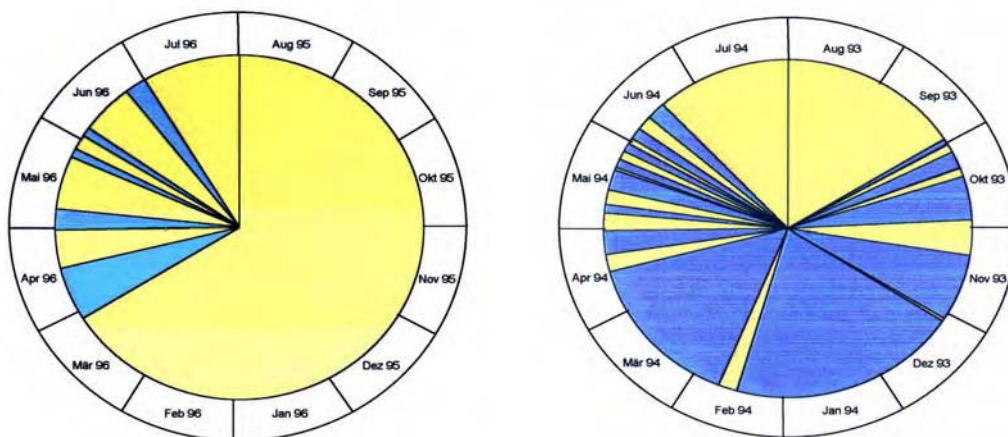


Bild 2: Beispielhafte jahreszeitliche Verteilung von Dränspenden (blau) und dränabflussfreien Zeiten (gelb), Wasserhaushaltsmodellierung für ein extremes Trockenjahr (links) und durchschnittliche Verhältnisse (rechts) für ein OAS mit TAsi-Mindeststandard

Bei längerer Dauer ohne Dränspende ergeben sich jedoch Trockenstressbedingungen für jede mineralische Abdichtungskomponente. Dies führt zu einem Anstieg der Wasserspannungen und gegebenenfalls zu Rissbildungen. Einhergehend mit dem Rissbildungen vergrößert sich der durchflusswirksame Porenraum, was wiederum eine Erhöhung des Durchlässigkeitsbeiwertes nach sich zieht. Ursache und Beginn der Rissbildung bindiger Böden wurden bereits vor ca. 50 Jahren u.a. von [2] wissenschaftlich untersucht und beschrieben. Demzufolge entscheidet die Zusammensetzung des mineralischen Dichtungsbaustoffes, insbesondere sein Feinkorngehalt, dessen mineralogische Zusammensetzung und die Einbaubedingungen der Abdichtungsschicht maßgeblich darüber, wie sensibel eine solche Schicht später mit Rissbildung auf Veränderungen des Wasserhaushaltes reagiert.

Während im 2. Entwurf zur Neuen Integrierten Deponieverordnung vom Oktober 2007 (IntDepV) in Bezug auf die konventionelle mineralische (Ton)Dichtung weiterhin an der Forderung nach $k \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ (ermittelt bei Normbedingungen) festgehalten wird, ist daneben die neue Anforderung einer maximalen Sickerwasserneubildung von maximal 20 mm/Jahr für alle mineralischen Komponenten enthalten, „deren Wirksamkeit nicht mit Durchlässigkeitsbeiwerten beschrieben werden kann“. Losgelöst von der Diskussion, warum sich alternative Materialien an strengeren Vorgaben messen lassen müssen als die (Ton)Dichtung stellt sich auch in Bezug auf die konventionelle (Ton)Dichtung die Frage, ob der labortechnisch unter unrealistischen Randbedingungen ermittelte

Durchlässigkeitsbeiwert k ein hinreichender Kennwert ist, um die langfristige Wirksamkeit in der Realität zuverlässig beschreiben zu können und gegebenenfalls die potentielle Sickerwasserbildung im Deponiekörper prognostizieren zu können. Hierzu wird nachfolgend auf beispielhafte Untersuchungen der vergangenen 10 Jahre verwiesen.

2. Felduntersuchungen

2.1 Mineralische Dichtung Hamburg - Georgswerder

In [3] sind unter anderem Ergebnisse zur langzeitigen Durchlässigkeit von Geschiebemergeldichtungen dokumentiert, die Bestandteil unterschiedlicher Abdichtungssysteme auf der Oberflächenabdichtung der Deponie Hamburg-Georgswerder sind (Bild 3).

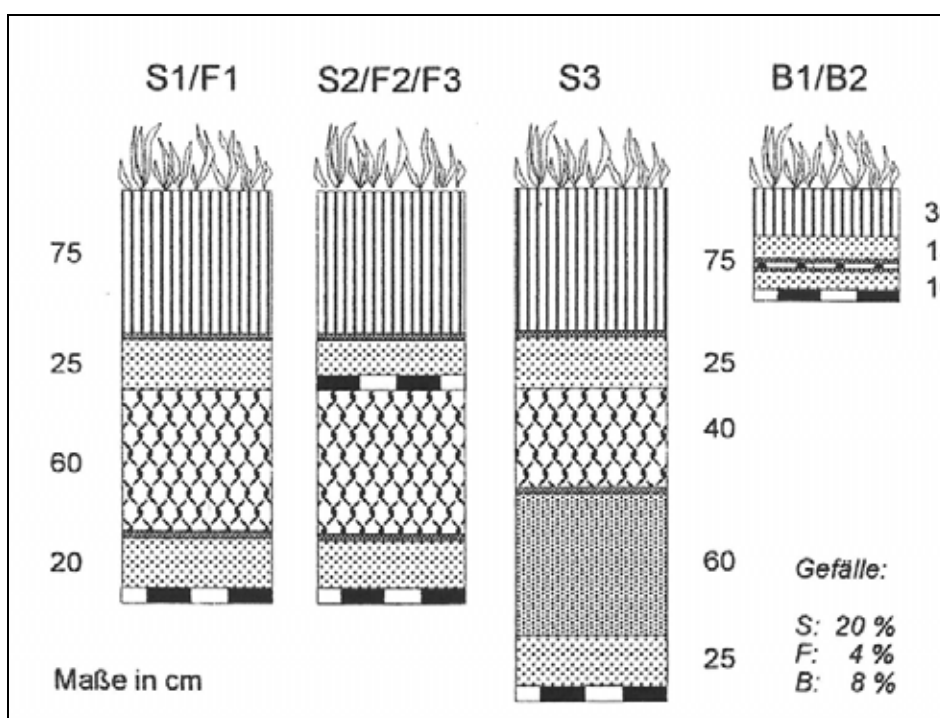


Bild 3: Design der Testfelder auf der Deponie Hamburg-Georgswerder (Legende s. [3])

Die Geschiebemergeldichtungen besitzen 1 m Überdeckung durch Entwässerungs- bzw. Rekultivierungsschichten und werden in [4] zu Recht als „wenig schrumpfanfällig“ bezeichnet. Die nutzbare Feldkapazität der Rekultivierungsschicht kann nach Angaben in [4] auf ca. 110 bis 120 mm geschätzt werden und liegt damit nur knapp unter der Forderung von 140 mm, die in IntDepV aktuell als Mindestvorgabe enthalten ist. Die Niederschlagshöhen am Standort lagen in den Beobachtungsjahren 1988 – 1997 zwischen 640 und 1032 mm/Jahr. Mit ca. 837 mm mittlerer Niederschlagshöhe pro Jahr gilt der Standort als durchschnittlich bis überdurchschnittlich niederschlagsreich.

Trotzdem kam es bekanntermaßen innerhalb weniger Jahre nach der Herstellung zu erhöhten Sickerraten durch die Geschiebemergeldichtungen, die auf Rissbildung infolge Austrocknung und Durchwurzelung zurückgeführt wurden (s. rote Säulen in Bild 4).

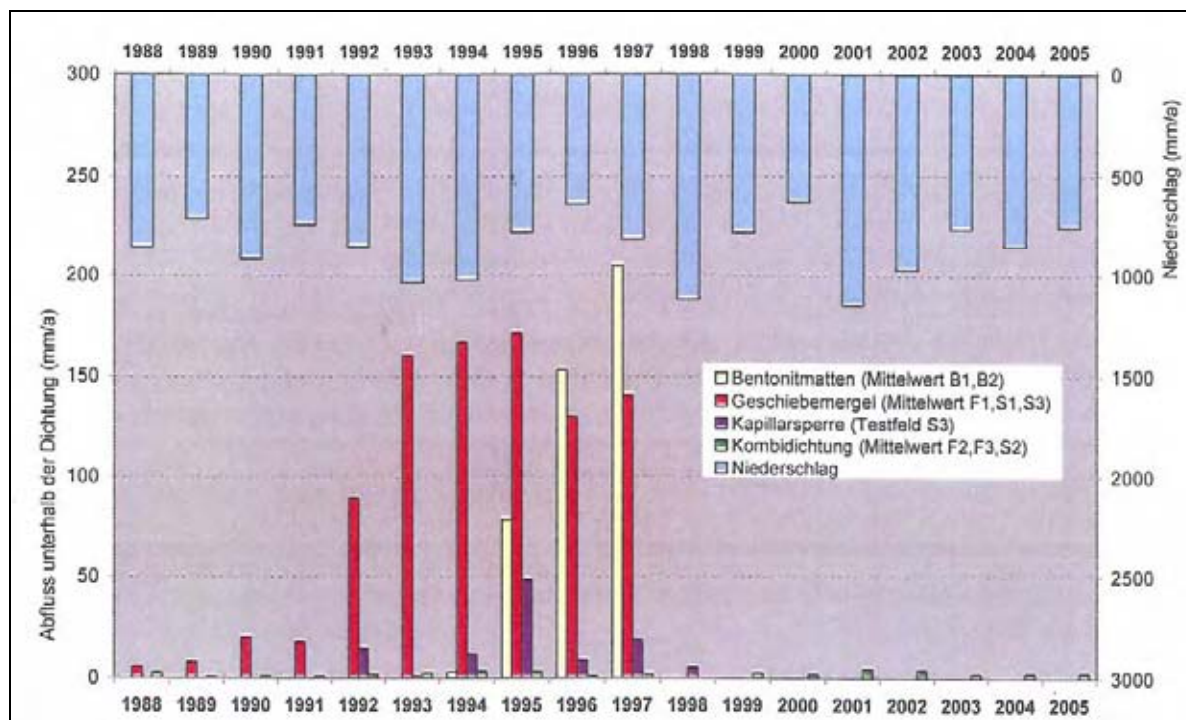


Bild 4: Jahressummen der Dichtungsdurchsickerung für verschiedene Dichtungssysteme der Testfelder auf der Deponie Georgswerder (aus [3])

Dabei wiesen die Geschiebemergeldichtungen nach ihrer Herstellung Einbau-Durchlässigkeitsbeiwerte von i. M. $k = 2,4 \cdot 10^{-10}$ m/s auf (Laborergebnisse, ca. 20-fach besser als nach TASI/DepV gefordert). Nach zwei sommerlichen Trockenperioden 1989 bzw. 1992 stiegen die Jahresraten der Durchsickerung jedoch deutlich auf Maximalwerte bis rund 200 mm/Jahr. Bezogen auf einen mittleren Jahresniederschlag von 832 mm beträgt die Wirksamkeit der (Ton)Dichtungssysteme nach 6 Jahren nur noch ca. 80% und kann keinesfalls durch die hervorragenden Labor-Durchlässigkeitsbeiwerte bei Herstellung beschrieben werden.

2.2 Mineralische Dichtung Dillinger Hütte

In einem Feldversuch mit 12 Großlysimetern am Standort der AG der Dillinger Hüttenwerke werden seit April 2002 Untersuchungen zur Entwicklung der wesentlichen Wasserhaushaltsparameter von marktüblichen und alternativen Oberflächenabdichtungssystemen unter Nutzung verschiedener Dichtungsbaustoffe durchgeführt [5]. Als Vergleich wurde auf einem Großlysimeterfeld das Regelabdichtungssystem der TASI / DepV mit einer dreilagigen, relativ trocken eingebauten, kaolinitreichen und damit wenig schrumpfanfälligen Tonsteindichtung hergestellt. Die Tondichtungsschicht ist mit 1,3 m Entwässerungs- und Rekultivierungsboden überdeckt. Die nutzbare Feldkapazität der Rekultivierungsschicht beträgt ca. 100 bis 110 mm. Als Einbau – k-Wert wird in [5] $k = 9 \cdot 10^{-11}$ m/s im Mittel angegeben (Laborprüfung, ca. 56-fach besser als nach TASI/DepV gefordert). Das langjährige Niederschlagsmittel liegt bei ca. 780 mm/Jahr. Ein kritischer Trockenstandort, der einen erhöhtem Austrocknungsschutz erforderlich macht, liegt auch in diesem Fall nicht vor.

Zur Beurteilung des Durchlässigkeitsverhaltens wurden unter Bezug auf die einleitend aufgeführten Grundlagen aus den gemessenen Wasserflüssen Durchlässigkeitsbeiwerte k

auf Tageswertbasis zurückgerechnet. Da Tage ohne Dränspende aufgrund der anzunehmend nicht vorhandenen hydraulischen Dichtungsbelastung stark wirksamkeitsüberschätzende k-Werte hervorrufen würden, wurden zur k-Wert-Kalkulation nur Tage mit Drainageflüssen Q_{dr} berücksichtigt. Die dabei sichtbaren unvermeidlichen Schwankungen der Tageswerte wurden durch statistische Ansätze geglättet: zum einen wurde ein gleitendes 15-tägiges Mittel berechnet, zum anderen wurden Summenbildungen der Durchsickerungen über 14 Tage durchgeführt und anhand dieser Summenwerte k-Wert-Zeitreihen mit 14-tägiger Auflösung berechnet. Darüber hinaus wurden weitere Angaben zum 95 % - Quantil und zum Medianwert aus den jeweiligen Jahresreihen heraus angegeben. Weitere Erläuterungen zum Verfahren finden sich in [6]. Bild 5 zeigt die Ergebnisse für die vorstehend beschriebene Tonsteindichtung.

Aus Bild 5 wird deutlich, dass die berechneten Durchlässigkeitsbeiwerte in täglicher Auflösung einer stetigen Veränderung unterliegen. Insbesondere die statistisch geglätteten Jahreswerte verdeutlichen, dass im vierten und insbesondere im fünften Jahr die Dichtungswirkung dieser Tonsteindichtung signifikant nachgelassen hat. Bezogen auf den Durchlässigkeitsbeiwert bei der Herstellung hätte die Tonsteindichtung sogar die Anforderungen an ein Deponieoberflächenabdichtungssystem der Deponieklasse III sicher erfüllt. Aktuell muss der Zustand der Tonsteindichtung jedoch bereits im Hinblick auf die Anforderungen für ein Oberflächenabdichtungssystem der Deponieklassen I/II als kritisch eingestuft werden. Im langjährigen Vergleich sind keinerlei Tendenzen für eine Verbesserung der Dichtungswirkung erkennbar, obwohl Materialauswahl und Einbauvorgaben deutlich über den geforderten Mindeststandards lagen. Vor dem Hintergrund der Formulierungen in IntDepV ist aus Sicht des Autors anzuzweifeln, dass das in Bild 5 dargestellte (typische?) Durchlässigkeitsverhalten einer konventionellen (Ton)Dichtung ausreichend durch die Angabe eines Laborwertes unter Normbedingungen beschrieben werden kann!

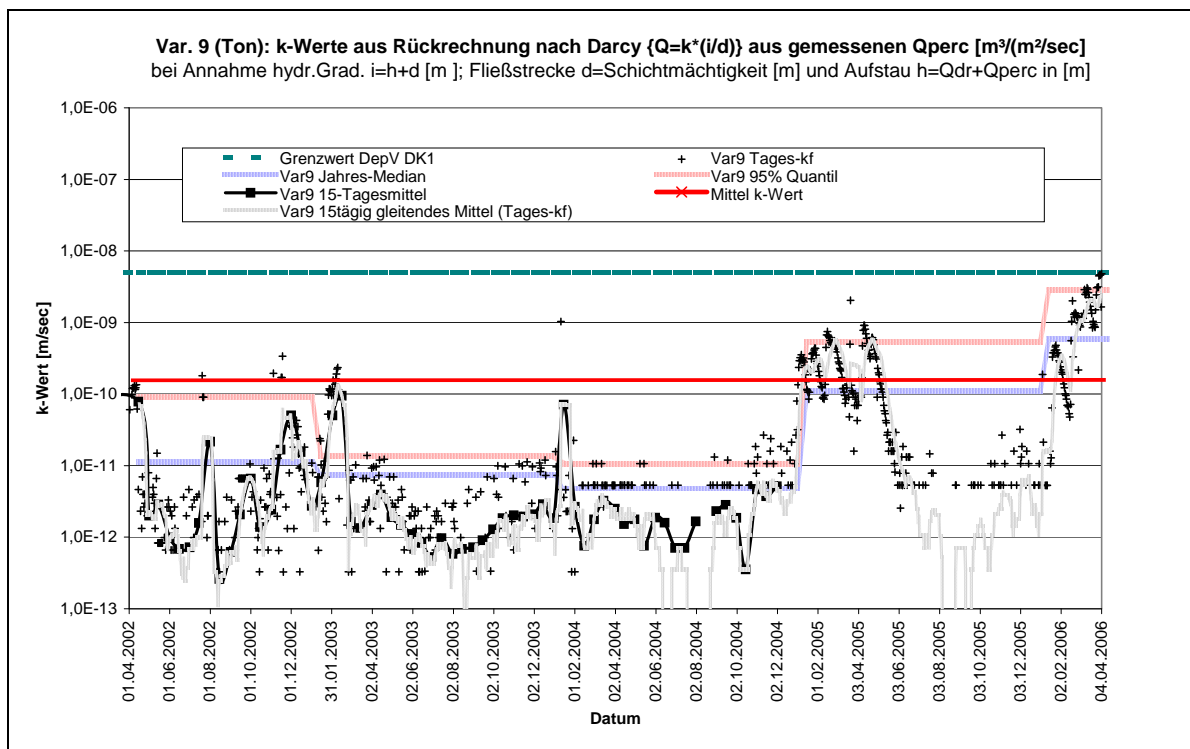


Bild 5: k-Werte aus Rückrechnung nach DARCY aus gemessenen Durchsickerungswerten [$m^3/(m^2 \cdot s)$] auf unterschiedlicher Zeitbasis, aus [5]

2.3 Mineralische Dichtung LK Aurach

Auf der Deponie „Im Dienstfeld“, Landkreis Aurach (Bayern) werden seit mehreren Jahren Großlysimeter zur Untersuchung der Dichtungswirkung der in Bild 6 dargestellten mineralischen Oberflächenabdichtungssysteme betrieben. Eine aktuelle Zusammenfassung der Zwischenergebnisse findet sich in [7].

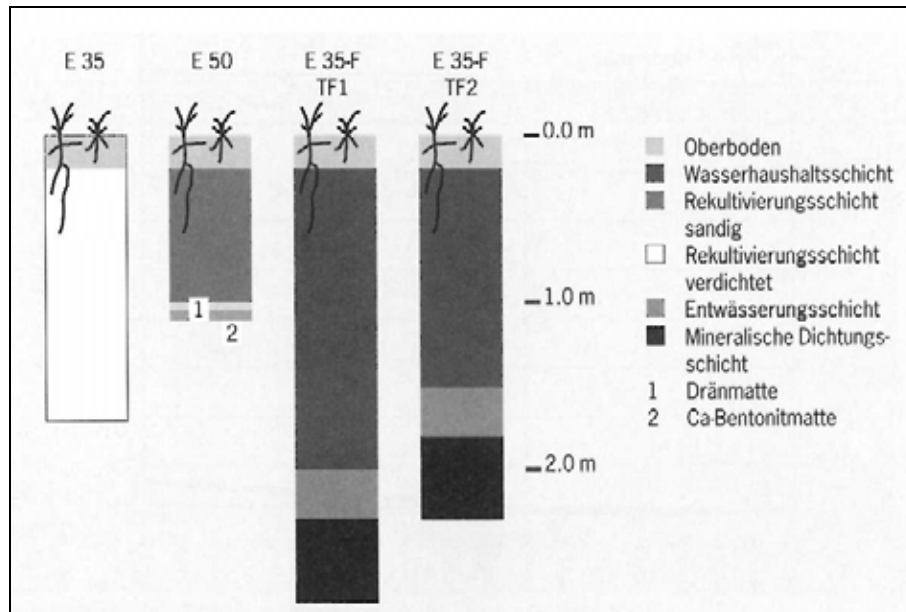


Bild 6.: Schematische Profile der Großlysimeter-Versuchsfelder [7]

Als Besonderheit ist darauf hinzuweisen, dass die beiden mineralischen Tondichtungen, deren Dichtungskomponenten als schluffige, sandige Tone klassifiziert werden, im Feld TF1 mit 1,5 m Wasserhaushalts- und zusätzlich 0,3 m Entwässerungsschicht, im Feld TF2 sogar mit 2,0 m Wasserhaushalts- und ebenfalls 0,3 m Entwässerungsschicht überdeckt sind. Aus den Angaben zum Vegetationssubstrat lassen sich die nutzbaren Feldkapazitäten beider Felder auf deutlich über 300 mm abschätzen! Die Standortbedingungen können mit einem langjährigen mittleren Niederschlag von 750 mm als durchschnittlich bezeichnet werden. Die tonmineralische Dichtung wurde mit einem Wassergehalt von 2 % unter dem optimalen Wassergehalt bei i. M. 100 % Proctordichte („auf dem Trockenem Ast“) eingebaut. Die Einbauqualität der Tondichtungen wird bezogen auf ihre Durchlässigkeit mit $2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s} \leq k \leq 3 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ angegeben (Laborwerte, ca. 2 bis 25-fach besser als nach TASI/DepV gefordert). Das verwendete Dichtungsmaterial, die Einbaubedingungen und insbesondere die großzügige Überdeckung lassen die Untersuchungen als repräsentativ für einen Systemaufbau mit besonderem Augenmerk auf die Austrocknungssicherheit der mineralischen Dichtung erscheinen. Demzufolge wäre zu erwarten, dass beide Untersuchungen ein weitgehend stationäres Durchlässigkeitsverhalten bei gleichbleibend sehr guter Wirksamkeit dokumentieren.

Hydrologisches Jahr	Niederschlag [mm]	Sickerwasserneubildung in [mm]	
		Feld TF 1	Feld TF 2
2002	1174	29	32
2003	542	12	4
2004	805	10	5
2005	817	12	5
2006	576	35	6

Tabelle 1: Jahressummen des gemessenen Niederschlags und der Sickerwasserneubildung zweier Versuchsfelder mit Tondichtung (nach [7])

Das dokumentierte Durchlässigkeitsverhalten ist jedoch zumindest, was die Ergebnisse des Feldes TF 1 angeht, ernüchternd: Mit Werten zwischen 10 und 35 mm/Jahr (bzw. 20 mm/Jahr als Mittelwert) und in Anbetracht der extremen Verschlechterung im Jahr 2006 bestehen zwischen (ursprünglicher) Labor- und (aktueller) Versuchsfeldqualität nach nur 5 Jahren erhebliche Differenzen.

Das Feld TF 2 zeigt dagegen die in Anbetracht der Labor-Durchlässigkeitsbeiwerte zu erwartende sehr geringe Felddurchlässigkeit (zumindest ab dem 2. Jahr). Die Rahmenbedingungen, die dafür selbst an einem durchschnittlich feuchten Deponiestandort erforderlich waren (z. B. Verdichtung auf dem trockenen Ast der Proctorkurve, 2,5 m Überdeckung mit besonders wasserspeicherndem Vegetationssubstrat) liegen jedoch deutlich über den Anforderungen, die die IntDepV als mindestens erforderliche Schutzmaßnahmen zur Sicherstellung der maximalen tolerierbaren Sickerwasserneubildung ($Q = 20$ analog $k \leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s?) vorsieht.

2.4 Schlussfolgerungen (Teil1)

Mineralische Tondichtungen zeigen auch in Schichtsystemen, die deutlich über die Mindestanforderungen der TAsi/DepV hinausgehen, ein instationäres Durchlässigkeitsverhalten. Ursache sind die komplexen physikalischen und biologischen Einwirkungen, die sich unter realen Bedingungen in Deponieoberflächensystemen einstellen. Die langfristige Dichtungswirkung solcher Dichtungskomponenten mit potentiell instationärem Durchlässigkeitsverhalten kann nicht zuverlässig mit Labor-Durchlässigkeitsbeiwerten beschrieben werden. Auch bei Umsetzung der Mindestanforderungen wie sie im derzeitigen 2. Entwurf der Neuen Integrierten Deponieverordnung formuliert sind (1m Rekultivierungsschicht, nutzbare Feldkapazität 140 mm, Labordurchlässigkeit der mineralischen Dichtungskomponente nach DIN 18130 $k \leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s) kann eine langfristige Beeinträchtigung der Dichtungswirkung nicht ausgeschlossen werden. Darüber hinaus erscheint es unsicher, dass diese Mindestvorgaben mit der Forderung nach einer jährlichen maximalen Durchsickerung von 20 mm korrespondieren. Dieses müsste allerdings zutreffen,

wenn man alternative Dichtungskomponenten und konventionelle (Ton)Dichtungen mit gleichem Maßstab messen wollte.

Labor-Durchlässigkeitsversuche bleiben zur geotechnischen Charakterisierung des mineralischen Dichtungsmaterials notwendig, sind aber aus Sicht des Autors für eine Beurteilung der langfristigen Funktionsfähigkeit eines Oberflächenabdichtungssystems mit konventioneller mineralischer Dichtungskomponente im Sinne des §13 der DepV nicht hinreichend.

3. Wirksamkeitsanalyse für Komponenten mit instationärem Durchlässigkeitsverhalten

3.1 Allgemeines

Solange die komplexen, dynamischen Abläufe und Mechanismen in Oberflächenabdichtungssystemen nicht durch instationäre Wasserhaushalts-Simulationsrechnungen modelliert werden können, sind Felduntersuchungen ein bewährtes Mittel für eine zuverlässige Bewertung. Dabei können neben dem Durchlässigkeitsverhalten des mineralischen Abdichtungselementes auch die Wirkungsgrade weiterer Funktionsschichten und die Wirksamkeit des gesamten Systemaufbaus erfasst und dokumentiert werden.

Der Wasserhaushalt von Deponieoberflächenabdichtungssystemen wird gemäß [8] durch die folgende Wasserhaushaltsgleichung beschrieben:

$$N = ET_a + A_O + A_I + A_D + A_{SW} + (R - B) \quad (\text{Gl. 3})$$

Darin sind:

ET_a = reale Evapotranspiration

A_O, A_I, A_D, A_{SW} = Abflüsse im System

R, B = Wasserspeicherung bzw. -aufbrauch im System

Das in die Wasserbilanz eingehende Volumen wird in der Regel als Höhe einer Wasserschicht (in mm) über einer horizontalen Fläche bezogen auf eine Zeitspanne ausgedrückt.

Da es sich bei Felduntersuchungen in Lysimetern in der Regel um räumlich begrenzte, hydraulisch geschlossene Systeme handelt, wird – außer bei als Kapillarsperre wirkenden Dichtungssystemen – in der Regel auf die getrennte Erfassung des Bilanzgliedes Zwischenabfluss / Interflow A_I verzichtet. Man kommt dann zu der in [6] z.B. zur Auswertung der Test- und Referenzfelder der Dillinger Hütte aufgestellten vereinfachten Bilanzgleichung (4), hier bezogen auf das Standard-Versuchsprofil einer mineralischen Oberflächenabdichtung (Bild 7):

$$P = ET \pm \Delta S_B + Q_{\text{surf}} + Q_{\text{dr}} + Q_{\text{perc}} \quad (\text{Gl. 4})$$

mit:

P = atmosphärischer Niederschlag [l/m^2],

ET = Evapotranspiration (ET) [l/m^2], als Summengröße der: Bodenevaporation (E_b), Blattflächen-Interzeption (E_i), pflanzenphysiologischen Transpiration (T),

ΔS_B = der Änderung des Bodenwasser- /Schnee-Speichers sowie den lateralen Schichtenflüssen:

- Q_{surf} = Oberflächenabfluss [l/m^2],
 Q_{dr} = Drainageabfluss auf der technischen Dichtung,
 Q_{perc} = Basis-Drainagefluss unter der technischen Dichtung, ersatzweise für den eigentlich vertikal orientierten Teilstrom der Systemdurchsickerung (Sickerwasserneubildung).

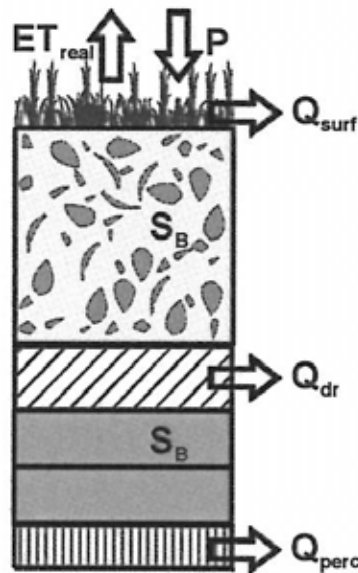


Bild 7: Benennung der Wasserhaushalts-Parameter für den Standardaufbau der Testfelder der Dillinger Hütte [6]

Die bei Lysimeteruntersuchungen üblicherweise zur Verfügung stehenden Abflussdaten können nach Gleichung (5) ohne weitere Umrechnungen so zueinander in Beziehung gesetzt werden, dass sich in Bezug auf das Gesamtsystem folgende Wirksamkeitsaussage treffen lässt:

$$\eta_{\text{System}} = (1 - \text{Sickerwassermenge} / \text{Versickerungsanteil des Niederschlags}) \cdot 100 [\%] \quad (\text{Gl. 5})$$

Als Bezugsgröße für die Wirksamkeitsanalyse wird nur der Versickerungsanteil des Niederschlags – also (P) reduziert um den Oberflächenabfluss Q_{surf} – herangezogen. So wird vermieden, dass Oberflächenabflüsse, die sich in erster Linie in Abhängigkeit von der Böschungsneigung, der Bewuchsdichte und der Porosität der obersten Bodenkreme einstellen – fälschlicherweise der Leistungsfähigkeit der Funktionsschichten zugerechnet werden. Die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse liegen in diesem Sinne auf der ungünstigen, d. h. sicheren Seite.

Wie beschrieben, werden sich die bodenphysikalisch hydrologischen Eigenschaften jeder Rekultivierungsschicht unter dem Einfluss der dynamischen Einflussgrößen Niederschlag, Speichervermögen und Evapotranspiration ständig verändern. Demzufolge werden sich auch ständig wechselnde Abflüsse aus der Rekultivierungsschicht ergeben, was seinerseits wiederum unterschiedliche Auswirkungen auf den Feuchtehaushalt und die Zustandform einer mineralischen haben wird. Diese Zusammenhänge werden sehr deutlich, wenn man die Wirkungsgrade der Komponenten „Rekultivierungsschicht“ (einschließlich Vegetation) und „mineralische Dichtung“ getrennt beurteilt. Hierzu werden Berechnungen des Wirkungsgrades der Rekultivierungsschicht nach Gleichung 6 bzw. der mineralischen Dichtung nach Gleichung 7 angesetzt.

$$\eta_{\text{Rekultivierungsschicht}} = (1 - (\text{Dränspende} / \text{Versickerungsanteil des Niederschlags})) \cdot 100 [\%] \quad (\text{Gl. 6})$$

$$\eta_{\text{Bentonitmatte}} = (1 - (\text{Sickerwassermenge} / \text{Dränspende})) \cdot 100 [\%] \quad (\text{Gl. 7})$$

Als Dränspende ist dabei stets der gesamte aus der Rekultivierungsschicht absickernde Abfluss – bezogen auf Bild 7 also die Summe aus Dränabfluss Q_{dr} und Sickerwassermenge Q_{perc} – einzusetzen! Eine kleinere Unschärfe kann sich hinsichtlich des Wirkungsgrades der Rekultivierungsschicht ergeben, wenn möglicherweise Niederschläge des Bilanzzeitraumes (n-1) erst als Durchsickerung im darauf folgenden Bilanzzeitraumes (n) anfallen. Unter Umständen wird dadurch die Dränspende des Bilanzzeitraumes (n) größer als der Niederschlag im Bilanzzeitraum (n) und Gleichung (6) ist nicht mehr definiert. Diese Unschärfe kann jedoch durch den Bezug auf einen vergleichsweise großen Bilanzzeitraum von z.B. einem Monat minimiert werden. Bei Ansatz kleinerer Zeitintervalle – z. B. Tages- oder gar Stundenwerte – können diese Bilanzfehler jedoch nicht mehr unterdrückt werden und zu einer erheblichen Verfälschung der Angaben führen.

Die vorliegende aus einer streng mathematischen Betrachtung heraus entwickelte Darstellungsform enthält ferner die Unschärfe, dass der nach Gleichung 7 zu berechnende Wirkungsgrad der mineralischen Dichtung mathematisch nicht bestimmt werden kann, wenn über das betrachtete Zeitintervall (hier monatlich) kein Dränabfluss und keine Durchsickerung gemessen wird (vgl. Bild 2). Bei monatlicher Bilanzierung ist das jedoch erfahrungsgemäß selten, im nachfolgenden Beispiel trat dies nur an 2 von 96 Bilanzmonaten auf. Beide Monate blieben für die Auswertungen außer Betracht.

3.2 Feldmessungen Lysimeter Lemförde

Seit 1999 betreibt die NAUE GmbH & Co. KG auf ehemaligen Betriebsstandort in Lemförde eine Ringschacht-Lysimeteranlage, die mit verschiedenen Oberflächenabdichtungssystemen unter Verwendung von vernadelten Bentonitmatten bestückt ist. Aufbau und Messprinzipien sind in [9] detailliert beschrieben. Die wissenschaftliche Begleitung liegt in den Händen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Universität Hannover. Namensgebend für Bentonitmatten ist der als Dichtstoff verwendete Bentonit, ein zu Pulver gemahlener oder auch granulierter Spezialton, in dem nahezu vollständig das Tonmineral Montmorillonit vorherrschend ist. Montmorillonit ist in der Geotechnik seit Jahrzehnten für sein enormes Quellverhalten, aber auch für seine Schrumpfeempfindlichkeit bekannt. In der Geotechnik wird Bentonit bzw. Montmorillonit häufig als hochaktives Tonmineral bezeichnet. Als bodenmechanischer Parameter wird hierzu die sogenannte Aktivitätszahl I_A nach Skempton herangezogen, die bereits 1953 definiert worden ist. Sie gibt Hinweise auf die Art der Tonminerale in einem Boden und auf das Quell- bzw. Schrumpfvermögen (Tabelle 2).

Mineralart	$w_L(\%)$	I_A	$w_A(\%)$ (Enslin/Neff)	Quell- / Schrumpfvermögen
Quarzmehl	-	0	30	kein
Kaolin	60	0,4	80	gering
Illit	100	0,9	-	mittel
Ca-Montmorillonit	500	1,5	300	hoch
Na-Montmorillonit	700	7	700	sehr hoch

Tabelle 2: Angaben zum Quell- und Schrumpfvermögen ausgewählter Tonminerale; ergänzt nach [10]

Durch die Angabe der Aktivitätszahl können Böden im Hinblick auf ihr Wasserbindevermögen und ihr Quell- bzw. Schrumpfvermögen unterschieden werden. Tabelle 2 zeigt, dass Calcium-Bentonite, aber auch Natrium-Bentonite nach Ionenaustausch, ein deutlich höheres Wasserbindevermögen und entsprechend hohes Quell- und auch Schrumpfpotential besitzen als z. B. natürliche Tonböden, Geschiebemergel oder Schluffe. Der Begriff Aktivitätszahl verdeutlicht bereits, dass es sich hierbei um eine bodenphysikalische Eigenschaft handelt, aufgrund derer das Material seine Zustandsform und sein Volumen bei wechselnden Wassergehalten vergleichsweise schnell ändert. Demzufolge ist beim Einsatz von Bentonitmatten in Deponieoberflächensystemen immer von einem ausgeprägt instationären Durchlässigkeitsverhalten auszugehen, das nicht durch die Angabe eines Durchlässigkeitsbeiwertes beschrieben werden kann. Bentonitmatten bieten sich deshalb für eine Wirksamkeitsanalyse auf Basis langjähriger Feldmessungen in besonderem Maße an.

In der NAUE-Lysimeteranlage werden seit 1999 vernadelte Bentonitmatten mit unterschiedlichen Gehalten an Natrium-Bentonit ununterbrochen unter den klimatischen Beanspruchungen des Standortes im Hinblick auf die Dichtungswirkung und ihr Durchlässigkeitsverhalten hin geprüft. Die Überdeckung besteht aus 1 m Rekultivierungsboden zuzüglich einer 20 – 30 cm dicken Entwässerungsschicht. Bild 89 gibt einen Überblick über die zeitliche Entwicklung der gemessenen Niederschlags-, Drainage- und Sickerwasserabflussmengen im Zeitraum 1999 bis 2007 für 3 Lysimeter mit unterschiedlichen Bentonitmatten und Rekultivierungsschichten.

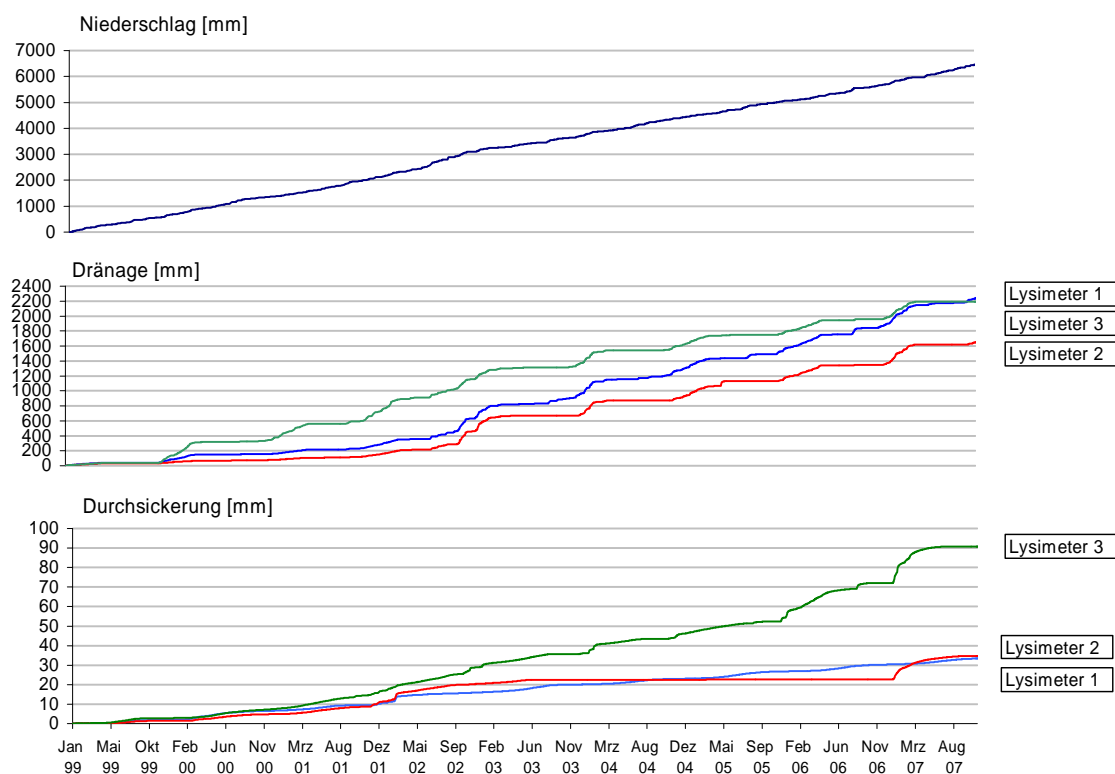


Bild 8: Zeitliche Entwicklung von Niederschlag, Dainabfluss und Durchsickerung verschiedener Bentonitmatten auf der Lysimeteranlage Lemförde bei 1,2 – 1,3 m Überdeckung [11]

Im einzelnen ergaben die Testreihen in 9 Jahren bisher folgende Ergebnisse:

- Niederschlag insgesamt: 6.550 mm
- Durchsickerung Lysimeter 1: 34 mm (4.500 g/m² Bentonitpulver)
- Durchsickerung Lysimeter 2: 38 mm (5.000 g/m² Bentonitpulver)
- Durchsickerung Lysimeter 3: 101 mm (4.500 g/m² Bentonitgranulat)

Am Beispiel des Lysimeters 3 mit den maximalen Durchsickerungen soll nachfolgend das instationäre Durchlässigkeitsverhalten von Rekultivierungsschicht und Bentonitmatte in Form einer Wirksamkeitsanalyse aufgezeigt werden.

3.3 Wirksamkeitsanalyse

Die Anwendung der oben beschriebenen Rechenschritte auf die entsprechenden Messdaten der Lysimeteranlage der Firma NAUE zeigen die Bilder 9 und 10. Exemplarisch wurde für die Auswertung der Lysimeter 3 gewählt, da die beiden anderen Lysimeter zwar einen ähnlichen Aufbau besitzen, jedoch über den gesamten Prüfzeitraum in verschiedener Weise, z.B. durch den Austausch der Rekultivierungsschichten, bautechnisch verändert worden sind. Als zeitliche Auflösung wurden die Monatswerte des Zeitraumes Januar 1999 bis Dezember 2006 gewählt, so dass sieben komplette Messjahre als Datenbasis zur Verfügung standen. Die Auswertung des Messjahres 2007 soll im Frühjahr 2008 erfolgen. Während in Bild 9 die Ganglinien für die Wirksamkeiten von System, Rekultivierungsschicht und Bentonitmatte der Übersicht halber in getrennten Abbildungen dargestellt sind, verdeutlicht erst die Überlagerung der drei Ganglinien in einer Abbildung (Bild 10) das Systemverhalten aller Funktionsschichten.

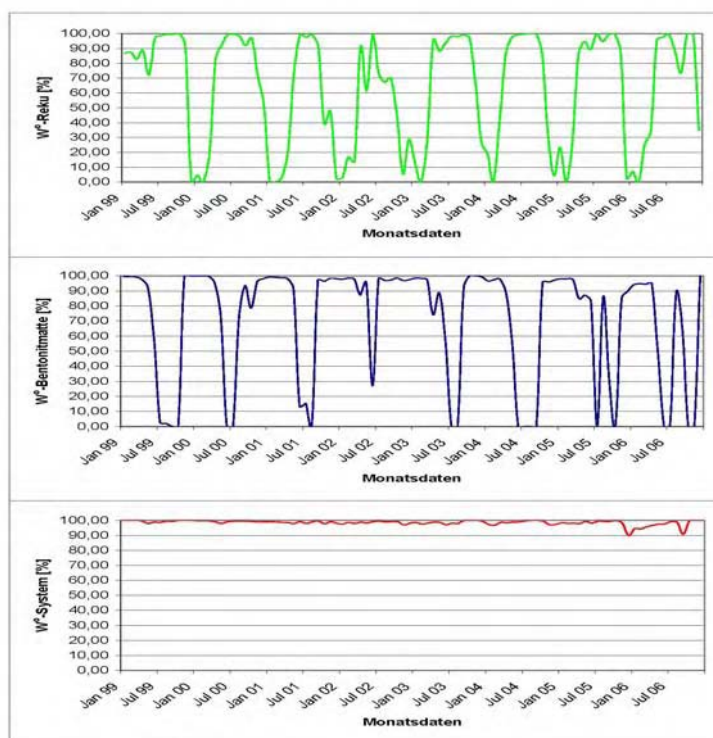


Bild 9: Wirkungsgrade von Rekultivierungsschicht und vernadelter Bentonitmatte sowie Systemwirksamkeit des gesamten Aufbaus im Lysimeter 3 der Firma NAUE mit monatlicher Auflösung für den Zeitraum 1999 – 2006 (Einzeldarstellung)

In Bild 10 ist deutlich zu erkennen, in welcher Form sich die beiden Komponenten (Rekultivierungsschicht und Bentonitmatte) hydraulisch ergänzen: In den Sommermonaten mit hoher Evapotranspiration bestimmt der Wirkungsgrad der Rekultivierungsschicht die Systemwirksamkeit, in den verdunstungsarmen Wintermonaten wäre ohne die Bentonitmatte praktisch keine Dichtungswirkung im System zu erzielen. Ferner ist festzustellen, dass das Jahr 2006 am Standort Lemförde klimatisch zwei extreme Besonderheiten aufwies: zum einen war der Winter- / Frühjahrzeitraum durch langandauernde Frosttemperaturen gekennzeichnet, an das sich dann praktisch ohne Übergang ein warmer, niederschlagsarmer, trockener Sommer anschloss. Beides führte zu einer Unterversorgung der Bentonitmatte im Hinblick auf den Ausgleich des Wasserhaushaltes. Darüber hinaus ergaben sich im Jahr 2006 neben der sommerlichen Austrocknung eine zusätzliche späte Trockenphase im November / Dezember, was in der bisherigen Beobachtungsreihe einmalig war und den Wirkungsgrad der Bentonitmatte entsprechend reduzierte. Doch selbst unter diesen Worst-Case-Bedingungen wurde lediglich eine Jahresdurchsickerung von 14 mm gemessen, was ca. 2 % des Jahresniederschlags am Standort entspricht!

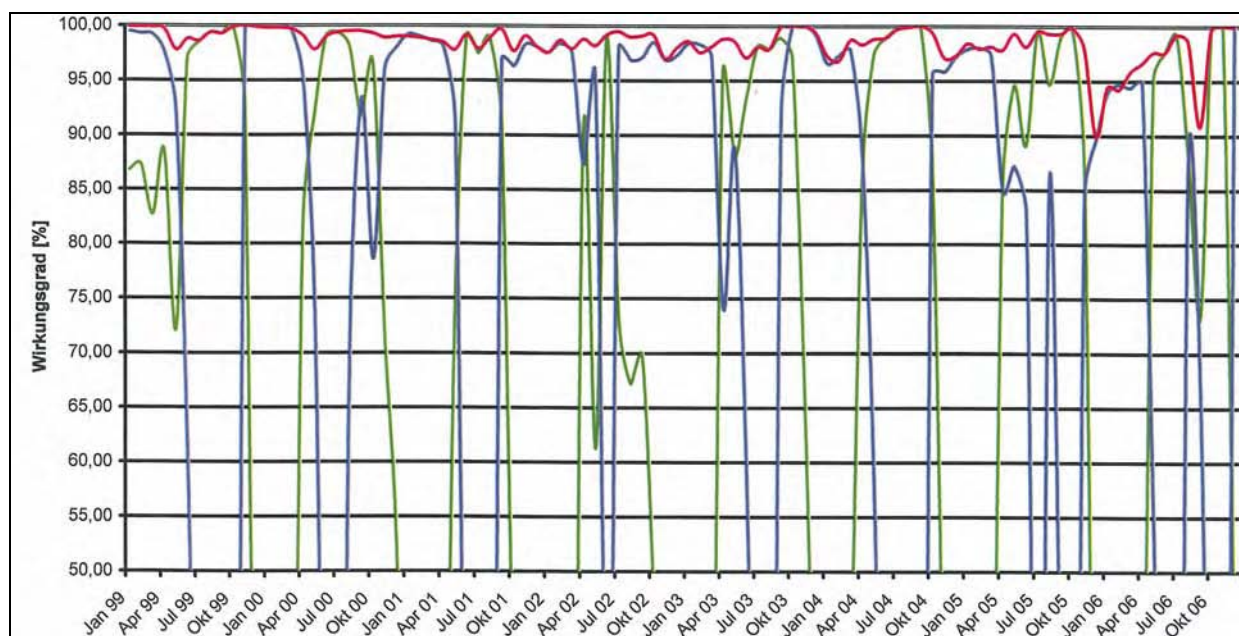


Bild 10: Systemwirksamkeit des gesamten Aufbaus und Wirkungsgrade von Rekultivierungsschicht und vernadelter Bentonitmatte im Lysimeter 3 der Firma NAUE mit monatlicher Auflösung für den Zeitraum 1999 – 2006

Rot = Systemwirksamkeit

Grün = Rekultivierungsschicht (Werte unterhalb 50% nicht dargestellt)

Blau = Vernadelte Bentonitmatte (Werte unterhalb 50% nicht dargestellt)

3.4 Schlussfolgerungen (Teil 2)

Als direkte Messgrößen zur Beurteilung der Dichtungswirkung werden aus Felduntersuchungen neben den meteorologischen Klimadaten und möglicherweise Wasserspannungen aus Tensiometermessungen üblicherweise ausschließlich Wasserflüsse ermittelt. Die mitunter publizierten Durchlässigkeitsbeiwerte aus Feldmessungen sind immer

indirekt ermittelt durch Rückrechnungen auf Basis des DARCY-schen Gesetzes. Das Gesetz von DARCY ist jedoch nur für laminare Strömung bei vollständiger Wassersättigung gültig. Darüber hinaus ist die zur korrekten Ermittlung des hydraulischen Gradienten erforderliche Bestimmung der Aufstauhöhe im betrachteten Zeitintervall in Feldmessungen bisher noch nicht durchgeführt worden und möglicherweise messtechnisch auch nicht umsetzbar. Damit werden im Sinne einer exakten mathematischen Lösung mehrere Voraussetzungen zur Anwendbarkeit des DARCY-Gesetzes verletzt.

Als mathematisch einfache und aussagekräftige Beurteilungsmöglichkeit kann dagegen die Ermittlung der Wirksamkeit des Gesamtsystems und zusätzlich die Wirkungsgrade der einzelnen Systemkomponenten auf Basis ca. 10-jähriger Feldmessungen empfohlen werden.

Im Hinblick auf den Umfang der bei Feldversuchen zu installierende Messtechnik ist ein hoher Aufwand nur dann erforderlich, wenn in erster Linie wissenschaftliche Studien und grundlegende Forschungsarbeiten betrieben werden sollen. Bei projektbezogenen Eignungsfeststellungen kann sich die Messtechnik dagegen auf die Messung der Klimadaten gemäß DWD-Vorgaben und die Messung von Oberflächen-, Drän- und Sickerabfluss durch die zu beurteilende Abdichtungskomponente reduzieren.

Für die Eignungsbewertung von Abdichtungssystemen und -komponenten können auf diese Weise langzeitige Wirksamkeitsberechnungen für das Gesamtsystem und interessierende Komponenten getrennt aufgestellt werden. Darüber hinaus sollten die konkreten Abflusswerte [mm] pro Zeiteinheit z. B. in Monatswerten dokumentiert und in Zeitreihen dargestellt werden. Diese Vorgehensweise ist sowohl bei stationärem als auch bei instationärem Durchlässigkeitsverhalten einfach anwendbar.

Derartige Lysimeteruntersuchungen können auch Bestandteil der Stilllegungs- und Nachsorgemaßnahmen werden. Nach eigenen Erfahrungen liegen die Investitionskosten für Großlysimeter (ohne wissenschaftliche Ansprüche) bei deutlich unter 100.000 Euro/Stück inklusive Messtechnik/Software. Geeignete Kleinlysimeter können dagegen bereits für ca. 50.000 € Investitionskosten realisiert werden. Solche Lysimeter sind wartungsarm über Jahre zu betreiben. Die Daten können per Modemübertragung verschiedenen Arbeitsplätzen zugänglich gemacht werden. Die stärkere Betonung von Feldmessungen im Rahmen des abfallrechtlichen Vollzugs (Beendigung der Stilllegung, Entlassung aus der Nachsorge gemäß Deponieverordnung) würde in vergleichsweise wenigen Jahren eine Datenfülle liefern, die die Deponietechnik in den vergangenen zehn Jahren nicht einmal ansatzweise erreicht hat. Für die Deponiebetreiber würde eine Investition in Felduntersuchungen zu deutlichen Reduzierungen bei den bis heute üblichen Probenahmen und anschließenden Laboruntersuchungen/Gutachten führen.

4. Schrifttum

- [1] REUTER, E.: „Übertragung der Ergebnisse von Durchlässigkeitsversuchen an mineralischen Dichtungsmaterialien im Labor auf die Verhältnisse im Feld“, Fachtagung Haus der Technik „Fortschritte der Deponietechnik 1986“, in: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 16, Erich Schmidt Verlag 1986
- [2] KRABBE, W.: „Über die Schrumpfung bindiger Böden“, Mitteilungen der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau, Franzius-Institut der Universität Hannover, Heft 13, Eigenverlag 1958
- [3] SOKOLLEK, V./BERGER, K./MELCHIOR, S./STEINER, B.: „Achtzehn Jahre Testfelduntersuchungen auf der Deponie Georgswerder/Hamburg“, Tagungsband

Deponieworkshop Zittau-Liberec, Hochschule (FH) Zittau/Görlitz, Heft 91, Eigenverlag 2006

- [4] MELCHIOR, S.: „Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme für Deponien und Altlasten“, Dissertation im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg, Hamburger bodenkundliche Arbeiten, Band 22, 1993
- [5] ARLT, K.-J./WOLSFELD, N.: „Ergebnisse aus 4-jährigen Versuchsfelduntersuchungen zu 12 Oberflächen- und Rekultivierungsvarianten für DK I-Monodeponien“, Tagungsband Deponieworkshop Zittau-Liberec, Hochschule (FH) Zittau/Görlitz, Heft 91, Eigenverlag 2006
- [6] WOLSFELD, N.: „Bodenphysikalische Eignung mineralischer Oberflächenabdichtungssysteme für Monodeponien der Stahlindustrie“, Dissertation am Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, Heft 43, Eigenverlag 2005
- [7] HENKEN-MELLIES, U./SCHWEIZER, A.: „Langzeituntersuchung mineralischer Oberflächenabdichtungen – Ergebnisse der Testfelder auf der Deponie >Im Dienstfeld</Bayern“, Müll und Abfall, Heft 10, 39. Jahrgang 2007
- [8] WITT, K.-H./RAMKE, H.-G.: Empfehlungen des Arbeitskreises 6.1 „Geotechnik der Deponiebauwerke“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), hier: E 2-36 „Oberflächenabdichtungssysteme mit geosynthetischen Tondichtungsbahnen (Entwurf)“, Bautechnik 84, Heft 9, 2007
- [9] BLÜMEL, W./MÜLLER-KIRCHENBAUER, A./EHRENBERG, H./VON MAUBEUGE, K.: „Langzeituntersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit von Bentonitmatten in Lysimetern“. Karlsruher Deponieseminar 2002, in: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 125, Erich Schmidt Verlag 2003
- [10] SMOLTCZYK, U.(Hrsg.): „Grundbautaschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen, 6. Auflage, Ernst & Sohn, 2001
- [11] BLÜMEL, W./MÜLLER/KIRCHENBAUER, A.: „Auswertung der Messdaten der Lysimeteranlage Lemförde für den Zeitraum 1999 bis 2006“, Untersuchungsbericht des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau der Leibnitz-Universität Hannover, unveröffentlicht, 2007