



SCHLUSSBERICHT

BBGT 69623542/02

Datum: 23.11.2011

Auftraggeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg

Projekt:

LfU – Projekt 3602

Auftrag:

**Fortführung der Wissenschaftlichen Betreuung der
Messfelder E 50 und E 35 auf der Deponie „Im Dienst-
feld“, Aurach**

Ihre Nachricht vom:

29.09.2009

Ihr Zeichen:

36-8740.3-30198/2009

Bearbeiter:

Dr. Henken-Mellies

Telefon Nr.:

+49 (0) 911 655-5587

Telefax Nr.:

+49 (0) 911 655-5510

E-Mail:

wolf-ulrich.henken-mellies@de.tuv.com
<http://geotechnik.lga.de>

Das Gutachten umfasst 72 Seiten und 4 Anlagen.

Dieses Gutachten darf nur im vollen Wortlaut veröffentlicht werden.
Jede Veröffentlichung in Kürzung oder Auszug bedarf der vorherigen Genehmigung
durch die TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	4
2	Einführung	6
2.1	Vorgang.....	6
2.2	Aufgabenstellung für die Versuchsfelder E 35 und E 50	6
2.3	Standortbeschreibung der Deponie „Im Dienstfeld“ / Aurach	8
3	Stand der Forschung.....	9
3.1	Vorbemerkung.....	9
3.2	Mineralische Abdichtungskomponenten	10
3.3	Bentonitmatten	12
4	Beschreibung des Versuchsfeldes E 35	14
4.1	Planung des Versuchsfeldes E 35.....	14
4.2	Profilaufbau des Versuchsfeldes E 35	16
4.3	Auswahl der Materialien für das Versuchsfeld E 35	17
4.4	Bau des Versuchsfeldes E 35.....	21
4.5	Messtechnische Ausstattung des Versuchsfeldes E 35	31
4.6	Messdatenerfassung.....	32
4.7	Beschreibung des Versuchsfeldes E 35 im Zeitraum 2001 – 2011.....	32
5	Beschreibung des Versuchsfeldes E 50	35
5.1	Aufgabenstellung für das Versuchsfeldes E 50	35
5.2	Aufbau des Versuchsfeldes E 50.....	35
5.3	Beschreibung der Materialien für das Versuchsfeld E 50.....	37
5.4	Bau des Versuchsfeldes E 50.....	40
5.5	Messtechnische Ausstattung des Versuchsfeldes E 50	46
5.6	Beschreibung des Versuchsfeldes E 50 im Zeitraum 1998 - 2011.....	47
6	Messergebnisse des Versuchsfeldes E 35.....	50
6.1	Ergebnisse der Abflussmessungen im Versuchsfeld E 35	50
6.2	In-situ-Messungen der Bodenfeuchte im Versuchsfeld E 35.....	55
7	Messergebnisse des Versuchsfeldes E 50	57
7.1	Ergebnisse der Abflussmessungen im Versuchsfeld E 50	57
7.2	Ergebnisse der Bodenfeuchtemessungen im Versuchsfeld E 50.....	61



8	Auswertung und Beurteilung der Untersuchungsergebnisse	62
8.1	Wasserhaushalt der untersuchten Oberflächenabdichtungssysteme	62
8.2	Wirksamkeit der Komponenten der Abdichtungssysteme	63
8.3	Beurteilung der Messsysteme in den Versuchsfeldern.....	65
9	Schlussbemerkung.....	67
10	Schriftenverzeichnis	68
10.1	Verordnungen, Richtlinien, Empfehlungen.....	68
10.2	Literaturverzeichnis.....	69
	Anlagenverzeichnis.....	72

1 Kurzfassung

Das Grundbauinstitut der LGA ist vom Bayerischen Landesamt für Umwelt mit der Fortführung der wissenschaftlichen Betreuung der Messfelder E 50 und E 35 auf der Deponie „Im Dienstfeld“, Aurach beauftragt (LfU-Projekt 3602). Die Messfelder sind als „Großlysimeter“ ausgebaut, in denen die Abflüsse gefasst und gemessen werden.

Im Rahmen des **Vorhabens E 50 „Langzeituntersuchungen an einem alternativen Oberflächenabdichtungssystem mit Geokunststoffen“** wird seit dem Jahr 1998 ein Oberflächenabdichtungssystem mit Bentonitmatte und Dränmatte untersucht.

Mit dem **Vorhaben E 35 „Langzeituntersuchungen an einer mineralischen Oberflächenabdichtung (Deponie „Im Dienstfeld“/Aurach)“** wird seit dem Jahr 2002 die Wirksamkeit eines optimierten mineralischen Oberflächenabdichtungssystems untersucht.

Der vorliegende Schlussbericht 2011 des LfU-Projekts 3602 dokumentiert die Fortführung der Langzeituntersuchungen im Zeitraum Oktober 2009 bis September 2011 und stellt diese in den Zusammenhang des gesamten, ca. 13-jährigen (E 50) bzw. ca. 9-jährigen (E 35) Beobachtungszeitraums.

In den als Großlysimeter ausgebauten Versuchsfeldern werden jeweils die Abflusskomponenten Oberflächenabfluss, Dränabfluss in der Entwässerungsschicht und Durchsickerung der Abdichtungskomponente (Bentonitmatte bzw. mineralische Dichtung) gemessen. Die Ergebnisse der Abflussmessungen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Der größte Teil der Niederschläge (im Mittel 2/3 der Niederschlagssumme) führt nicht zu Abflüssen, sondern wird – nach temporärer Zwischenspeicherung in der Rekultivierungsschicht – als Evapotranspiration wieder an die Atmosphäre abgegeben.
- Der Oberflächenabfluss in den unter ca. 1 : 4 geneigten Versuchsfeldern liegt in der Größenordnung von 1% – 3% der Niederschlagssumme. Dieser Befund bestätigt die auf anderen Versuchsfeldern erzielten Ergebnisse, dass der Abfluss von bewachsenen Deponieoberflächen in der Regel minimal ist.
- Der Dränabfluss (Abfluss in der Entwässerungsschicht über der Abdichtungskomponente) ist mit ca. 30% der Niederschlagssumme die weitaus größte Komponente der Abflüsse.
- Die Durchsickerung der jeweiligen Abdichtungskomponente ist die entscheidende Größe für die Abdichtungswirkung des Gesamtsystems.
 - Die Durchsickerung der Bentonitmatte (Versuchsfeld E 50) betrug in den ersten 3 Jahren des Beobachtungszeitraums nur 2 – 8 mm/Jahr, was einem Anteil von 0,3% bis 0,8% des jeweiligen Jahresniederschlages entspricht. Im Laufe der Jah-

re trat eine deutliche Verschlechterung der Abdichtungswirkung auf; die Durchsickerung erhöhte sich auf 20 – 80 mm/Jahr bzw. 3% bis 8% des Jahresniederschlages.

- Die Durchsickerung der mineralischen Abdichtungskomponente im Versuchsfeld E 35 betrug im Teilfeld 2 (mit 1,5 m dicker Rekultivierungsschicht) im Mittel weniger als 20 mm/Jahr (ca. 2% des Jahresniederschlages). Im Teilfeld 1 (mit 2,0 m dicker Rekultivierungsschicht lag die Durchsickerung systematisch höher und betrug im Mittel 36 mm/Jahr (bzw. 5% vom Niederschlag). In den Jahren 2010 und 2011 stieg hier die gemessene Durchsickerung sogar noch darüber hinaus an (hier sollte überprüft werden, ob es sich um eine Fehlfunktion der Wasserauffangsysteme handelt).

Der Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtungssysteme wird zusätzlich mit in-situ-Messinstrumenten zur Messung der Bodenfeuchte untersucht.

- Im Versuchsfeld E 50 zeigt sich, dass die 1,0 m mächtige Rekultivierungsschicht aus schwach schluffigem Sand in niederschlagsarmen Sommerhalbjahren bis hinunter zur Entwässerungsschicht nahezu austrocknet. Die 1,0 m mächtige Rekultivierungsschicht reicht unter den am Standort "Im Dienstfeld"/ Aurach herrschenden Klima- und Vegetationsbedingungen nicht aus, um darunter liegende, austrocknungsgefährdete Dichtungsschichten – wie Bentonitmatten oder tonmineralische Abdichtungen – nachhaltig vor Austrocknung zu schützen.
- Im Versuchsfeld E 35 zeigen die Messungen, dass in trockenen Sommerhalbjahren die 1,5 m dicke Rekultivierungsschicht so weit austrocknet, dass auch der darunter liegenden mineralischen Abdichtungskomponente Feuchtigkeit entzogen wird. Demgegenüber entfaltet die 2,0 m dicke Rekultivierungsschicht im bisherigen Beobachtungszeitraum einen wirksamen Schutz der mineralischen Dichtung vor Feuchtigkeitsentzug.

Deponien sind in der Stilllegungsphase mit einer Oberflächenabdichtung zu versehen. Die Deponieverordnung (DepV, 2009) gewährt einerseits weitgehende Freiheiten bei der Planung des Oberflächenabdichtungssystems, andererseits stellt sie hohe Anforderungen an die nachzuweisende langfristige Wirksamkeit der Komponenten. Mit den Projekten E 35 und E 50 zur Langzeituntersuchung des Wasserhaushalts und der Wirksamkeit zweier Oberflächenabdichtungssysteme mit unterschiedlichen Systemkomponenten wird die langfristige Funktionserfüllung der Komponenten unter konkreten Randbedingungen getestet. Die Projekte liefern praxisrelevante Erkenntnisse für die Planung und den Bau nachhaltig wirksamer Deponieoberflächenabdichtungen.

2 Einführung

2.1 Vorgang

Das Grundbauinstitut der LGA Bautechnik GmbH ist vom Bayerischen Landesamt für Umwelt mit der Weiterführung der wissenschaftlichen Betreuung der Versuchsfelder E 50 und E 35 auf der Deponie „Im Dienstfeld“, Aurach, im Zeitraum von Oktober 2009 bis September 2011 beauftragt (LfU – Projekt 3602; Vertrag vom 15.09.09 / 30.09.09).

Bis zum 31.10.2011 ist vertragsgemäß der Entwurf des Schlussberichtes zu erstellen, in dem die Ergebnisse der Messungen in den Versuchsfeldern im Zeitraum 01/2009 bis 09/2011 dokumentiert werden. Der Bericht baut auf den Abschlussberichten zu den Forschungsvorhaben E 35 (von 2007) und E 50 (von 2006) auf und führt diese fort. Der Schlussbericht wird hiermit vorgelegt.

Im vorliegenden Bericht wird zunächst der Stand der Forschung hinsichtlich Deponie-Oberflächenabdichtungen kurz dargestellt. Anschließend wird der Bau der Versuchsfelder nochmals im Überblick beschrieben. Schwerpunkt des Schlussberichts sind die Präsentation und die Interpretation der Messergebnisse der Langzeituntersuchungen, die in den Versuchsfeldern seit 10 bzw. 13 Jahren durchgeführt werden. Die Untersuchungsergebnisse werden mit anderen Forschungsergebnissen verglichen und ermöglichen generelle Folgerungen für die Wirksamkeit und für den Aufbau von Deponie-Oberflächenabdichtungen.

2.2 Aufgabenstellung für die Versuchsfelder E 35 und E 50

Deponien sind in der Stilllegungsphase mit einer Oberflächenabdichtung zu versehen. In den früheren Regelwerken zu Deponieabdichtungen (TA Abfall, TASI, Deponieverordnung 2002) ist für Oberflächenabdichtungen als Regel-Dichtungsschicht jeweils eine mineralische Abdichtung vorgesehen – entweder als einziges Dichtungselement (für DK I) oder in Kombination mit einer Kunststoffdichtungsbahn (für DK II und DK III). In der Neufassung der Deponieverordnung (2009) gibt es nicht mehr die Festlegung auf ein Regelsystem. Statt dessen wird, allgemeiner formuliert, ein Oberflächenabdichtungssystem mit einer Abdichtungskomponente (für Deponieklasse I) bzw. mit zwei Abdichtungskomponenten (für Deponieklasse II und III) vorgeschrieben.

Für Oberflächenabdichtungen von Deponien der Klasse DK I und DK II müssen mineralische Abdichtungskomponenten dabei einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k \leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s einhalten oder im 5-jährigen Mittel nicht mehr als 20 mm/Jahr Durchfluss aufweisen. Nach den Anforderungen der DepV (2009) zum Stand der Technik muss die Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren nachgewiesen sein. In diesem Zusammenhang dienen die Langzeitbeobachtungen der Versuchsfelder auf der Deponie „Im Dienstfeld“ dazu, die Funktionsfähigkeit unterschiedlicher Oberflächenabdichtungssysteme ohne Kunststoffdichtungsbahn über einen Zeitraum von mehrerer Jahreszyklen und Vegetationsperioden zu testen.

Aus der DepV (2009) ist noch ein weiterer Aspekt der Aufgabenstellung abzuleiten: Gemäß Anhang 1, Nr. 2.3 DepV ist bei Deponien der Klasse I, II und III, deren Oberflächenabdichtungssystem ohne Konvektionssperre hergestellt wird, ein „Kontrollfeld von wenigstens 300 m² Größe an repräsentativer Stelle im Oberflächenabdichtungssystem einzurichten, mit dem der Durchfluss durch das Oberflächenabdichtungssystem bestimmt werden kann. Das Kontrollfeld ist bis zum Ende der Nachsorgephase zu betreiben.“ Die Versuchsfelder E 35 und E 50 entsprechen hinsichtlich ihrer Größe und messtechnischen Ausstattung diesen Kontrollfeldern gemäß DepV. Hier werden somit hinsichtlich der Messgeräte und Datenaufzeichnungseinheiten im langjährigen Dauereinsatz Erfahrungen gewonnen, auf die man in der Praxis zurückgreifen kann.

Im Versuchsfeld E 50 wird ein Oberflächenabdichtungssystem mit Geokunststoffen (Bentonitmatte und Dränmatte) getestet. Dabei werden die Eigenschaften der einzelnen Komponenten und die langfristige Wirksamkeit des Gesamtsystems untersucht. Im Vordergrund stehen die Messung der Wasserabflüsse der einzelnen Funktionsschichten (Dränmatte; Bentonitmatte), sowie in-situ-Messungen des Wassergehalts in der Rekultivierungsschicht und in der Bentonitmatte. Das Versuchsfeld wurde im Jahr 1998 errichtet. Hier liegt inzwischen eine ca. 13-jährige Messreihe vor.

Im Versuchsfeld E 35 wird ein mineralisches Oberflächenabdichtungssystem mit einer 1,5 m bzw. 2,0 m dicken Rekultivierungsschicht getestet. Im Mittelpunkt stehen die Abflussmessungen (Oberflächenabfluss, Dränschichtabfluss und Durchsickerung der mineralischen Dichtung) in den 2 Teilfeldern des Großlysimeters. Daneben sind in den Versuchsfeldern in-situ-Messgeräte

zur Registrierung der Bodenfeuchte und –temperatur vorhanden. Das Versuchsfeld wurde im Jahr 2001 errichtet. Hier liegen inzwischen ca. 10-jährige Messreihen vor.

2.3 Standortbeschreibung der Deponie „Im Dienstfeld“ / Aurach

Die Deponie „Im Dienstfeld“ liegt ca. 2 km westlich der Ortschaft Aurach (Landkreis Ansbach); siehe Übersichtslageplan, **Anlage 1.1**. Die Deponie diente von 1981 bis 1998 als Hausmülldeponie des Landkreises Ansbach. Auf einer Fläche von ca. 10 ha wurden ca. 1 Mio. t Abfälle abgelagert.

Derzeit ist die Deponie überwiegend mit temporären Oberflächenabdeckungen versehen. Der größte Teil der Deponieoberfläche ist zur Minimierung der Sickerwasser-Neubildung mit Folie bzw. Kunststoffdichtungsbahnen abgedeckt. Die älteren Bauabschnitte I und II sind teilweise noch mit einer rein mineralischen Oberflächenabdeckung versehen.



Abbildung 2-1: Luftbild der Deponie „Im Dienstfeld“. Die Deponie ist überwiegend mit Folie temporär abgedichtet. Pfeile: Lage der Versuchsfelder E 35 (roter Pfeil) und E 50 (grüner Pfeil).

Der Standort der Deponie „Im Dienstfeld“ ist auch aus klimatischen Gründen gut für das Projekt geeignet, da er mit einem mittleren Jahresniederschlag von ca. 750 mm als annähernd repräsentativ für weite Teile Bayerns und Westdeutschlands gelten kann.

Tabelle 2-1: Standortdaten der Deponie „Im Dienstfeld“ / Aurach.

Geographische Lage (Länge / Breite)	10° 23' Ost; 49° 15' Nord
Höhe über NN	ca. 500 m
Exposition; Hangneigung	Süd; ca. 20% Neigung
Jahres-Mitteltemperatur	9°C
mittlerer jährlicher Niederschlag	750 mm
mittlere jährliche potenzielle Verdunstung	550 mm

3 Stand der Forschung

3.1 Vorbemerkung

Bis zur Einführung der DepV (2009) war der Stand der Technik zu Deponieabdichtungen im Wesentlichen in der TASI sowie in den GDA-Empfehlungen verankert. Forschungsarbeiten zu Deponieabdichtungen wurden überwiegend im Rahmen der Beurteilung der Gleichwertigkeit alternativer Abdichtungen (bzw. –Komponenten) im Sinne der DIBt-Grundsätze (1995) durchgeführt. Die publizierten Forschungsarbeiten betreffen Laboruntersuchungen, Aufgrabungen und eine Anzahl von Testfeld-Untersuchungen.

Die DepV (2009) stellt an den Stand der Technik bezüglich der Abdichtungssysteme die Anforderung, dass „die Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems ... über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren nachgewiesen ist.“ - Diese Anforderung an den Stand der Technik geht bezüglich der meisten mineralischen Abdichtungskomponenten der Oberflächenabdichtungssysteme deutlich über das hinaus, was derzeit als Stand der Forschung gelten kann.

Deponie-Oberflächenabdichtungen sind als ein Gesamtsystem zu verstehen, in dem

- Klimatische Standortgegebenheiten
- Böschungsneigung
- Vegetation
- Art und Dicke der Rekultivierungsschicht
- Art und Qualität der Dichtungsschichten
- Mechanische und physikalische Eigenschaften des Deponiekörpers
- Einwirkungen durch die Folgenutzung

in ihren wechselseitigen Wirkungen betrachtet und aufeinander abgestimmt werden müssen.

Die Forschungsaktivitäten zu Deponieabdichtungssystemen bedienen sich unterschiedlicher, einander ergänzender Methoden, um Kenntnisse zur Funktion der Systeme zu gewinnen. Gängige Verfahren sind: Aufgrabungen von Deponieabdichtungen, Laborstudien, numerische Modellierungen, Versuchsfelder, Auswertung von Deponiedaten. Nachfolgend wird der Stand der Forschung zu mineralischen Abdichtungskomponenten und zu Bentonitmatten dargestellt.

3.2 Mineralische Abdichtungskomponenten

Mehrere Untersuchungen haben gezeigt, dass unzureichend geschützte mineralische Abdichtungsschichten an Deponieoberflächen aufgrund von Austrocknungsvorgängen innerhalb weniger Jahre in ihrer Wirksamkeit erheblich nachlassen können. Bundesweite Forschungsergebnisse hierzu sind im Tagungsband zum Symposium „Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen“ der UAG 7 des AK 6.1 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik zusammengefasst (Ramke et al, 2002). Gründe für das Funktionsversagen mineralischer Dichtungsschichten sind vor allem:

- Durchwurzelung der mineralischen Dichtungsschicht mit der Folge des Wasserentzugs aus der Dichtungsschicht durch die Pflanzenwurzeln,
- kapillarer Wasseraufstieg aus einer mineralischen Dichtungsschicht in eine unmittelbar darüber angeordnete Rekultivierungsschicht,
- Austrocknung der mineralischen Dichtungsschicht infolge von konvektivem Wasserdampftransport in der Entwässerungsschicht.
- Schrumpfriss-Anfälligkeit des mineralischen Dichtungsmaterials bei zu hohem Einbauwasser-gehalt.

Über die Ergebnisse mehrerer Großlysimeter-Versuchsfelder auf Deponien berichtet Behling (2007) in Form einer vergleichenden Zusammenfassung. Die Testfelderergebnisse zeigen, dass bei Oberflächenabdichtungen (nach DK I) mit intakten tonmineralischen Dichtungsschichten die Durchsickerung in der Regel unter 20 mm/Jahr liegt. Bei den Versuchsfeldern mit einer Rekultivierungsschichtdicke von 1,0 m oder darunter nimmt die Durchsickerung nach 3 – 5 Jahren zu meist irreversibel zu.

Die Wirksamkeit bestehender mineralischer Oberflächenabdichtungen wurde im LfU-Projekt 3260 „Statistische Auswertung des Sickerwasseranfalls auf bayerischen Deponien“ untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Sickerwasserneubildung mineralisch endabgedichteter Deponien in der Größenordnung von 15% vom Niederschlag liegt (Huber et al, 2002). Dies betrifft neben Altdeponien mit einfacher Abdeckung auch Deponien mit definierten Oberflächenabdichtungen mit Entwässerungsschicht und mineralischer Dichtungsschicht.

Inzwischen herrscht Konsens darüber, dass die langfristige Funktionsfähigkeit tonmineralischer Abdichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungssystemen durch geeignete Randbedingungen erhöht werden kann. Eine ausführliche Darstellung der bodenmechanischen Faktoren, die die Langzeitbeständigkeit von tonmineralischen Dichtungskomponenten beeinflussen, gibt der LANUV-Fachbericht 25 (2010).

Material-Parameter:

- Gemischtkörnige Abdichtungen sind weniger anfällig für Trockenrisse als feinkörnig-tonmineralische Abdichtungen (z.B. Horn, 1998).
- Je höher der Tonanteil und je höher der Anteil an quellfähigen Tonmineralen (z.B. Bentonit), desto größer ist der Gefahr der Bildung von Schrumpfrissen.

Einbaubedingungen:

- Wenn Dichtungsschichten aus einem natürlichen Ton oder Lehm eingebaut werden, sollte der Einbauwassergehalt geringfügig unter dem Proctorwassergehalt liegen, um die Anfälligkeit für Trockenrisse zu minimieren. Zur Erzielung der erforderlichen, geringen Wasserdurchlässigkeit ist hierbei die Verdichtungsenergie zu erhöhen (Vielhaber et al, 2006).

Schichtenaufbau:

- Überlagerung der mineralischen Dichtungsschicht mit einer Wasser speichernden Sandschicht als unterem Teil der Entwässerungsschicht zur Hemmung eines Wasserverlusts durch konvektive Luftströmung (z.B. Witt, 2007) .
- Dimensionierung der Rekultivierungsschicht in einer Mächtigkeit von mindestens 1,5 m, (in Abhängigkeit vom geplanten Bewuchs und dessen Wurzeltiefe auch darüber) mit dem Ziel, Trockenstress auf die mineralische Dichtung zu vermeiden (z.B. Wattendorf et al, 2005).

Die sich daraus ergebenden Anforderungen sind auch in die Regelwerke

- LfU-Deponie-Info – Merkblatt 1 „Mineralische Deponieabdichtungen“ und
 - LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“: Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 5-1 „Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten aus natürlichen Baustoffen“
- eingeflossen.

3.3 Bentonitmatten

Bentonitmatten (geosynthetische Tondichtungsbahnen) sind fabrikgefertigte Verbundstoffe aus Kunststoffen und Bentonit. Üblicherweise sind Bentonitmatten dreischichtig aufgebaut: Zwischen einem untenliegenden Trägergeotextil und einem obenliegenden Deckgeotextil befindet sich eine Schicht aus Bentonit (in Pulver- oder Granulatform). Die Geotextilien sind durch die Bentonitschicht hindurch miteinander vernäht oder vernadelt, wodurch das Bentonitmaterial fixiert wird und die Bentonitmatte Stabilität und Scherfestigkeit erhält. Bentonitmatten werden als Abdichtungskomponenten im Deponiebau und in weiteren Anwendungen (Dammbau, Wasserbau etc.) eingesetzt.

Je nach der Ionenbelegung in den Bentoniten spricht man von Natrium-Bentonit oder Calcium-Bentonit. Na-Bentonit hat ein höheres Quellvermögen und dem entsprechend günstigere abdichtende Eigenschaften als Ca-Bentonit. Regelmäßig wird festgestellt, dass bei Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungssystemen innerhalb weniger Jahre ein Ionenaustausch (Na → Ca) stattfindet (z.B. Egloffstein, 2000; Meer & Benson, 2007). Dieser Ionenaustausch geht einher mit Veränderungen der geotechnischen Eigenschaften des Bentonits (geringeres Quellvermögen, höhere Durchlässigkeit).

Die Funktionsfähigkeit von Bentonitmatten hängt entscheidend davon ab, dass die Bentonitfüllung nicht austrocknet und dabei irreversibel geschädigt wird (durch Bildung von Trockenriss-Strukturen). In Feldversuchen auf der Deponie Georgswerder waren unter einer Überdeckung von nur 0,45 m irreversible Rissbildungen aufgetreten (Melchior, 2002).

Es herrscht in der Literatur kein Konsens, ob bei ausreichender Überdeckung oder bei entsprechend fester Vernadelung der Bentonitmatte eine Austrocknung reversibel sein kann. Müller-Kirchenbauer (2009) berichtet von Lysimeterversuchen, die auf dem Gelände eines Bentonitmatten-Herstellers durchgeführt wurden. Die Abflussmessungen werden dahingehend interpretiert, dass bei 1,0 m Auflast durch die Rekultivierungsschicht eine Risschließung bei Wiederbefeuchtung der Bentonitmatte stattfindet. Die gemessenen Durchsickerungen der Bentonitmatten liegen überwiegend bei < 10 mm/Jahr. Allerdings zeigt sich auch in diesem Lysimetern die Tendenz, dass sich nach einigen Jahren die Durchsickerung erhöht.

Bei Aufgrabungen in den USA wurde mehrfach beobachtet, dass aufgrund von Ionenaustausch und irreversiblen Austrocknungserscheinungen die Durchlässigkeit von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen um mehrere Zehnerpotenzen gegenüber dem frischen Produkt anstieg (Meer & Benson, 2007).

Der Austrocknungs- und Durchwurzelungsschutz lässt sich – für die gemäß DepV zu betrachtenden 100 Jahre – am sichersten mittels einer Kunststoffdichtungsbahn erreichen. Für Oberflächenabdichtungssysteme mit Bentonitmatten ohne KDB gibt die LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ im Anhang 2 der Bentonitmatten-Grundsätze Hinweise für „Schutzmaßnahmen gegen schädliche Wasserspannungen in Bentonitmatten“ (Überlagerung mit einer wasserspeichernden Sandschicht [Mindestdicke 10 cm] sowie mit einer ausreichend dimensionierten Rekultivierungsschicht [Mächtigkeit > 1,50 m; nutzbare Feldkapazität mind. 200 mm]).

4 Beschreibung des Versuchsfeldes E 35

4.1 Planung des Versuchsfeldes E 35

4.1.1 Grundsätzliche Überlegungen

Im Versuchsfeld E 35 (Projektphase ab 2001) sollte ein Deponieoberflächenabdichtungssystem mit mineralischer Dichtungsschicht entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik eingebaut und beobachtet werden. Das Ziel der Untersuchungen ist es, im Großversuch die langfristige Wirksamkeit eines rein mineralischen Oberflächenabdichtungssystems nachzuweisen, das zugleich kostengünstig, praxisnah realisierbar und nachhaltig wirksam ist.

Die Planung des Versuchsfeld-Aufbaus, die Auswahl der Materialien für die Schichten des Abdichtungssystems sowie die Grundzüge der messtechnisch zu erfassenden Größen wurden vorab mit dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz abgestimmt.

Zum Zeitpunkt der Planung des Versuchsfeldes im Jahr 2001 waren die AbfAbIV und die TASI die gültigen Regelwerke; im Jahr 2002 kam die DepV (2002) hinzu. Seit 2009 gilt nunmehr anstelle dieser Vorschriften die neue DepV. In den nachfolgenden Kapiteln wird auf beide Regelwerke Bezug genommen.

4.1.2 Mineralische Dichtungsschicht

Die mineralische Dichtungsschicht hat vor allem die Aufgabe, das Eindringen von Niederschlagswasser in den Deponiekörper weitestgehend zu minimieren. An das Material für die mineralische Dichtungsschicht werden im Anhang E der TA Abfall definierte Anforderungen gestellt. Die Material- und Einbauparameter nach Anhang E, Ziff. 1 entsprechen teilweise jedoch nicht mehr dem Stand der Forschung: Die Beobachtungen von Austrocknungsphänomenen an mineralischen Dichtungsschichten in Oberflächenabdichtungen haben dazu geführt, dass insbesondere der Gehalt hoch quellfähiger Tonminerale und der Einbauwassergehalt kritisch hinterfragt werden (vgl. Ramke et al, 2002). Ein hoher Anteil hoch quellfähiger Tonminerale und ein hoher Einbauwassergehalt w (mit: $w_{Pr} < w < w(0,95)$) führen zwar zu sehr geringen Wasserdurchlässigkeiten im frisch eingebauten Dichtungsmaterial, gleichzeitig ist dieses Material aber bei Verringerung des Wassergehalts anfällig für die Bildung von Schrumpfrissen.

Um die Gefahr der Rissbildung zu verringern, wird der Einbau des Dichtungsmaterials mit einem Wassergehalt von bis zu 2% unter dem optimalen Wassergehalt empfohlen. Zur Erreichung der erforderlichen geringen Wasserdurchlässigkeit ist gegebenenfalls die Verdichtungsenergie zu erhöhen. Bezüglich der Plastizität des Materials werden leicht- bis mittelplastische Tone empfohlen.

Ein weiterer Aspekt für die Materialauswahl mineralischer Dichtungsschichten ist die Fähigkeit der Riss-Sicherheit bzw. Selbstheilung, die im Zuge des BayFORREST-Projekts F 84 an der Universität der Bundeswehr, München, untersucht wurde (Schick, 1995; Wunsch, 1997). Es wurde festgestellt, dass mittel- und leichtplastische Tone günstige Voraussetzungen für die Selbstheilung von Rissen bieten.

4.1.3 Entwässerungsschicht

Die Entwässerungsschicht hat vor allem die Aufgabe, das durch die Rekultivierungsschicht hinabgesickerte Wasser seitlich abzuführen und einen Wasseraufstau auf der mineralischen Dichtungsschicht zu verhindern. In der TASI und in der Deponieverordnung wird hierfür eine Schichtdicke von 0,3 m und ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k > 1 \cdot 10^{-3}$ m/s genannt. Darüber hinaus gibt es im Anhang E der TA Abfall Materialanforderungen an Entwässerungsschichten (Kornverteilung 16/32 mm oder vergleichbar; gewaschenes Kiesmaterial mit CaCO_3 - Gehalt $< 20\%$), die ursprünglich für das Entwässerungssystem an der Basis von Sonderabfalldeponien gedacht sind, aber über Querverweise in den Regelwerken auch für die Flächendränage im Oberflächenabdichtungssystem von Siedlungsabfalldeponien zugrunde gelegt würden.

Im Versuchsfeld werden hier neue Wege beschritten: Ziel ist es, zu zeigen, dass unter Einsatz von geeigneten Recycling-Baustoffen kostengünstige und Ressourcen schonende Alternativen zum gewaschenen, karbonatarmen 16/32er Kies vorhanden sind. Der Einsatz von Recyclingmaterial für die Entwässerungsschicht war gemäß BayLFW-Merkblatt Nr. 3.6/5 (01.03.2000) bei Einhaltung der entsprechenden Richtwerte im Eluat zulässig. Aktuell müssen Deponieersatzbaustoffe die entsprechenden Zuordnungswerte des Anhangs 3 DepV einhalten.

4.1.4 Rekultivierungsschicht

An die Rekultivierungsschicht wird die grundsätzliche Anforderung gestellt, dass sie als Pufferschicht für den Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtung dienen soll. Vor allem muss durch geeignete Mächtigkeit und Materialauswahl dafür Sorge getragen werden, dass eine Austrocknung der darunter liegenden mineralischen Dichtungsschicht langfristig verhindert wird. Hierfür gibt es eine Reihe von theoretischen Überlegungen und Empfehlungen: Bezüglich der Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht werden in der neueren Literatur Werte von > 1,5 m bis zu 3 m genannt.

Bei der Materialauswahl wird die nutzbare Feldkapazität in den Vordergrund gestellt; als ideal gelten Lössböden und andere schluffreiche Böden mit einem großen Anteil an Mittelporen. Zur optimalen Entfaltung dieser Porenstruktur wird empfohlen, die Rekultivierungsschicht mit möglichst geringer Verdichtung einzubauen (GDA-Empfehlung E 2-31).

Im neuen Versuchsfeld werden diese Anforderungen im Rahmen des technisch Machbaren und wirtschaftlich Vertretbaren umgesetzt. Um den Effekt von unterschiedlichen Mächtigkeiten der Rekultivierungsschicht auf die Wirksamkeit des Abdichtungssystems zu untersuchen, wird das Versuchsfeld in zwei Teilfelder mit unterschiedlicher Rekultivierungsschicht-Dicke (1,5 m bzw. 2,0 m) geteilt.

4.2 Profilaufbau des Versuchsfeldes E 35

Das Versuchsfeld wurde in der für das Projekt E 35 im Jahr 1996 errichteten, mit einer KDB wasserdicht ausgebildeten Sickerwasser-Auffangwanne von 520 m² Größe auf der Böschungsfanke angelegt. Das Versuchsfeld wurde entlang der Falllinie in 2 Teilfelder à 260 m² unterteilt, die identisch aufgebaut sind und sich nur in der Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht unterscheiden (1,5 m bzw. 2,0 m). Der neue Profilaufbau des Versuchsfeldes ist nachfolgend (von unten nach oben) beschrieben:

- Sickerwasser-Auffangsystem (Dränmatte mit darunter liegender KDB),
- 0,5 m mineralische Dichtungsschicht ($k < 5 \cdot 10^{-9}$ m/s; Einbauwassergehalt $\leq w_{Pr}$),
- 0,3 m mineralische Entwässerungsschicht (geeignetes Recycling-Material),
- Trennvlies,
- 1,3 m bzw. 1,8 m Rekultivierungsschicht (Unterboden mit hoher Feldkapazität),
- 0,2 m Rekultivierungsschicht (Oberboden mit Gras-Vegetation).

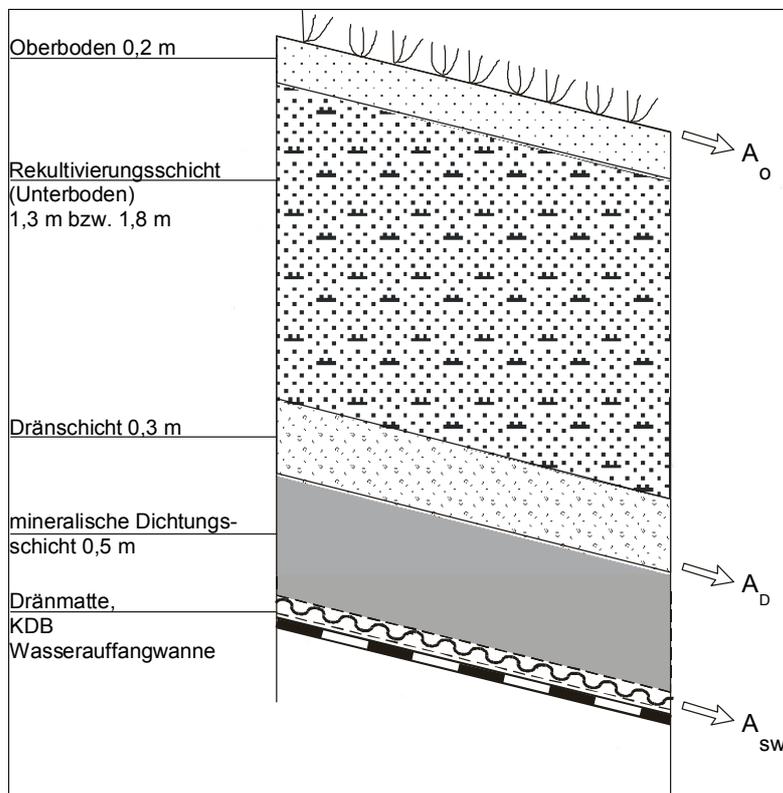


Abbildung 4-1: Profilaufbau des neuen Versuchsfeldes E 35-F

4.3 Auswahl der Materialien für das Versuchsfeld E 35

Die Auswahl der mineralischen Materialien für den Bau des Oberflächenabdichtungssystems im Versuchsfeld erfolgte gemäß den Vorgaben nach Anhang E der TA Abfall sowie den Empfehlungen der LAGA und der GDA. Dazu wurden an den einzusetzenden Erdstoffen Eignungsprüfungen durchgeführt.

4.3.1 Mineralische Dichtungsschicht des Versuchsfeldes E 35

Als Material für die mineralische Dichtungsschicht wurde Ton aus der Tongrube Wendelein bei Sommersdorf an der Altmühl (Landkreis Ansbach) herangezogen. Geologisch handelt es sich um verwitterte Ton-Schluffsteine der Lehrbergschichten, einer Formation des Mittleren Keuper.

An dem Material wurden die folgenden Eignungsuntersuchungen durchgeführt:

- Korngrößenverteilung,
- Zustandsgrenzen,
- Trockendichte,
- Proctorversuch,
- Wasserdurchlässigkeit,
- Kalkgehalt.

Die wichtigsten Ergebnisse der geotechnischen Untersuchungen an den Materialien sind der nachfolgenden **Tabelle 4.2** zusammengefasst. Das Material ist als sandiger, schluffiger Ton bzw. mittelplastischer Ton anzusprechen. Der k-Wert bei Einbau bei 95% D_{Pr} auf der trockenen Seite beträgt $9,0 \cdot 10^{-10}$ m/s. Der von der TASI und der Deponieverordnung für DK I und DK II geforderte k-Wert ($k \leq 5 \cdot 10^{-9}$ m/s) wird eingehalten. Die Untersuchungsergebnisse sind **Anlage 2.2** dokumentiert.

Tabelle 4-1: Ergebnisse der geotechnische Laborversuche zur Eignungsprüfung für die mineralische Dichtungsschicht.

Parameter		Tongrube Wendelein, Sommersdorf
Korngrößenverteilung	Kornkennziffer	3 5 2 0 0
	Feinstkorn-Anteil (<2 μ m)	25%
Zustandsgrenzen	Ausrollgrenze	20,44%
	Plastizitätszahl	21,07%
Proctorversuch	Proctordichte	1,82 g/cm ³
	Min/max Wassergehalt bei 95% D_{Pr}	11,9% / 19,7%
Wasserdurchlässigkeit	K_{10} bei 95% D_{Pr} ("trockener Ast")	$9,0 \cdot 10^{-10}$ m/s
Glühverlust		3,54%
Kalkgehalt		6,4%

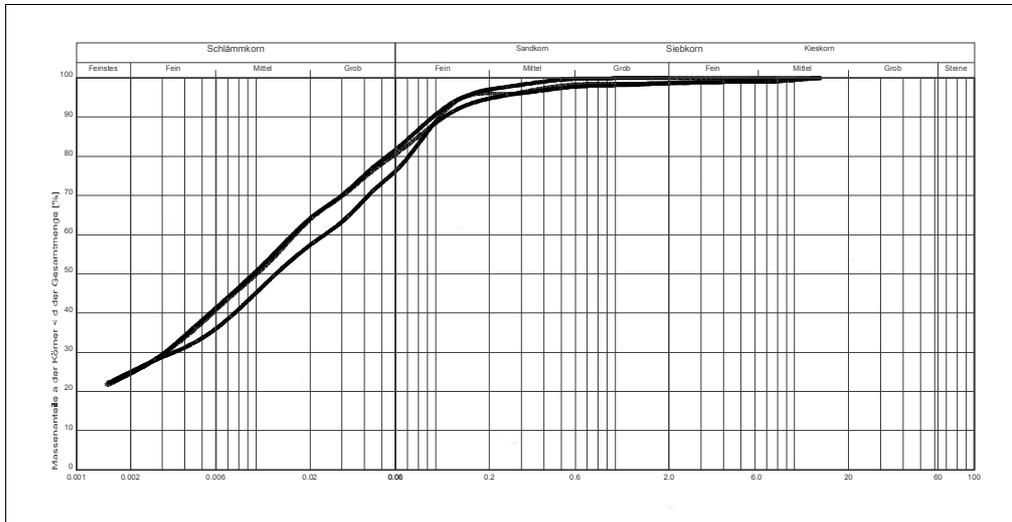


Abbildung 4-2: Korngrößenverteilung des Materials der mineralischen Dichtungsschicht.

4.3.2 Entwässerungsschicht des Versuchsfeldes E 35

Zur Eignungsuntersuchung als Dränschicht-Material wurden bei einem Baustoff-Recyclingbetrieb verschiedene Bauschutt-Recyclingprodukte (Recycling-Baustoff (RC-Mix) unterschiedlicher Siebschnitte, Beton-Recycling-Baustoff, Ziegel-Recycling-Baustoff) in Augenschein genommen und einer Vorauswahl unterzogen. Kriterien für die Vorauswahl waren:

- Verfügbarkeit von großen Materialmengen
- Homogenität des Materials (zugesichert durch Güteüberwachung)
- Einhaltung der "Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für die einzuhaltenden wasserwirtschaftlichen Güteermere bei der Verwendung von Recyclingbaustoffen im Straßenbau in Bayern" (vom 17.11.1992 und 31.01.1995),
- Einhaltung der Z 1.1 - Werte nach LAGA-Richtlinie 20

Aufgrund der Kornfestigkeit und der zu erwartenden gleichbleibenden Qualität (auch im Hinblick auf eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Recyclingbaustoff-Anbieter) wurde ein abgeseibtes Beton-Recyclingmaterial 5/45 mm zur Anwendung für die Entwässerungsschicht ausgewählt.

Im Geotechnik-Labor der LGA wurde die Korngrößenverteilung untersucht und die Wasserdurchlässigkeit bestimmt. Die wichtigsten Untersuchungsergebnisse sind in der nachfolgenden **Tabelle 4.3** zusammengefasst

Tabelle 4-2: Ergebnisse der Eignungsuntersuchungen für das Material der Entwässerungsschicht.

Material	Kornkennziffer	Kornfraktion < 2mm	Schlammkornanteil (< 0,06 mm)	k-Wert (m/s)
Beton-RC 5/45	0 0 1 9 0	9,7%	2,5%	4,6 * 10 ⁻²

4.3.3 Rekultivierungsschicht des Versuchsfeldes E 35

Für die Rekultivierungsschicht werden, insbesondere bei einem 1,5 m bis 2,0 m mächtigen Aufbau, erhebliche Materialmengen benötigt. Daher sollte zunächst geprüft werden, ob das örtlich auf dem Boden-Lager neben der Deponie "Im Dienstfeld" vorrätige Material den aktuellen Anforderungen an Rekultivierungsschicht-Substrate genügt. Die entsprechenden geotechnischen und bodenkundlichen Untersuchungen wurden bereits im Zuge der früheren Projektphase des Vorhabens E 35 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 4.4** zusammengefasst.

Tabelle 4-3: Geotechnische und bodenkundliche Charakterisierung des Bodenmaterials für die Rekultivierungsschicht.

Parameter	Rekultivierungsschicht	
Korngrößenverteilung	Tongehalt (< 2 µm)	6% - 14%
	Schlammkorn (< 0,06 mm)	16% - 38%
	Kornkennziffern	1 3 5 1 0 bzw. 1 1 7 1 0
Bodenart	(nach AG Boden)	SI 3 (lehmiger Sand), bzw. SI 4 (stark lehmiger Sand)
Zustandsgrenzen	Fließgrenze	35% - 40%
	Ausrollgrenze	15% - 19%
	Schrumpfgrenze	13% - 14%
Nutzbare Feldkapazität	(nach AG Boden)	145 - 225 [mm/m]

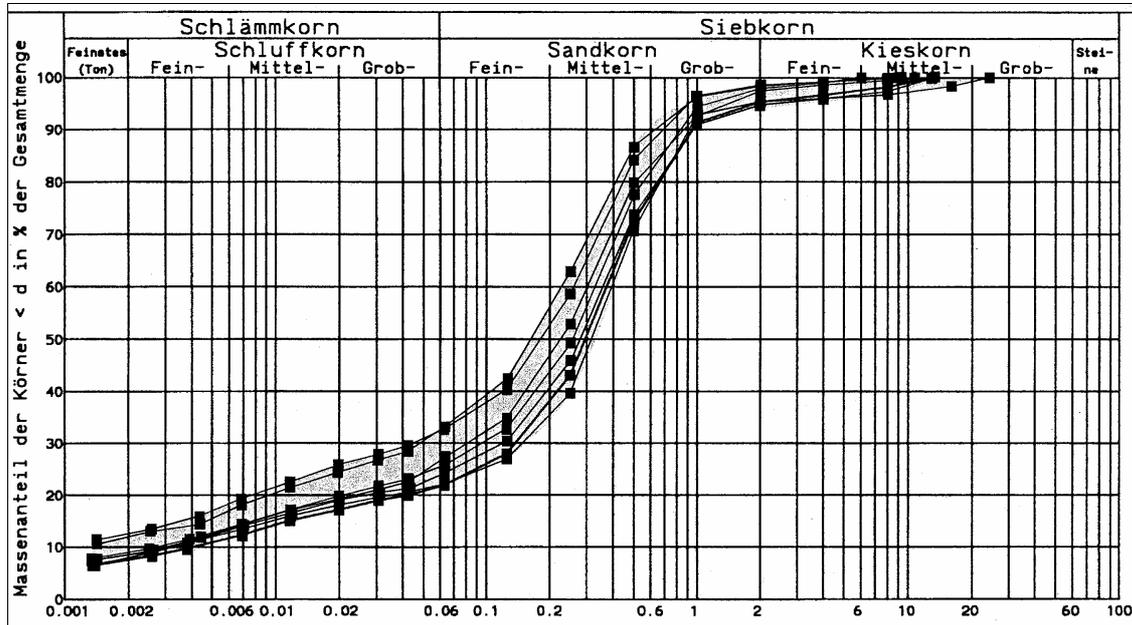


Abbildung 4-3: Kornverteilung des Bodenmaterials der Rekultivierungsschicht.

Ein wesentliches Kriterium für die Eignung eines Bodens als Material für die Rekultivierungsschicht ist die Fähigkeit, Niederschlagswasser im Winterhalbjahr zwischenspeichern und im Sommerhalbjahr pflanzenverfügbar abzugeben. Eine wichtige Kenngröße hierfür ist die nutzbare Feldkapazität. Je nach Dichte des Bodens ist für den am Standort Aurach vorhandenen lehmigen Sand nach den Tabellen der Bodenkundlichen Kartieranleitung eine nutzbare Feldkapazität (nFK) von 145 - 225 mm/m zu erwarten.

Nach Anhang 5, DepV (2002) sollten Rekultivierungsschichten eine „hohe nutzbare Feldkapazität“ haben. In der DepV (2009) wird die Angabe zur nFK der Rekultivierungsschicht zahlenmäßig konkretisiert: Das Material soll eine nFK von wenigstens 140 mm, bezogen auf die Gesamtdicke der Rekultivierungsschicht, aufweisen. Diese Anforderung wird vom eingesetzten Material erfüllt.

4.4 Bau des Versuchsfeldes E 35

Die Errichtung des Versuchsfeldes mit dem neuen Profilaufbau erfolgte in der Zeit von September bis November 2001. Bei der Bauausführung lag ein Haupt-Augenmerk darauf, die zu messenden Wasserabflüsse aus den einzelnen Schichten zuverlässig voneinander getrennt zu erfassen und Umläufigkeiten zu unterbinden. Der Bauablauf wird nachfolgend beschrieben.

4.4.1 Vorbereitende Arbeiten; Kunststoff-Arbeiten

Als Grundlage für das Versuchsfeld diente das im Zuge des Projekts E 35 im Jahre 1996 gebaute, mit Kunststoffdichtungsbahn ausgekleidete Großlysimeter. Da das Versuchsfeld in 2 Teilfelder mit unterschiedlichem Profilaufbau unterteilt werden sollte, musste eine wasserundurchlässige Trennwand zwischen den Teilfeldern errichtet werden. Hierzu wurde eine Wandkonstruktion aus PEHD-Platten (d = 10 mm) in Böschungsrichtung in der Feldmitte gebaut und mit doppelten Sicherungen gegen Umläufigkeiten mit der KDB der Versuchsfeld-Basis verschweißt (vgl. Fotodokumentation, **Abbildung 4-4**).



Abbildung 4-4: Umbau des Großlysimeters für das Versuchsfeld E 35 (September 2001)

An der Vorrichtung zur Wasserableitung an der Versuchsfeld-Basis mussten erhebliche Änderungen vorgenommen werden: Das vom Tiefpunkt des Versuchsfeldes zum Messcontainer verlaufende PEHD-Rohr (d = 200 mm) hatte im bisherigen Versuchsaufbau zur Ableitung des Sickerwasserabflusses gedient. Für den neuen Versuchsaufbau musste dieses Rohr als Hüllrohr für 4 dünnere PEHD-Rohre für 4 zu erfassende Abflusskomponenten (je 2 x Dränabfluss und Sickerwasserabfluss) dienen. Hierzu wurden je 2 verschweißte PEHD-Vollrohre mit 32 mm bzw. 63 mm Durchmesser hergestellt und durch das Hüllrohr bis zum Messcontainer hindurchgeführt.

Zur flächigen Erfassung und Ableitung des Sickerwasserdurchtritts durch die mineralische Dichtungsschicht wurde im Versuchsfeld ein Drän-Geokomposit ausgelegt. Die Auswahl des Produkts erfolgte unter den Gesichtspunkten, dass das Material eine Verdichtung der direkt darauf aufzubringenden mineralischen Dichtungsschicht zulassen müsse und dass trotz Verdichtung und Auflast eine ausreichende Wasserleit-Kapazität erhalten bleiben sollte. Am unteren Feldrand mündet die Flächendränage in ein Kies-ummanteltes PEHD-Dränrohr (Fotodokumentation, **Abbildung 4-5**). Die Kiesummantelung dient hier nicht als Filterschicht, sondern primär zum Schutz des Rohres bei der Verdichtung der darüber aufzubringenden mineralischen Dichtungsschicht.



Abbildung 4-5: Verlegung der Dränmatte zur Wasserableitung unter der mineralischen Dichtung (Okt. 2001)

4.4.2 Einbau der mineralischen Dichtungsschicht

Der Einbau der mineralischen Dichtungsschicht erfolgte am 16.10. und 17.10.2001. Das Dichtungsmaterial wurde per LKW von der Tongrube Sommersdorf antransportiert, außerhalb des Versuchsfeldes abgekippt und mit Hydraulikbagger in Lagenstärke von ca. 30 cm im Versuchs-

feld ausgebracht. Anschließend wurde die Dichtungsschicht mit einer Schafffußwalze (Typ "Rammax RW 1404") dynamisch verdichtet (**Abbildung 4-6**). Danach wurde in gleicher Weise die zweite Lage der mineralischen Dichtungsschicht aufgebracht und verdichtet. Abschließend erfolgte eine Nachverdichtung mit glatter Rüttelplatte, um eine glatte Oberfläche der mineralischen Abdichtung herzustellen.



Abbildung 4-6: Einbau der mineralischen Dichtung (Oktober 2001).

Die erzielte Verdichtung und der Wassergehalt des Dichtungsmaterials jeder verdichteten Lage wurden durch Mitarbeiter des LGA-Grundbauinstituts radiometrisch mittels einer "Troxler-Sonde" überprüft. Die erzielte Trockendichte lag bei 1,76 - 1,85 t/m³, was einem Verdichtungsgrad von 97% bis 102% der Proctordichte entspricht. Zur Absicherung der Ergebnisse wurden aus jeder Lage an 4 Stellen je Teilfeld ungestörte Bodenproben entnommen, die anschließend im Grundbau-Labor der LGA untersucht wurden. Die Untersuchungsergebnisse sind nachfolgend graphisch zusammengefasst.

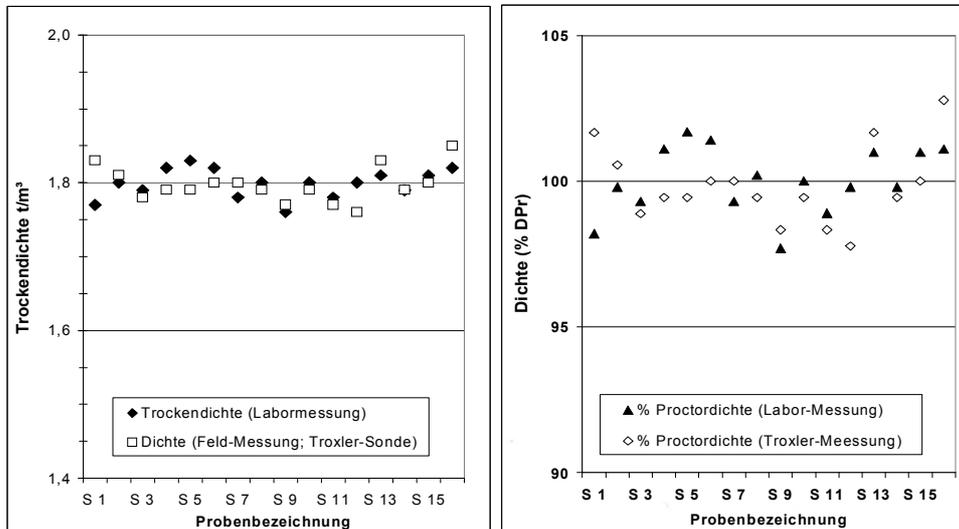


Abbildung 4-7: Qualitätsüberwachung während des Einbaus der mineralischen Dichtungsschicht: Feld- und Laboruntersuchungen der Trockendichte (linke Graphik); Darstellung der erzielten Dichte in % der Proctordichte (rechte Graphik).

Abbildung 4-7 zeigt die Ergebnisse der Dichte-Messungen an den Untersuchungspunkten S1 bis S16 in der Gegenüberstellung der Feldmessungen mittels Troxler-Sonde und der Labormessungen. Es besteht eine gute Übereinstimmung zwischen beiden Messreihen. In der rechten Graphik sind die Feldmessungen und Laboruntersuchungen der Proctordichte der mineralischen Dichtungsschicht dargestellt. Die Einzelwerte streuen zwischen 97% und 103%. Im Mittel liegt die Einbaudichte der mineralischen Dichtungsschicht bei 100% der Proctordichte.

Der Wassergehalt des Dichtungsmaterials beim Einbau betrug im Mittel 15% (Schwankungsbereich 14,4% bis 15,9%). Somit lag der Einbauwassergehalt um ca. 2% unter dem optimalen Wassergehalt von 17%. Die Ergebnisse der Wassergehaltsmessungen sind in **Abbildung 4-8** zusammengefasst. Die rechte Graphik von **Abbildung 4-8** zeigt die Wassergehalt-Trockendichte - Wertepaare der Labormessungen im Zuge der Qualitätsüberwachung. Im gleichen Diagramm ist auch die Proctorkurve des Dichtungsmaterials dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die erzielten Werte „oberhalb des trockenen Astes“ der Proctorkurve liegen. Demnach wurde beim Einbau der Dichtungsschicht eine höhere Verdichtung erzielt als im Proctorversuch.

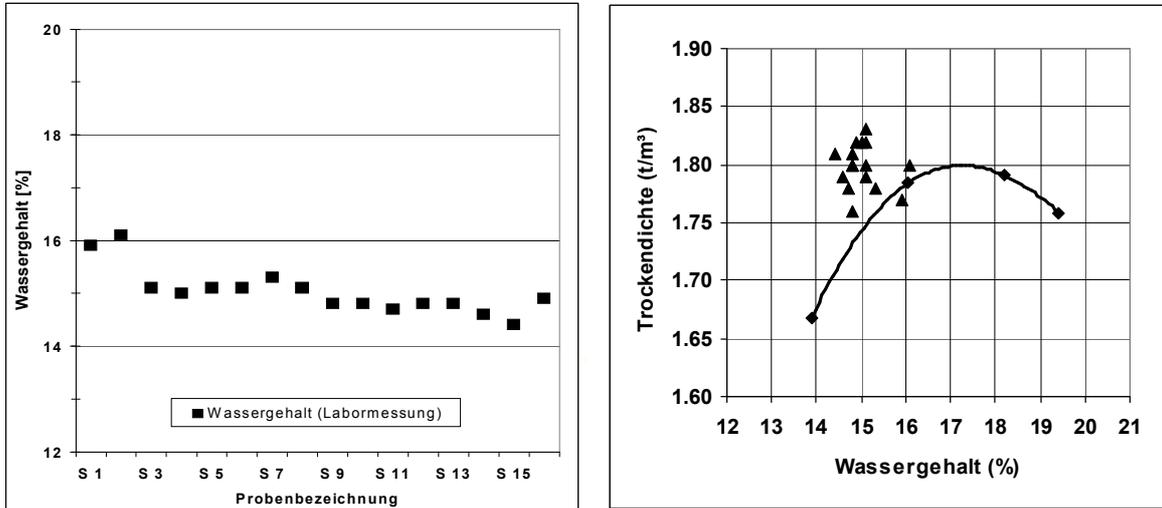


Abbildung 4-8: Qualitätsüberwachung während des Einbaus der mineralischen Dichtungsschicht: Linke Graphik: Labormessungen des Einbau-Wassergehalts. Rechte Graphik: Trockendichte und Wassergehalt der eingebauten mineralischen Dichtung; zum Vergleich: Proctorkurve des gleichen Materials (optimaler Wassergehalt: ca. 17%).

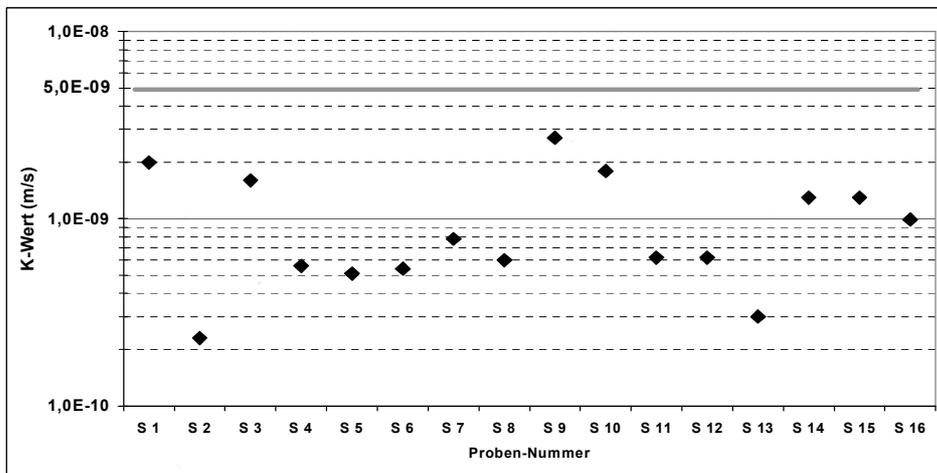


Abbildung 4-9: Qualitätsüberwachung während des Einbaus der mineralischen Dichtungsschicht: Laborbestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts (k-Wert).

An insgesamt 16 ungestörten Bodenproben aus der mineralischen Dichtungsschicht erfolgte im Geotechnik-Labor die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeits-Beiwerts nach DIN 18130 (vgl. **Abbildung 4-9**). Die k-Werte liegen im Bereich von $2 \cdot 10^{-10}$ bis $3 \cdot 10^{-9}$ m/s und halten damit die Vorgabe der TASi ($k < 5 \cdot 10^{-9}$ m/s) ein.

Nach Fertigstellung der mineralischen Dichtungsschicht wurden die Feldränder mit einer Kunststoffbahn (grün) abgedeckt, die bis ca. 30 cm überlappend über die mineralische Dichtungsschicht geführt wurde (**Abb. 4-10**). Diese Maßnahme dient dazu, zu verhindern, dass an den Feldrändern zwischen KDB und mineralischer Dichtungsschicht Wasser hindurch sickern kann, was die Messergebnisse des Sickerwasser-Abflusses verfälschen würde.



Abbildung 4-10: Verlegung von PELD-Dichtungsschürzen zur Unterbindung von Umläufigkeiten.

4.4.3 Einbau der Entwässerungsschicht

Das als Entwässerungsschicht einzubauende Betonrecycling-Material wurde in einer Recyclinganlage in Nürnberg aufbereitet (Siebschnitte > 5 mm und < 45 mm) und per LKW auf die Baustelle zur Deponie "Im Dienstfeld" transportiert. Der Einbau erfolgte mittels Hydraulikbagger in einer Schichtstärke von 30 cm (**Abbildung 4-11**).

Am unteren Rand des Versuchsfeldes mündet die Entwässerungsschicht in ein gelochtes PEHD-Rohr, das als Vollrohr weiterführt zum Messcontainer.



Abbildung 4-11: Einbau der Entwässerungsschicht.

4.4.4 Einbau der Rekultivierungsschicht

Die Rekultivierungsschicht wurde in 2 Lagen eingebaut, wobei die erste Lage ca. 0,5 m stark ist. Die zweite Lage wurde im westlichen Teilfeld (= Teilfeld 1) in einer Stärke von ca. 1,3 m und im östlichen Teilfeld (Teilfeld 2) in einer Stärke von ca. 0,8 m aufgebracht. Das Bodenmaterial wurde mittels LKW vom Boden-Zwischenlager antransportiert, am Feldrand abgekippt und mit einer Moorwalze mit breiten Ketten und geringer Bodenpressung im Versuchsfeld verteilt (vgl. Fotodokumentation, **Abbildung 4-12**).



Abbildung 4-12: Einbau der Rekultivierungsschicht

Die Einbaudichte wurde punktuell mittels Troxler-Sonde gemessen. Sie schwankte zwischen $1,5 \text{ t/m}^3$ und $1,8 \text{ t/m}^3$ und lag im Mittel bei ca. $1,6 \text{ t/m}^3$ (vgl. **Abbildung 4-13**). Die Messungen mit der Troxler-Sonde erfassen jeweils nur die oberen 30 cm der zu untersuchenden Bodenschicht. Dieser Bereich wird durch die Befahrung mit der Moorwalze stärker verdichtet als der tiefere Teil der jeweiligen Bodenschüttung. Es ist daher davon auszugehen, dass mit der gewählten Einbautechnik eine Dichte der Rekultivierungsschicht von $1,45 - 1,65 \text{ t/m}^3$ zu erzielen ist, die nach AG Boden als "mittlere Trockendichte" bezeichnet wird.

Im Mai 2002 wurden im Versuchsfeld Schürfe angelegt zum Einbau von in-situ-Messinstrumenten. Bei dieser Gelegenheit wurden ungestörte Bodenproben entnommen, um die Dichte der Rekultivierungsschicht nochmals zu untersuchen. Die Trockendichte liegt überwiegend zwischen $1,66 \text{ g/cm}^3$ und $1,71 \text{ g/cm}^3$; in einzelnen Proben wurden Trockendichten bis $1,80 \text{ g/cm}^3$ festgestellt (**Abb. 4-13**). Gegenüber dem Einbauzustand hat offensichtlich bereits nach einem halben Jahr eine Konsolidierung und Erhöhung der Trockendichte stattgefunden.

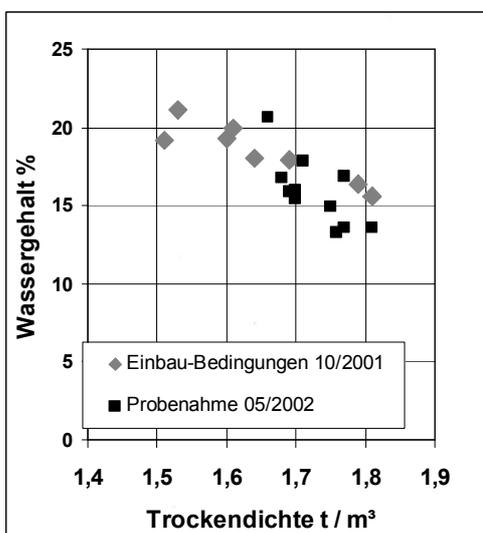


Abbildung 4-13: Qualitätsüberwachung während des Einbaus der Rekultivierungsschicht: Messung der Einbaudichte und des Wassergehalts (graue Rauten). Zusätzlich dargestellt: Dichte und Wassergehalt bei einer Aufgrabung im Mai 2002 (schwarze Quadrate).

4.5 Messtechnische Ausstattung des Versuchsfeldes E 35

Der Wasserhaushalt des Oberflächenabdichtungssystems wird mit verschiedenen, einander ergänzenden Messsystemen untersucht, um die langfristige Wirksamkeit des Abdichtungssystems zu beschreiben und zu beurteilen. Hierfür werden (bzw. wurden) die folgenden Messungen durchgeführt:

- Messung der Wasserabflüsse:
 - Oberflächenabfluss (A_O)
 - Dränabfluss unter der Rekultivierungsschicht (A_D)
 - Sickerwasserabfluss unter der mineralischen Dichtungsschicht (A_{SW})
- Wassergehalt der Bodenschichten (mittels FDR-Messsonden und TDR-Sonden)
- Wasserspannung der Bodenschichten (mittels Tensiometern; inzwischen nicht mehr funktionsfähig)
- Temperatur der Bodenschichten (mittels Thermistoren; inzwischen nicht mehr funktionsfähig)
- Meteorologische Messungen (Niederschlag, Lufttemperatur)

Die **Tabelle 4-4** gibt eine Übersicht der in den Teilfeldern eingesetzten Messinstrumente.

Tabelle 4-4: Übersicht der in den Teilfeldern installierten Messinstrumente

Messinstrument	Mess-Aufgabe	Teilfeld 1	Teilfeld 2
Kippwaagen	Oberflächenabfluss	X	X
	Dränabfluss	X	X
	Sickerwasserabfluss	X	X
FDR-Sonden	Wassergehalt der Rekultivierungsschicht	0,2m; 0,6m; 1,0m; 1,4m; 1,8m	0,2m; 0,6m; 1,0m; 1,4m;
	Wassergehalt der Mineral. Dichtung	2,4m; 2,6m	1,9m; 2,1m
TDR-Sonden	Wassergehalt der Rekultivierungsschicht	-	0,2m; 0,6m; 1,0m; 1,4m;
	Wassergehalt der Mineral. Dichtung	2,4m; 2,6m	1,9m; 2,1m

4.6 Messdatenerfassung

Die Messdaten der in-situ-Messinstrumente sowie der Kippzähler werden in 2 Datenloggern vom Typ "DL-2e" der Firma "Delta-T devices", Cambridge, erfasst. Die Datenlogger sind so eingestellt, dass alle 10 Minuten von jedem Messgerät ein Messwert abgerufen und gespeichert wird.

Die Messdaten werden regelmäßig von den Datenloggern über ISDN-Leitung bzw. per Mobil-Telefonnetz zur LGA nach Nürnberg gesandt. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt in Nürnberg.

Die Messungen liefen im über 9-jährigen Beobachtungszeitraum weitgehend störungsfrei. Im Jahr 2004 und 2006 wurde ein Minderbefund des Dränabflusses im Teilfeld 2 festgestellt, der auf Ausfällungen in der Ablaufleitung zurückzuführen war. Nach Rückspülen der Verbindungsleitung zwischen Versuchsfeld und Messcontainer war der freie Auslauf wieder gewährleistet. Die wichtige Messung der Dichtungsdurchsickerung im Teilfeld 2 ist durch den zeitweise eingeschränkten Dränabfluss nicht beeinträchtigt gewesen.

In den Jahren 2009 – 2010 gab es teilweise Probleme mit der elektronischen Ansteuerung der in-situ-Messinstrumente im Versuchsfeld. Dadurch waren zeitweise keine Messungen der Bodenfeuchte möglich.

In den Jahren 2010 und 2011 sind im Teilfeld 1 die Abflüsse durch die mineralische Dichtung erheblich höher als im Teilfeld 2; gleichzeitig sind die Dränabflüsse niedriger. Die Ursache hierfür ist derzeit unklar; u.U. liegen hier Undichtigkeiten oder Umläufigkeiten vor. Um Klarheit zu gewinnen, ist zu empfehlen, eine Aufgrabung im Bereich der Wasserfassungen am unteren Rand des Versuchsfeldes vorzunehmen. Details hierzu werden in **Kapitel 8.3** vorgeschlagen.

4.7 Beschreibung des Versuchsfeldes E 35 im Zeitraum 2001 – 2011

Das Versuchsfeld E 35 war im Herbst 2001 errichtet worden. Im Laufe von 2 1/2 Jahren, bis zum Frühjahr 2004, hatte sich eine hohe und dichte Gras – Kraut – Vegetation eingestellt. Da der Bewuchs auf der Deponie nicht gemäht oder gepflegt wird, erreichen die Pflanzen eine Höhe von über 1 m. Im Laufe der Zeit siedeln sich unter anderem verschiedene Distel-, Klee- und

Ampferarten an, die als Tiefwurzler bekannt sind. Im Rahmen der Sukzession treten inzwischen auch erste Strauchgewächse (Brombeeren, Wildrosen) auf.

Im Herbst 2008 wurde der Bewuchs auf der gesamten Deponieflanke, auch im Bereich der Versuchsfelder, erstmals gemäht, um die aufkommenden Sträucher und jungen Bäume zu entfernen. Der Bewuchs in den Jahren 2009-2011 erreicht noch nicht wieder die Höhe der Vorjahre.

Die Fotodokumentation der **Abbildungen 4-13 bis 4-17** zeigt den Bewuchs auf dem Versuchsfeld im Verlauf der Jahre 2001 bis 2011.



Abbildung 4-13: Fertiggestelltes Versuchsfeld E 35; November 2001.



Abbildung 4-14: Versuchsfeld E 35 mit Vegetation; Juni 2004.



Abbildung 4-15: Versuchsfeld E 35 mit Vegetation; September 2007.



Abbildung 4-16: Versuchsfeld E 35 mit Vegetation; Juli 2010.



Abbildung 4-17: Versuchsfeld E 35 mit Vegetation; Juli 2011.

5 Beschreibung des Versuchsfeldes E 50

5.1 Aufgabenstellung für das Versuchsfeldes E 50

Die grundsätzliche Aufgabenstellung des Vorhabens E 50 besteht darin, das Langzeitverhalten eines Oberflächenabdichtungssystems mit Geokunststoffen (Bentonitmatte und Dränmatte) im großmaßstäblichen Feldversuch auf einer Deponieoberfläche über einen Zeitraum von mehreren Jahren zu testen. Dabei sollen die Eigenschaften der einzelnen Komponenten und die Wirksamkeit des Gesamtsystems im Verlauf mehrerer Jahreszyklen und Vegetationsperioden untersucht werden. Im Vordergrund stehen die Messung der Wasserabflüsse der einzelnen Funktionsschichten (Dränmatte; Bentonitmatte), sowie in-situ-Messungen des Wassergehalts in der Rekultivierungsschicht und in der Bentonitmatte.

Die Resultate der Untersuchungen des Vorhabens E 50 erlauben die Beurteilung eines wesentlichen Kriteriums des Gleichwertigkeitsnachweises für ein alternatives Dichtungssystem, nämlich die Beurteilung der langfristigen Veränderungen der Wasserdurchlässigkeit bzw. der Dichtigkeit. Andere Aspekte des Gleichwertigkeitsnachweises, wie die Sicherheit gegen chemische und biologische Belastungen, die Dauerbeständigkeit der Geokunststoffprodukte oder die Beurteilung der langfristigen Standsicherheit sind nicht Gegenstand der hier durchgeführten Untersuchungen.

Da das Versuchsfeld E 50 unmittelbar neben dem Versuchsfeld zur Untersuchung einer mineralischen Oberflächenabdichtung (Projekt E 35) errichtet wurde, ist bei identischen Randbedingungen der direkte Vergleich mit der Leistungsfähigkeit einer mineralischen Oberflächenabdichtung möglich.

5.2 Aufbau des Versuchsfeldes E 50

Das zu untersuchende Oberflächenabdichtungssystem ist in eine mit PEHD-Dichtungsbahn ausgekleidete, wasserdichte Wanne von 520 m² Größe eingebaut. Am Versuchsfeld sind Einrichtungen zur Ableitung und Messung der relevanten Wasserabflüsse (Oberflächenabfluss, Dränschichtabfluss, Abfluss unter der Bentonitmatte) vorhanden (= „Großlysimeter“).

Der Schichtenaufbau im Großlysimeter besteht aus einem Oberflächenabdichtungssystem und einem darunter angeordneten Wasserauffangsystem. Der Aufbau des Versuchsfeldes ist in **Abbildung 5-1** gezeigt. Der Aufbau besteht von oben nach unten aus folgenden Schichten:

- Oberflächenabdichtungssystem:
 - Rekultivierungsschicht (Oberboden, mit Bewuchs) 0,2 m
 - Rekultivierungsschicht (Unterboden) 0,8 m
 - Dränmatte (geosynthetische Entwässerungsschicht des Abdichtungssystems)
 - Calcium-Bentonitmatte (Dichtungsschicht)
- Wasserauffangsystem:
 - Ausgleichsschicht (Sand) 0,1 m
 - Dränmatte (zur Ableitung des Sickerwasserabflusses unter der Bentonitmatte)
 - Kunststoffdichtungsbahn (Basis des Wasserauffangsystems)

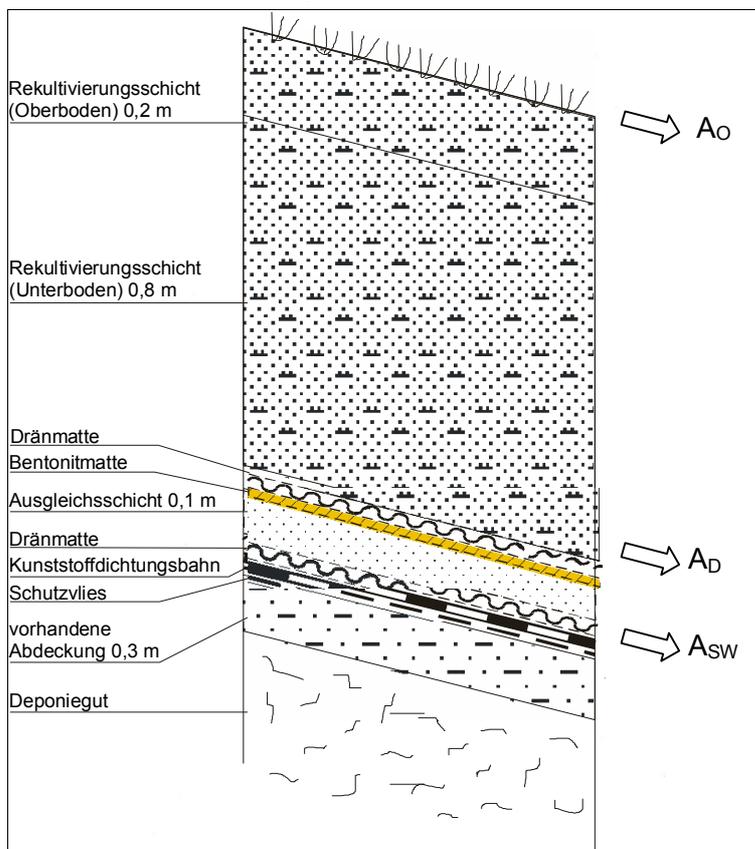


Abbildung 5-1: Profilaufbau des Versuchsfeldes E 50.

Das zu prüfende Dichtungselement ist hier die Bentonitmatte. Die Kunststoffdichtungsbahn ist kein Bestandteil der zu prüfenden Abdichtung, sondern sie ist die Basis des Wasserauffangsystems unterhalb der Bentonitmatte.

Unterhalb der Bentonitmatte ist, entsprechend der Zulassungsbestimmungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) für den Einsatz von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungssystemen (Herold, 1998), eine Ausgleichsschicht aus schwach schluffigem Sand angeordnet. Sie dient dazu, dass die Bentonitmatte nicht unmittelbar auf einer Dränschicht aufliegt (hier: Dränmatte für den Sickerwasserabfluss).

5.3 Beschreibung der Materialien für das Versuchsfeld E 50

5.3.1 Geosynthetische Tondichtungsbahn (Bentonitmatte) im Versuchsfeld E 50

Das zu untersuchende Dichtungselement, und somit der zentrale Bestandteil der zu testenden Oberflächenabdichtung, ist eine Bentonitmatte. Für das Versuchsfeld wurde eine Tondichtungsbahn aus Calcium-Bentonit gewählt, um den bekannten Effekt des Ionenaustauschs (Umwandlung von Natrium-Bentonit in Calcium-Bentonit) von vornherein auszuschließen. Da Calcium-Ionen ein üblicher Hauptbestandteil der Elektrolyte des Bodenwassers sind, sind derartige Ionenaustauschvorgänge beim Einsatz von Na-Bentonit unvermeidlich. Calcium-Bentonit hat eine geringere Wasseraufnahme- und Quellfähigkeit als Natrium-Bentonit. Durch entsprechend höhere Flächengewichte an Bentonit werden bei Calcium-Bentonitmatten ähnlich geringe Permittivitäten erreicht wie bei Natrium-Bentonitmatten.

Zur Beschreibung der „Wasserdurchlässigkeit“ von Bentonitmatten wird der Parameter „Permittivität“ verwendet. Dieser hat die Einheit $[m^3/m^2s \text{ pro } m]$ bzw. $[1/s]$ und entspricht dem k-Wert geteilt durch die Materialdicke. So hat eine 0,5 m dicke mineralische Dichtung mit einem k-Wert von $k = 5 \times 10^{-9} [m/s]$ eine Permittivität von $\Psi = 1 \times 10^{-8} [s^{-1}]$.

Die wichtigsten Kennwerte der eingesetzten Bentonitmatte sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Materialkennwerte der eingesetzten Bentonitmatte

Bentoniteinlage	9500 g/m ² natürlicher Calcium-Bentonit
Schichtdicke trocken	10 mm
Permittivität Ψ bei $i = 30$ und 15 kPa Auflast	$\Psi = 8,3 \times 10^{-9} [s^{-1}]$
Wasseraufnahmevermögen	202 %



Abbildung 5-2: Bentonitmatte (Detailaufnahme).

5.3.2 Dränmatte im Versuchsfeld E 50

Als Entwässerungsschicht zwischen Rekultivierungsschicht und Dichtungsschicht ist hier anstelle der 0,3 m dicken Kiesschicht des Regelsystems eine Dränmatte von 0,01 m Dicke angeordnet. Technische Angaben zur verwendeten Dränmatte sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

Anstelle des Durchlässigkeitsbeiwerts wird bei Dränmatten die von der Materialdicke unabhängige Größe „Wasserleitvermögen“ angegeben (in Liter pro Sekunde je lfd. Meter Materialbreite senkrecht zur Fließrichtung).

Tabelle 5-2: Angaben zur Dränmatte der Entwässerungsschicht

Aufbau der Dränmatte	- Filtervliesstoff - PP-Wirragelege - Filtervliesstoff
Dicke bei 20 kPa Auflast	11,4 mm
Wasserleitvermögen q_{20} bei Auflast von 20 kPa und $i = 0,1$	0,71 [l / (s * m)]



Abbildung 5-3: Dränmatte (Detailaufnahme).

5.3.3 Rekultivierungsschicht des Versuchsfeldes E 50

Die Rekultivierungsschicht soll die mineralische Dichtung vor Beschädigung (z.B. durch Austrocknung, Frosteinwirkung, Durchwurzelung) schützen. Außerdem soll sie eine angepasste Vegetation ermöglichen, die als Erosionsschutz dient und die Evapotranspiration fördert. Als Oberboden wurde das am Standort vorhandene Bodenmaterial verwendet, das bereits zuvor als Oberboden der mineralischen Abdeckung gedient hatte. Der tonmineralarme Unterboden soll dazu dienen, die Durchwurzelung bevorzugt auf den nährstoffreicheren Oberboden zu begrenzen. Wegen des relativ geringen Feinanteils im Unterboden (Ton + Schluff < 15 %) hat dieser ein geringeres Wasserspeichervermögen. Daher werden die zu testende Dränmatte und die Bentonitmatte mit einem großen Angebot an Bodenwasser beaufschlagt. Materialangaben zu den mineralischen Bodenschichten sind in **Tabelle 5-3** zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Materialangaben der Rekultivierungsschicht E 50

	Oberboden	Unterboden
Dicke	0,2 m	0,8 m
Bodenart	Sand, schwach schluffig	Sand, schwach schluffig
Bodengruppe	SU*	SU
Kornziffern (%-Anteile Ton/Schluff/Sand/Kies)	5 / 14 / 77 / 4	4 / 9 / 85 / 2
Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k	$1 \cdot 10^{-6}$ m/s	$7 \cdot 10^{-6}$ m/s
Trockendichte	1,60 t/m ³	1,68 t/m ³

5.4 Bau des Versuchsfeldes E 50

5.4.1 Vorbereitung des Versuchsfeldes

Der Bau des Versuchsfeldes E 50 erfolgte im Juni und Juli 1998. Der Bau des Versuchsfeldes ist in der Fotodokumentation (**Abbildung 5-4 – 5-8**) illustriert. Zunächst wurde die vorhandene Deponie-Oberflächenabdeckung 1,1 m tief abgetragen. Der Oberboden wurde zur späteren Verwendung im Versuchsfeld seitlich gelagert; der bindige Unterboden wurde auf ein Bodenlager neben der Deponie verbracht.

Nach der Herstellung des Planums wurden an der unteren Versuchsfeldkante die Gräben für die Wasserableitungssysteme (Ableitung des durch die Bentonitmatte sickernden Wassers und Ableitung des Wassers aus der Dränschicht) gezogen. Anschließend wurde das Planum mittels „Rammex“-Rüttelwalze nachverdichtet und mit einem Schutzvlies (Flächengewicht: 500 g/m²) abgedeckt.

Anschließend erfolgte die Verlegung und Verschweißung der Kunststoffdichtungsbahn. Es kam eine strukturierte PEHD-Kunststoffdichtungsbahn mit einer Dicke von 2,0 mm zum Einsatz. Die geringere Dicke gegenüber der im Deponiebau für Abdichtungen vorgeschriebenen Dicke von 2,5 mm wurde gewählt, weil die dünnere Kunststoffdichtungsbahn flexibler ist und sich daher in den schmalen Wasserauffanggräben besser verlegen lässt. In Bezug auf die erforderliche Dichtungswirkung ist die 2,0 mm dicke Kunststoffdichtungsbahn für die im Versuchsfeld zu erwartenden Lastfälle vollkommen ausreichend.



Abbildung 5-4: Verlegung der Kunststoffdichtungsbahn (= Basis des Großlysimeters).

Als Dränschicht unter der Bentonitmatte wurde eine spezielle Dränmatte verwendet, die sich dadurch auszeichnet, dass sie auch unter Belastung weitgehend formstabil bleibt und ein hohes Wasserleitvermögen gewährleistet. Im Graben des Wasserleitungssystems 1 wurde auf der Dränmatte ein Dränrohr DN 150 verlegt und der Graben anschließend mit kalkarmem Kies 4/32 aufgefüllt.

Zwischen Dränschicht und Bentonitmatte wurde, wie in Kapitel 5.2 erläutert, eine Sand-Ausgleichsschicht eingebracht. Hierzu fand ein schwach schluffiger Sand Verwendung, der keine Kies- und Steinfraktion enthält. Der Sand wurde händisch im Versuchsfeld verteilt, durch systematisches Festtreten verdichtet und abschließend auf eine Dicke von 0,1 m abgezogen.

5.4.2 Einbau des Abdichtungssystems

Die Verlegung der Bentonitmatte erfolgte am 01.07 und 02.07.1998. Die Bentonitmatten-Rollen wurden von einem Bagger mittels Traverse zum oberen Rand des Versuchsfeldes transportiert und von dort nach unten hin abgerollt. Die 3,60 m breiten Bahnen wurden jeweils 30 cm überlappend nebeneinander ausgelegt. Da die Versuchsfeldränder nicht genau in der Falllinie bzw. in der Horizontalen ausgerichtet sind (dies ist zur Wasserableitung in den Wasserauffanggräben erforderlich), war auf eine dachziegelartige Überlappung der Bahnen zu achten.



Abbildung 5-5: Verlegung der Bentonitmatte.



Abbildung 5-6: Verlegung und Verklebung der Bentonitmatte.

Nach der Auslegung und Ausrichtung der Bentonitmatten-Bahnen wurden sie gemäß Herstelleranleitung mittels Bitumenemulsion verklebt. Hierzu wurde zunächst beiderseits auf 10 cm Breite ein Voranstrich mit der 1 : 5 mit Wasser verdünnten Bitumenemulsion vorgenommen. Anschließend wurde auf der jeweils unteren Matte ein Hauptanstrich der unverdünnten Bitumenemulsion mittels Gießkanne aufgebracht und mit einem Spachtel verteilt. Dann wurden die Bahnränder übereinander geklebt und angedrückt. Die Verlegung der Bentonitmatten ging rasch und sauber vonstatten. Die Fotodokumentation (**Abbildung 5-5 und 5-6**) gibt einen Eindruck vom Verlauf der Arbeiten.

Anschließend erfolgte die Verlegung der Dränmatte. Die Dränmatten-Rollen wurden mittels eines Baggers zum oberen Rand des Versuchsfeldes transportiert und von dort nach unten abgerollt bis in den Graben zur Ableitung des Dränabflusses. Dort wurde die Dränmatte abgeschnitten und anschließend neben der ausgerollten Bahn oben wieder angesetzt. Die an den Stößen der Bahnen überlappenden Filtervliese wurden mittels Heißluft-Pistole aneinander geheftet. Die Verlegung der Dränmatte ist in **Abbildung 5-7** illustriert.



Abbildung 5-7: Ausrollen der Dränmatten als Entwässerungsschicht über der Bentonitmatte

Entlang der Feldränder (oben und seitlich) wurden auf die Dränmatte reichende Kunststoffdichtungsbahn-Streifen verlegt, um zu unterbinden, dass von den Rändern her Wasser unter die Bentonitmatte sickert und die Versuchsergebnisse verfälscht.

Abschließend erfolgte der Einbau der Rekultivierungsschicht. Hierzu wurde zunächst eine erste 0,4 m dicke Schicht aus schwach schluffigem Sand mit einem Kettenbagger vor Kopf arbeitend in das Versuchsfeld gefüllt. Anschließend erfolgte die Schüttung einer zweiten 0,4 m dicken Sandschicht (**Abb. 5-8**). Als oberste Schicht wurde der seitlich gelagerte Oberboden wieder auf das Versuchsfeld aufgetragen. Am oberen Rand und an den seitlichen Rändern des Feldes wurden Randwälle modelliert, um den Zutritt von Hangwasser zu verhindern.



Abbildung 5-8: Einbau der Rekultivierungsschicht (Unterboden).

Am unteren Feldrand wurde ein Wasserauffanggraben zur Fassung des Oberflächenwassers hergestellt. Der Graben wurde mit einem Dach versehen, um das direkt anfallende Niederschlagswasser fernzuhalten.

Zuletzt wurde die Oberfläche mit einer Gras-Ansaat versehen.

5.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Bauausführung

Die verlegefertig produzierten Geokunststoffprodukte haben (bei entsprechender Qualitätssicherung im Herstellungswerk) eine definierte, gleichbleibende Qualität. Auf der Baustelle ist zu beachten, dass nicht durch unsachgemäße Handhabung und Lagerung Qualitätseinbußen entstehen.

Die Handhabung und Verlegung der Geokunststoff-Rollenware erfolgte einfach und sicher. Auch das Verkleben der Bentonitmatten-Bahnen gemäß Herstelleranleitung ließ sich problemlos durchführen. Insbesondere ist als Vorteil herauszustellen, dass die Verlegung zügig vonstatten geht.

Bei der Verwendung von mineralischen Materialien im Deponiebau gibt es hinsichtlich Schichtdicke und Materialeigenschaften zahlreiche Fehlermöglichkeiten beim Einbau. Bei den Geokunststoff-Produkten sind Schichtdicke und Materialeigenschaften normiert.

Beim Bau von mineralischen Abdichtungen ist die Einstellung des angestrebten Wassergehaltes problematisch. Bentonitmatten ändern dagegen ihre Materialeigenschaften nicht, auch wenn sie bei trocken-heißem Sommerwetter eingebaut werden. Allerdings ist bei Bentonitmatten zu beachten, dass sie nicht ohne Auflast quellen dürfen. Daher ist der Einbau nur bei trockener Witterung zulässig.

Bentonitmatten müssen, im Unterschied zu mineralischen Dichtungsmaterialien, nach dem Aufbringen nicht verdichtet werden. Angesichts des elastischen Verhaltens von Hausmüldeponie-Oberflächen ist die Erzielung der geforderten Verdichtung teilweise problematisch. Diese Schwierigkeit entfällt bei Bentonitmatten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die Verlegung von Bentonitmatten und Dränmatten sicher und zügig handhaben lässt. Es sind relativ große tägliche Verlegeleistungen erzielbar. Wichtig ist, dass die dünnen Bentonitmatten auf der Baustelle mit der gebotenen Sorgfalt behandelt werden, um Beschädigungen vor und während des Einbaus zu vermeiden.

5.5 Messtechnische Ausstattung des Versuchsfeldes E 50

Im Versuchsfeld E 50 werden die folgenden Messungen durchgeführt:

- Messung der Wasserabflüsse (mittels Kippwaagen):
 - Oberflächenabfluss (A_0)
 - Dränabfluss unter der Rekultivierungsschicht (A_D)
 - Sickerwasserabfluss unter der Bentonitmatte (A_{SW})
- Wassergehalt der Rekultivierungsschicht (mittels FDR-Messsonden)
- Temperatur der Bodenschichten (mittels Pt-100-Temperaturaufnehmern)

Die Wasserabflüsse aus dem Versuchsfeld werden über eine Rohrbrücke in den Messcontainer geführt. In den Winterhalbjahren 2008/09 und 2009/10 kam es infolge von zeitweiligem Einfrieren der Wasserleitungen in der Rohrbrücke zu Minderbefunden bei den Abflüssen. Die Rohr-

brücke wurde anschließend saniert und neu isoliert, so dass diese Probleme inzwischen behoben sind.

Die Abfluss-Messeinrichtungen wurden im Januar 2004 auf Kippwaagen-Systeme umgerüstet, die sich im benachbarten Versuchsfeld E 35 (Folgeprojekt) als robust und zuverlässig erwiesen hatten. Hintergrund der Umrüstung war, dass der Wartungsaufwand für das bisherige Messsystem gestiegen war und der kostenträchtige Austausch mehrerer Magnetventile bevorstand. Die Kippwaagen haben im Messzeitraum 2004 – 2011 ohne Beanstandungen funktioniert.

5.6 Beschreibung des Versuchsfeldes E 50 im Zeitraum 1998 - 2011

Nach der Ansaat im Sommer 1998 hatte sich bis zum Herbst 1998 eine erste, noch nicht geschlossene Vegetationsdecke auf der Rekultivierungsschicht eingestellt. Bis zum Frühsommer 1999 war eine nahezu geschlossene Vegetationsschicht, vornehmlich aus Gräsern, vorhanden (**Abbildung 5-9**). Im Laufe der Folgejahre siedelten sich daneben standortangepasste Pflanzen an, die nicht angesät worden waren, wie z.B. Disteln, Ampfer und andere Kräuter. Es lässt sich offenbar nicht vermeiden, dass diese als Tiefwurzler bekannten Pflanzenarten durch Samenflug eingetragen werden. Die Fotodokumentation (**Abbildung 5-10 bis 5-14**) gibt einen Eindruck von der Entwicklung der Vegetation auf dem Versuchsfeld im Laufe der weiteren Beobachtungsjahre. Die Vegetation auf der Deponie „Im Dienstfeld“ wird in der Regel nicht gemäht oder anderweitig gepflegt. Nur im Herbst 2008 wurde auf Veranlassung des LfU auf der gesamten Deponie die Vegetation einschließlich des aufkommenden Buschbewuchs gemäht. **Abbildung 5-12** zeigt den Zustand des Versuchsfeldes E 50 nach dem Mähen.



Abbildung 5-9: Versuchsfeld E 50 mit Vegetation; Juni 1999



Abbildung 5-10: Versuchsfeld E 50 mit Vegetation; Oktober 2007

Bei der im Jahr 2008 durchgeführten Aufgrabung zur Untersuchung und bodenkundlichen Be-
probung der Rekultivierungsschicht wurde festgestellt, dass die Durchwurzelung vor allem auf
die obersten 10 cm des Oberbodens konzentriert war. Im Unterboden, unterhalb von ca. 0,4 m
waren nur vereinzelt Wurzeln zu erkennen. Allerdings zeigen Aufgrabungen, die neben dem
Großlysimeter in identisch aufgebauten „Aufgrabungsfeldern“ vorgenommen wurden, dass ein-
zelne Wurzeln bis zur Bentonitmatte hinabreichen, auf dem Deckgeotextil seitlich weiterwach-
sen und punktuell die Bentonitmatte durchstoßen.



Abbildung 5-11: Profil durch die Rekultivierungsschicht.



Abbildung 5-12: Versuchsfeld E 50 mit Vegetation; November 2008 (nach Abmähen des Bewuchses).



Abbildung 5-13: Versuchsfeld E 50 mit Vegetation; Februar 2011



Abbildung 5-14: Versuchsfeld E 50 mit Vegetation; Juli 2011

6 Messergebnisse des Versuchsfeldes E 35

6.1 Ergebnisse der Abflussmessungen im Versuchsfeld E 35

Seit Beginn der Messungen im Mai 2002 liegt bis zum September 2011 eine über 9 - jährige Beobachtung der Wasserabflüsse an diesem Oberflächenabdichtungssystem vor. Die Messung des Niederschlags und der Wasserabflüsse im Versuchsfeld liefen während des gesamten Beobachtungszeitraums, von wenigen Ausfällen abgesehen (vgl. Kapitel 4.6), kontinuierlich und zuverlässig. **Tabelle 6-1** fasst die Ergebnisse der Niederschlags- und Abflussmessungen als Jahressummen zusammen.

Tabelle 6-1: Versuchsfeld E 35: Jahressummen des Niederschlags und der Abflüsse

Jahr	Niederschlag	Teilfeld 1			Teilfeld 2		
		Drän-abfluss	Oberflächen-abfluss	Sickerwasser-abfluss	Drän-abfluss	Oberflächen-abfluss	Sickerwasser-abfluss
5-12/2002	607,5	129,3	22,8	28,8	180,0	21,9	31,5
2003	519,9	66,4	2,9	11,9	150,9	19,4	3,9
2004	745,1	169,3	32,6	10,5	68,4	28,3	5,1
2005	753,8	165,4	28,2	12,3	143,1	33,8	5,1
2006	576,1	241,3	6,7	35,5	79,1	14,4	6,2
2007	985,0	345,1	29,4	28,9	238,8	24,2	18,1
2008	614,8	235,3	12,6	39,1	233,0	15,9	22,9
2009	730,0	409,3	8,2	30,2	412,9	7,5	13,6
2010	743,8	161,5	10,9	79,7	239,1	3,2	18,8
01-09/2011	364,4	69,2	5,6	64,8	150,5	2,9	25,9
SUMME	6640	1992	160	342	1896	172	151
Jahresmittel	706,4	211,9	17,0	36,4	201,7	18,3	16,1

In **Abbildung 6-1 und 6-2** sind die Ergebnisse der Niederschlags- und Abflussmessungen für das Teilfeld 1 bzw. das Teilfeld 2 als Summenkurven aufgetragen: Für den Niederschlag, der als blaue Linie dargestellt ist, gilt jeweils die linke Ordinate. Die rechte Ordinate für die Abflussmessungen ist zur besseren Lesbarkeit der Kurven um den Faktor 3 vergrößert dargestellt.

Der mittlere Jahresniederschlag am Deponiestandort beträgt nach Messungen im Zuge der Deponieüberwachung und in Übereinstimmung mit der nahe gelegenen Station Weinberg des

Deutschen Wetterdienstes ca. 750 mm. Wie die **Tabelle 6-1** zeigt, gab es im Untersuchungszeitraum mehrere Jahre mit annähernd durchschnittlichen Jahresniederschlägen aber auch einige Jahre mit deutlichen Abweichungen vom Mittelwert: Im Trockenjahr 2003 wurden nur 520 mm Niederschlag gemessen, im Jahr 2007 dagegen annähernd 1000 mm. Insgesamt lagen die Niederschläge im Zeitraum 2002 – 2011 mit 706 mm/Jahr unter dem langjährigen Mittel. Der Niederschlag präsentiert sich in **Abbildung 6-1 und 6-2** als annähernd gleichmäßig ansteigende Summenkurve, was der für das humide mitteleuropäische Klima typischen gleichmäßigen Verteilung der Niederschläge über das Jahr entspricht.

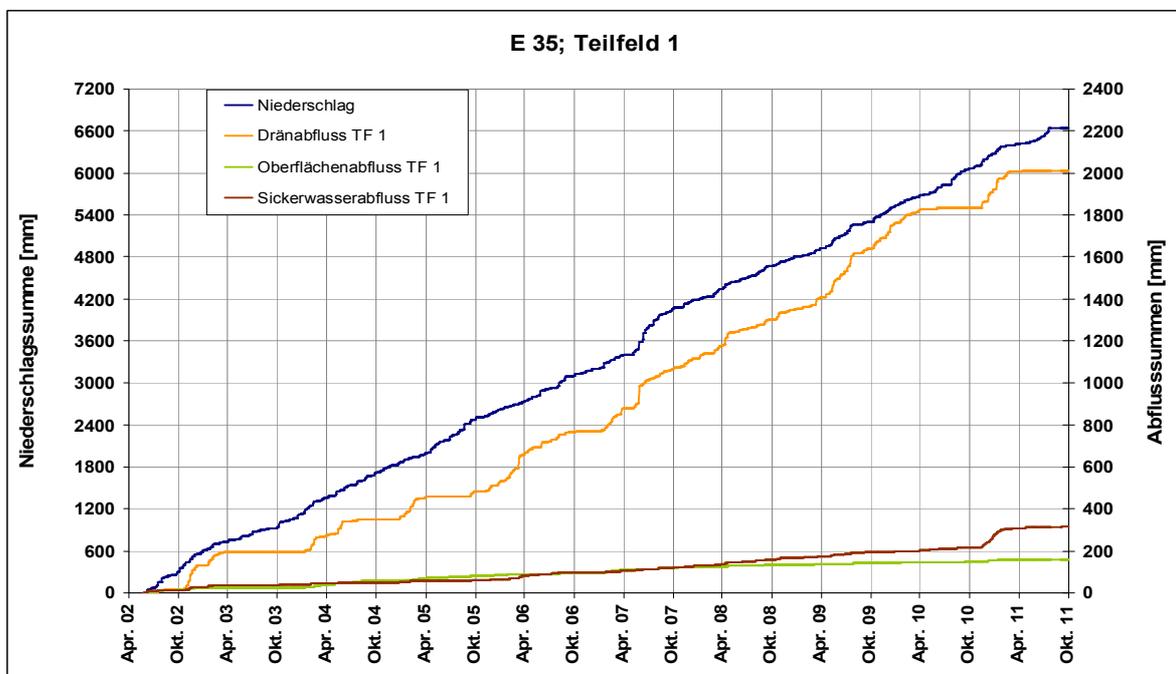


Abbildung 6-1: Teilfeld 1 (mit 2,0 m dicker Rekultivierungsschicht); Summenkurven des Niederschlags (linke Ordinate) und der Abflüsse (rechte Ordinate).

Der **Oberflächenabfluss** ist in den Diagrammen als grüne Linie dargestellt. Es wird deutlich, dass in beiden Versuchsfeldern nur in geringem Umfang Oberflächenabfluss auftritt. Es handelt sich um geringfügige seitliche Absickerungen, die vor allem in den Winterhalbjahren auftreten. Die Summe der Oberflächenabflüsse im gesamten Messzeitraum liegt bei 160 - 170 mm.

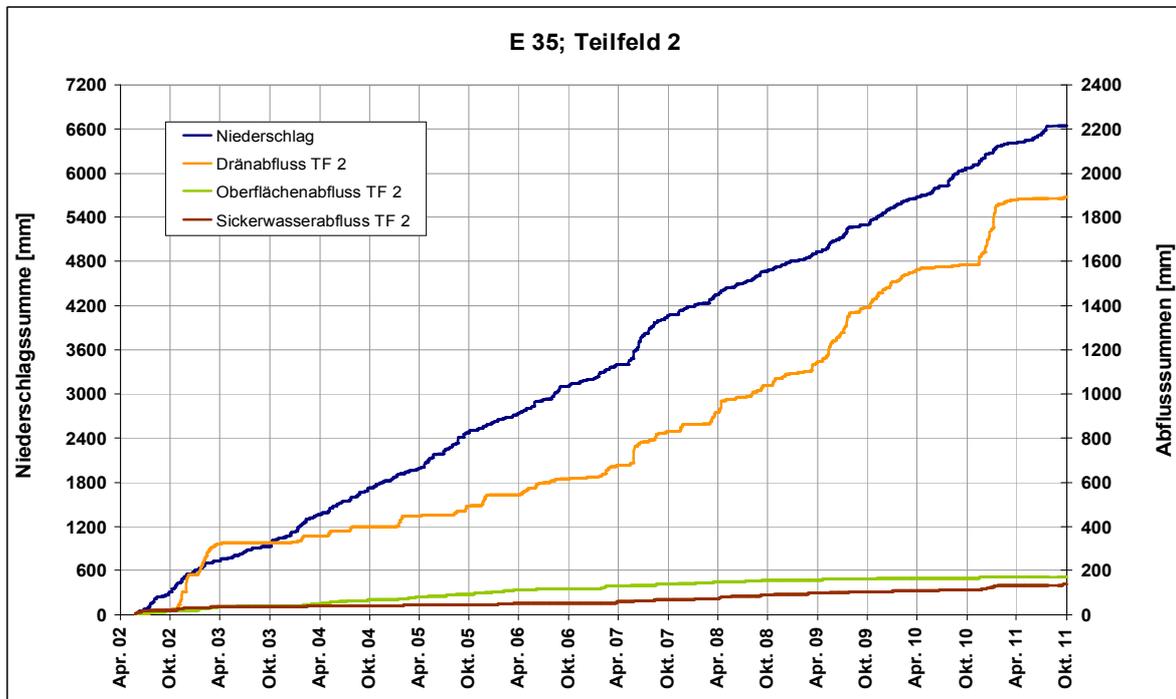


Abbildung 6-2: Teilfeld 2 (mit 1,5 m dicker Rekultivierungsschicht); Summenkurven des Niederschlags und der Abflüsse.

Der quantitativ bedeutendste Abfluss ist in beiden Teilfeldern der **Dränabfluss** (orangefarbene Linie). Die Dränabfluss-Summenkurven zeigen in den meisten Jahren einen stufenförmigen Verlauf: Die ansteigenden Kurventeile in den Wintermonaten (vor allem von November bis März) repräsentieren die Dränabflüsse in diesen Zeiträumen, während die waagerechten Kurventeile in den Sommermonaten Zeiten ohne Dränabfluss repräsentieren. Im Teilfeld 1 (mit 2,0 m dicker Rekultivierungsschicht) beträgt die Dränabfluss-Jahressumme im Mittel 211 mm/Jahr (Minimalwert: 66 mm/Jahr; Maximalwert: 409 mm/Jahr). Im Teilfeld 2 (mit 1,5 m dicker Rekultivierungsschicht) beträgt der Dränabfluss im Mittel 202 mm/Jahr (Minimalwert: 68 mm/Jahr; Maximalwert: 412 mm/Jahr).

Die **Sickerwasserabfluss**-Summe ist in den **Abbildungen 6-1 und 6-2** als dunkelbraune Linie gekennzeichnet. Dies ist die Wassermenge, die durch die mineralische Dichtungsschicht hindurchsickert und bei einer Deponie der Klasse I in den Deponiekörper einsickern würde. Die Jahressummen der Sickerwasserabflüsse betragen im Mittel ca. 10-30 mm/Jahr. Ab dem Jahr

2010 ist im Teilfeld 1 ein starker Anstieg der Sickerwasserabflüsse auf 80 mm (im Jahr 2010) und 65 mm (in den Monaten Jan. – Sept. 2011) zu verzeichnen.

Die Entwicklung der Sickerwasserabflüsse im Einzelnen ist in der Überblicksdarstellung den Abbildungen 6.1 und 6.2 nicht zu erkennen. Einzelheiten sind den im vergrößerten Maßstab dargestellten Diagrammen der **Abbildungen 6-3 und 6-4** zu entnehmen. Es ist zu beachten, dass Skalierung der Ordinaten für die einzelnen Abflüsse unterschiedlich gewählt wurde. In diesen Diagrammen sind die Niederschlags- und Abfluss-Messwerte als Tageswerte dargestellt. Es ist zu erkennen, dass Dränabfluss und Dichtungsdurchsickerung in der Regel nicht kontinuierlich stattfinden, sondern dass an einzelnen Tagen – als Folge von Niederschlägen – diskrete Abfluss-Spitzen auftreten. Die Dränabflüsse erreichen ca. 20 mm/Tag.

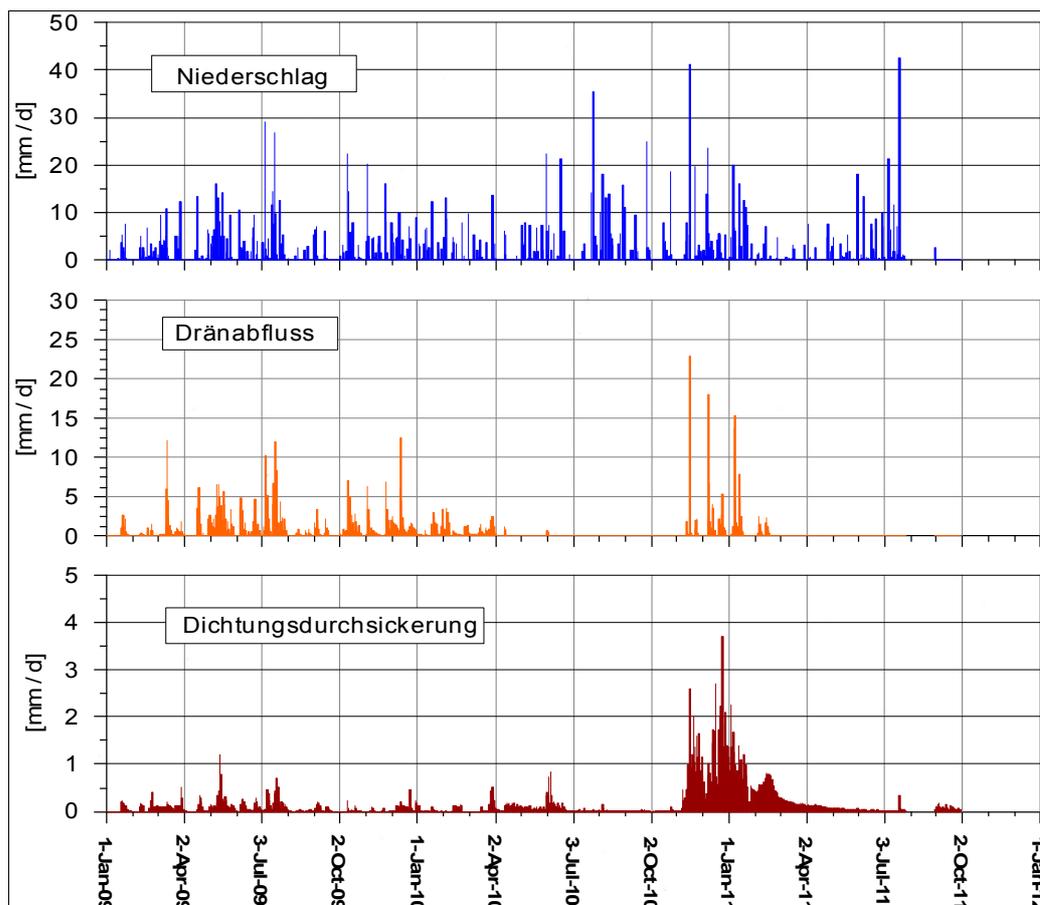


Abbildung 6-3: Teilfeld 1 (mit 2,0 m dicker Rekultivierungsschicht); Tagessummen von Niederschlag, Dränabfluss und Dichtungsdurchsickerung im Zeitraum 2009 bis 2011.

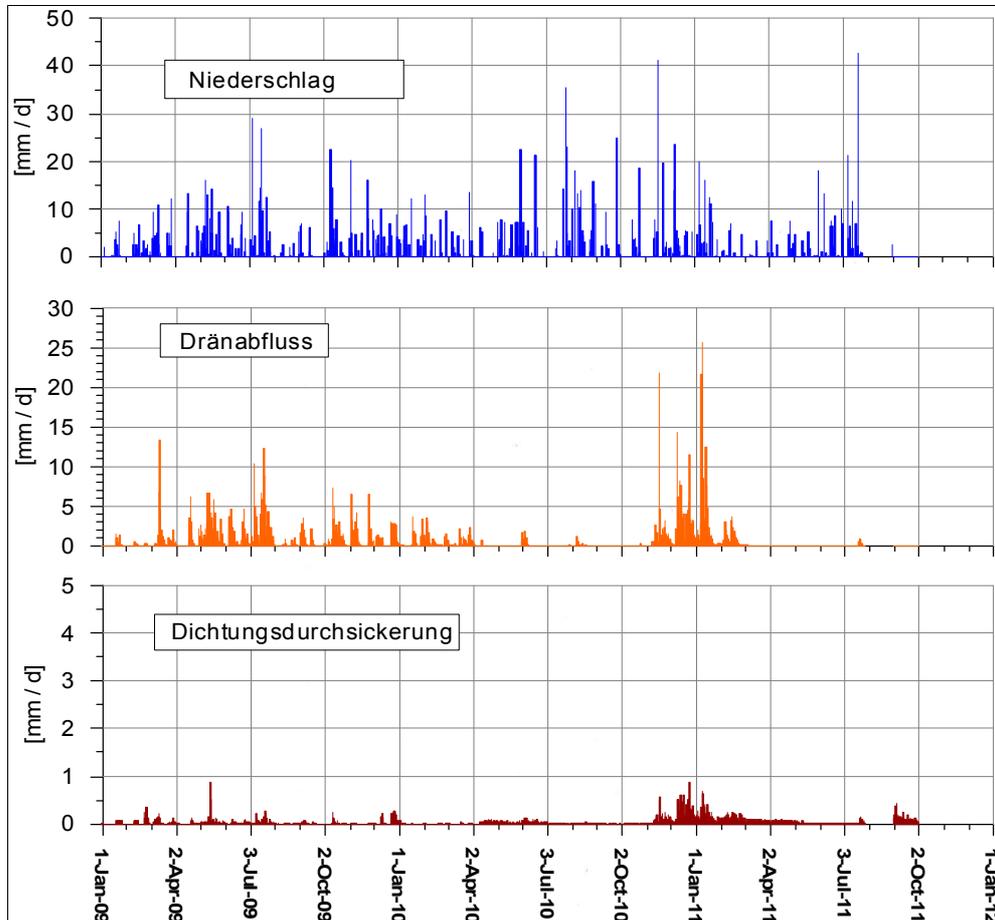


Abbildung 6-4: Teilfeld 2 (mit 1,5 m dicker Rekultivierungsschicht); Tagessummen von Niederschlag, Dränabfluss und Dichtungsdurchsickerung im Zeitraum 2009 bis 2011.

Die Dichtungsdurchsickerung liegt in der Regel bei unter 1 mm/Tag. Im Vergleich der Diagramme 6-3 und 6-4 deutlich, dass die Sickerwasserabflüsse im Teilfeld 1 ab November 2010 ungewöhnlich stark zunehmen. Der ausgeprägte Peak der Dichtungsdurchsickerung im Winter 2010/11 wird nur im Teilfeld 1, aber nicht im Teilfeld 2 festgestellt.

6.2 In-situ-Messungen der Bodenfeuchte im Versuchsfeld E 35

Die Messung der Bodenfeuchte erfolgt mittels FDR-Sonden und TDR-Sonden. In den ersten Jahren waren zusätzlich Tensiometer im Einsatz; diese haben jedoch nur eine begrenzte Standzeit und sind inzwischen nicht mehr funktionsfähig.

In den beiden Teil-Versuchsfeldern befindet sich je ein tiefengestaffeltes Messprofil, in dem die Messsysteme parallel eingesetzt sind. In **Anlage 2.4** und **2.5** sind die Ergebnisse der Bodenfeuchte-Messungen für die beiden Teilfelder jeweils zusammenfassend dargestellt. Die einzelnen Messkurven sind jeweils farblich so gekennzeichnet, dass Sensoren in gleicher Tiefe auch in der gleichen Farbe dargestellt sind. Die Messgeräte in der mineralischen Dichtung sind mit den blauen Farbtönen gekennzeichnet, die in der Rekultivierungsschicht von unten nach oben mit der Abfolge von Grün über Gelb nach Rot.

Abbildung 6-5 zeigt die Bodenfeuchte-Messungen im Teilfeld 1 mittels FDR-Sonden im Zeitraum 2002 bis 2011. Auf der Ordinate ist der volumetrische Wassergehalt des Bodens (in m^3/m^3 [ein Wert von $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ entspricht einem volumetrischen Wassergehalt von 40%]) aufgetragen.

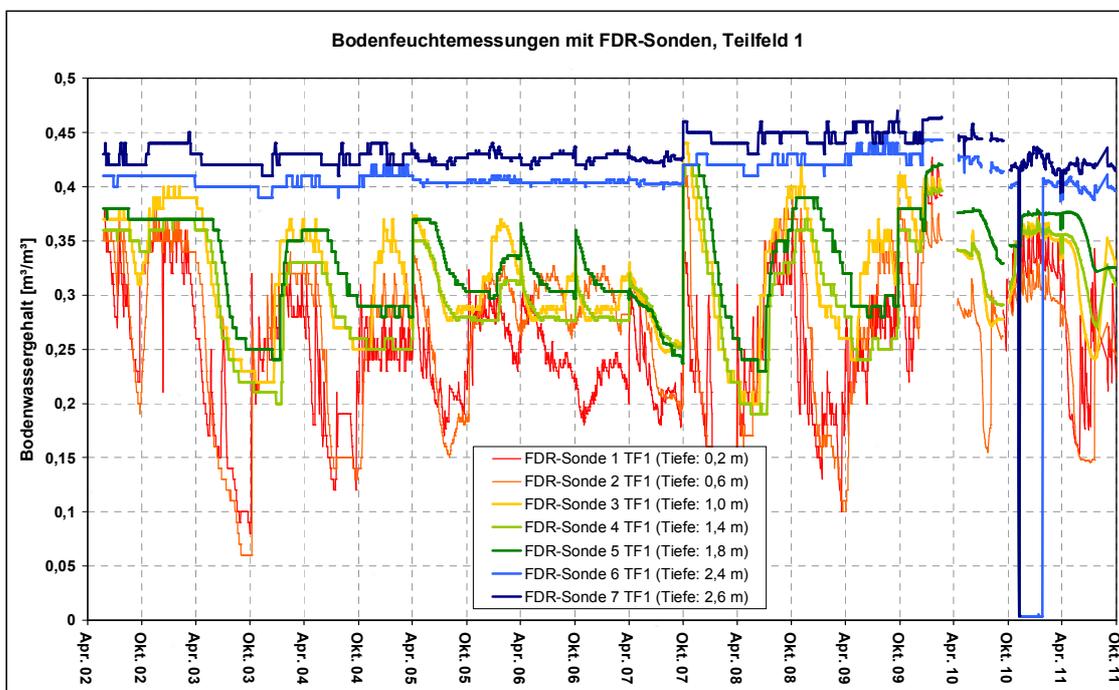


Abbildung 6-5: Ergebnisse der Bodenfeuchtemessungen mittels FDR-Sonden im Teilfeld 1.

Deutlich ist in der Überblicksdarstellung zu erkennen, dass der Bodenwassergehalt der Rekultivierungsschicht starken jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt (rote, gelbe und grüne Kurven) mit Minima jeweils im Spätsommer, ca. von August bis Oktober. Der Wassergehalt in der mineralischen Dichtungsschicht (blaue Kurven) bleibt dagegen nahezu konstant. Der Wasserhaushalt der mineralischen Dichtungsschicht ist hier offensichtlich entkoppelt von den schwankenden Wassergehalten der Rekultivierungsschicht.

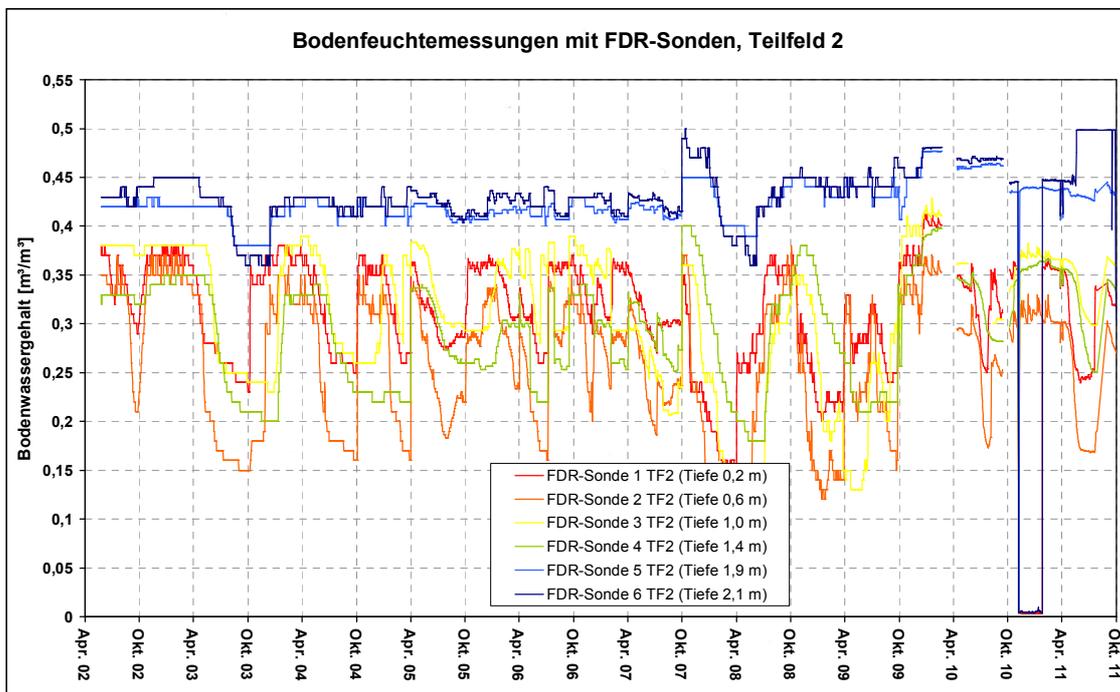


Abbildung 6-6: Ergebnisse der Bodenfeuchtemessungen mittels FDR-Sonden im Teilfeld 2.

Abbildung 6-6 zeigt die Bodenfeuchte-Messungen mittels FDR-Sonden im Teilfeld 2. Die Messungen zeigen in der Rekultivierungsschicht ein ähnliches Bild starker jährlicher Wassergehaltsschwankungen wie im Teilfeld 1. Die FDR-Sonden in der mineralischen Dichtung (FDR 5 und FDR 6; blaue Kurven) zeigen im Sommer 2003 und erneut im Sommer 2008 eine deutliche Abnahme der Wassergehalte auf Werte von unter $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Die geringer mächtige Rekultivierungsschicht im Teilfeld 2 führt hier offenbar dazu, dass auch aus der mineralischen Dichtungsschicht ein Wasserentzug stattfindet. In den übrigen Jahren zeigen die FDR-Sonden in der mineralischen Dichtung ähnlich hohe Wassergehalte wie in der mineralischen Dichtung des Teilfeldes 1.

7 Messergebnisse des Versuchsfeldes E 50

7.1 Ergebnisse der Abflussmessungen im Versuchsfeld E 50

Die Jahressummen der Niederschlags- und Abflussmessungen im Versuchsfeld E 50 sind in **Tabelle 7-1** im Überblick zusammengefasst. In dem über 12 jährigen Beobachtungszeitraum gab es sehr niederschlagsreiche Jahre wie 2001 und 2002 mit jeweils über 1100 mm Niederschlag aber auch ausgeprägte Trockenjahre wie 2003 und 2006 mit nur 540 bzw. 570 mm Niederschlag. Der durchschnittliche Jahresniederschlag liegt in der Beobachtungsperiode mit 805 mm über dem langjährigen Mittel von ca. 750 mm.

Tabelle 7-1: Jahressummen des Niederschlags und der Abflüsse im Versuchsfeld E 50.

Jahr	Niederschlag N (mm)	Oberflächen- abfluss (mm)	Dränabfluss A _D (mm)	Durchsickerung der Bentonitmatte		
				(mm)	% von N	% von A _D
1999	971	24,2	274,1	7,6	0,8	2,7
2000	823	2,5	233,6	2,3	0,3	1,0
2001	1173	3,9	416,7	8,1	0,7	1,9
2002	1174	5,3	520,2	52,0	4,4	10,0
2003	542	2,5	151,0	0,6	0,1	0,4
2004	805	3,9	151,1	17,8	2,6	11,8
2005	817	12,3	302,4	41,6	5,1	13,8
2006	571	5,0	118,3	20,4	3,6	17,2
2007	985	5,2	313,1	81,3	8,3	26,0
2008	615	4,7	161,6	50,0	8,1	31,0
2009	730	14,3	81,0 *)	14,0 *)	1,9	17,3
2010	743	0,3	89,6 *)	24,7 *)	3,3	27,6
1 – 9/2011	364	3,4	113,2	40,0	11,0	35,4
SUMME	10.268	88	2970	363		
<i>Durchschnittl. Jahreswerte</i>	805	7	233	28	3,5	12,2

*) = im Jahr 2009 und 2010 Minderbefunde wegen teilweise defekter Messtechnik

Der Anteil des **Oberflächenabflusses** ist mit einem Jahresdurchschnitt von 7 mm (< 1% vom Niederschlag) sehr gering.

Der **Dränabfluss** beträgt im Mittel ca. 230 mm/Jahr und schwankt dabei zwischen 520 mm im niederschlagsreichen Jahr 2002 und 118 mm im niederschlagsarmen Jahr 2006 (die niedrigeren Werte des Dränabflusses in den Jahren 2009 und 2010 sind auf messtechnisch bedingte Minderbefunde zurückzuführen.)

Abbildung 7-1 zeigt die Ergebnisse der Niederschlags- und Abflussmessungen von 1998 bis 2011 als Summenkurven. Der Dränabfluss zeigt dabei einen stufenförmigen Kurvenverlauf mit ansteigenden Abschnitten, welche die in den Winterhalbjahren stattfindenden Abflüsse repräsentieren und Plateaus während der Sommermonate, in denen kein Dränabfluss stattfindet.

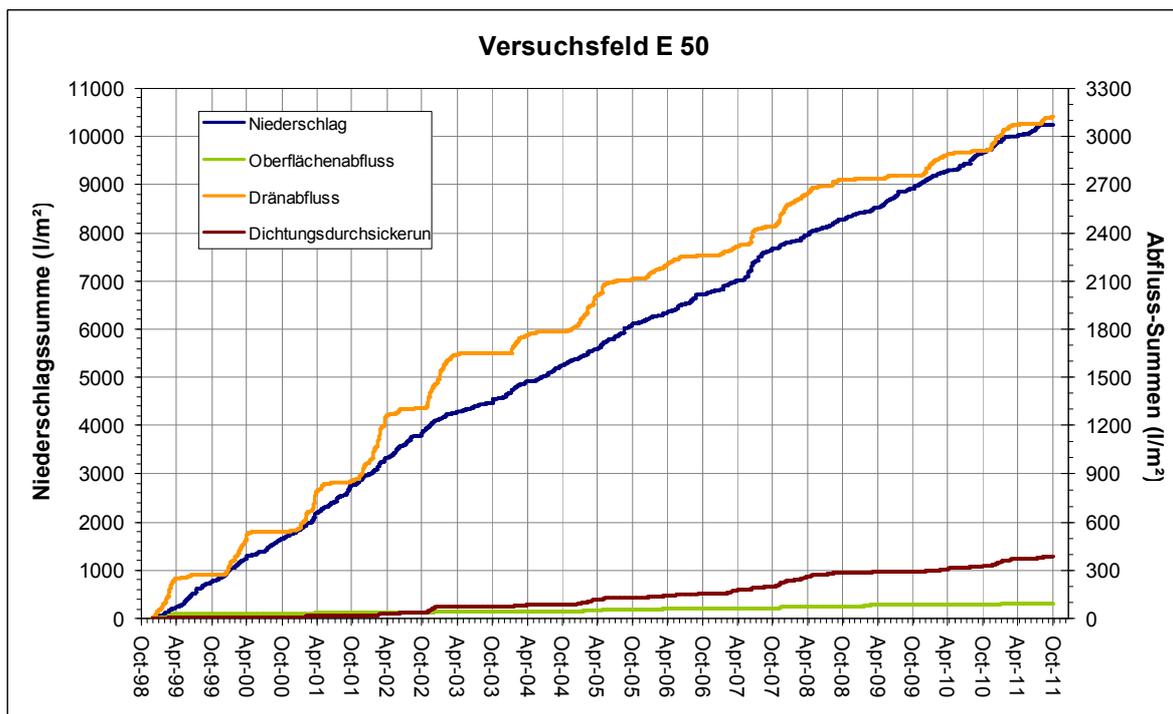


Abbildung 7-1: Versuchsfeld E 50: Summenkurven des Niederschlags (linke Ordinate) und der Abflüsse (rechte Ordinate) im Gesamtzeitraum Dez. 1998 bis Sept. 2011.

Die **Durchsickerung der Bentonitmatte** beträgt im Mittel 28 mm/Jahr. Wie aus **Tabelle 7-1** und **Abbildung 7-1** zu ersehen ist, war die Durchsickerung in den ersten Jahren des Untersuchungszeitraums (bis 2001) sehr gering (< 10 mm/Jahr). In den Folgejahren stieg die Durchsickerung der Bentonitmatte auf Werte von 20 bis 80 mm/Jahr an.

Abbildung 7-2 zeigt die Tageswerte von Niederschlag, Dränabfluss und Durchsickerung der Bentonitmatte im Zeitraum 2009 bis 2011. Es wird deutlich, dass an zahlreichen Tagen ein Abfluss von > 1 mm durch die Bentonitmatte sickert. In dieser Darstellung ist auch zu erkennen, dass keine „Selbtheilung“ der Bentonitmatte nach Beginn der Abflüsse im Winterhalbjahr stattfindet: Die Durchsickerung der Bentonitmatte relativ zum Dränabfluss nimmt im Verlauf des Winters nicht ab (wie es bei einem wirksamen Selbstheilungseffekt eintreten müsste) sondern der Durchsickerungsanteil nimmt – im Gegenteil – eher noch zu.

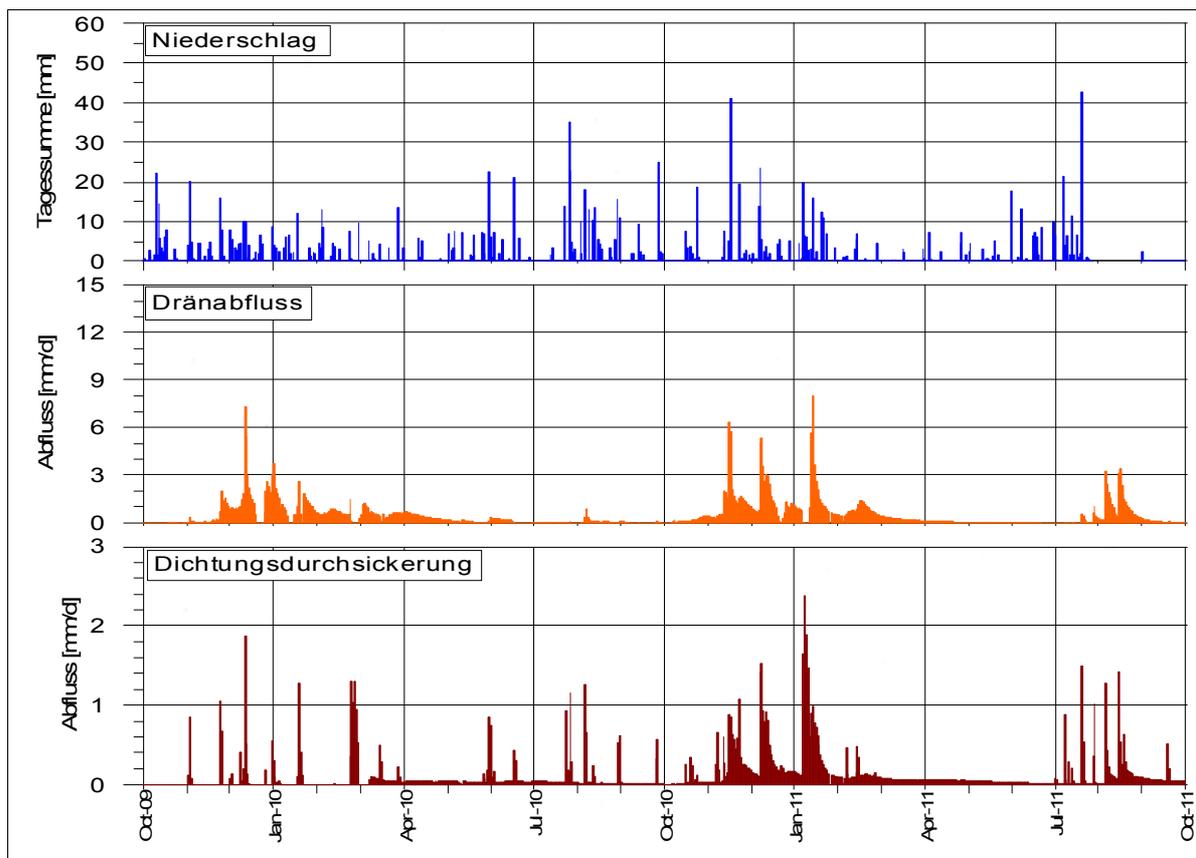


Abbildung 7-2: Versuchsfeld E 50: Tagessummen von Niederschlag, Dränabfluss und Durchsickerung der Bentonitmatte im Zeitraum 2009 bis 2011.

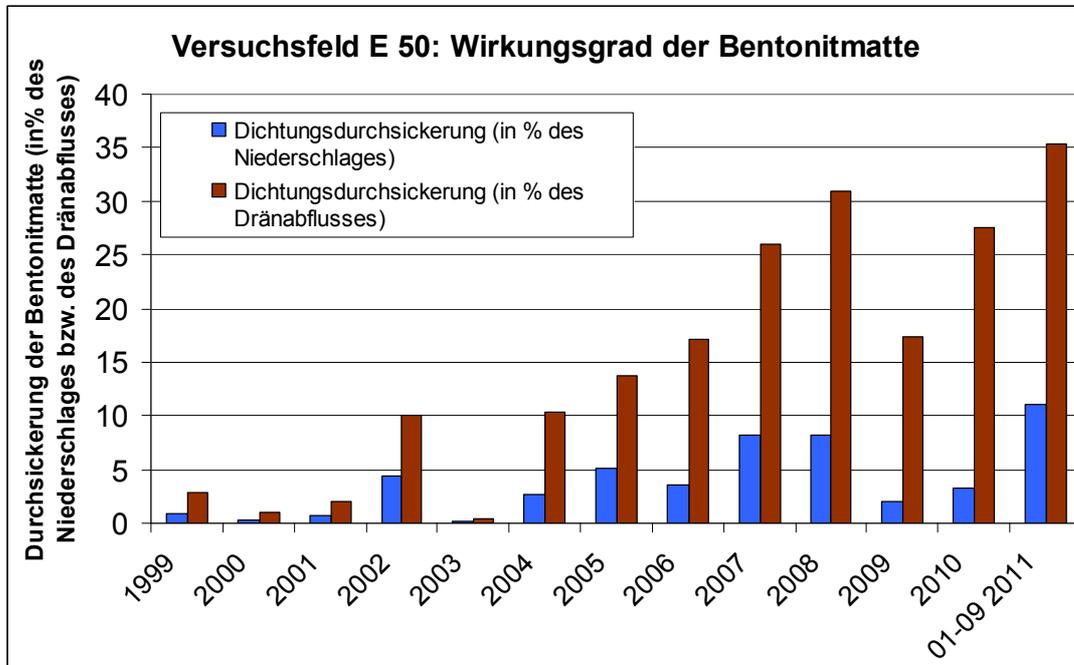


Abbildung 7-3: Versuchsfeld E 50: Wirkungsgrad der Bentonitmatte bezogen auf den Niederschlag (blaue Säulen) bzw. bezogen auf den Dränabfluss (braune Säulen); Werte jeweils für die einzelnen Bilanzjahre.

Der Wirkungsgrad der Abdichtung lässt sich auf zwei unterschiedliche Arten definieren:

- als Systemwirkungsgrad des Abdichtungssystems (Durchsickerung der Abdichtung bezogen auf den Niederschlag), oder
- als Wirkungsgrad des Abdichtungselements (Durchsickerung der Bentonitmatte bezogen auf den Dränabfluss).

Abbildung 7-3 zeigt den Systemwirkungsgrad und den Wirkungsgrad der Bentonitmatte als Abdichtungselement für die Jahre 1999 bis 2011. Die Durchsickerung betrug anfänglich < 1% vom Jahresniederschlag bzw. 1% bis 3% vom Dränabfluss. Inzwischen ist die Durchsickerung der Bentonitmatte auf 3% bis 8% vom Jahresniederschlag bzw. ca. 15% bis 30% vom Dränabfluss angestiegen. Der Wirkungsgrad der Bentonitmatte als Abdichtungselement beträgt somit inzwischen nur noch ca. 70% bis 85%.

7.2 Ergebnisse der Bodenfeuchtemessungen im Versuchsfeld E 50

Abbildung 7-4 zeigt als Überblicksdarstellung die Ergebnisse der Bodenfeuchte-Messungen mittels FDR-Sonden in der Rekultivierungsschicht im Verlauf der Jahre 1999 bis 2011.

Die violette Kurve (FDR-Sonde 4 in 0,2 m Tiefe) repräsentiert den Bodenwassergehalt im humushaltigen, schluffigen Oberboden, der deutlich mehr Wasser aufnehmen kann als der sandige Unterboden. Der Wassergehalt im Oberboden zeigt ausgeprägte Schwankungen und einen typischen Jahrgang mit Wassergehalten von > 30 Vol.-% in den Wintermonaten und einem Rückgang auf 15% bis 17% in trockenen Sommermonaten.

Die übrigen FDR-Sonden sind im sandigen Unterboden installiert. Hier schwanken die Bodenwassergehalte zwischen ca. 10 - 13 Vol.-% in Trockenzeiten und Maximalwerten in der Größenordnung von 18% bis 23%. Sehr niedrige Bodenwassergehalte waren in den Sommermonaten der Jahre 2000 und 2003 zu verzeichnen.

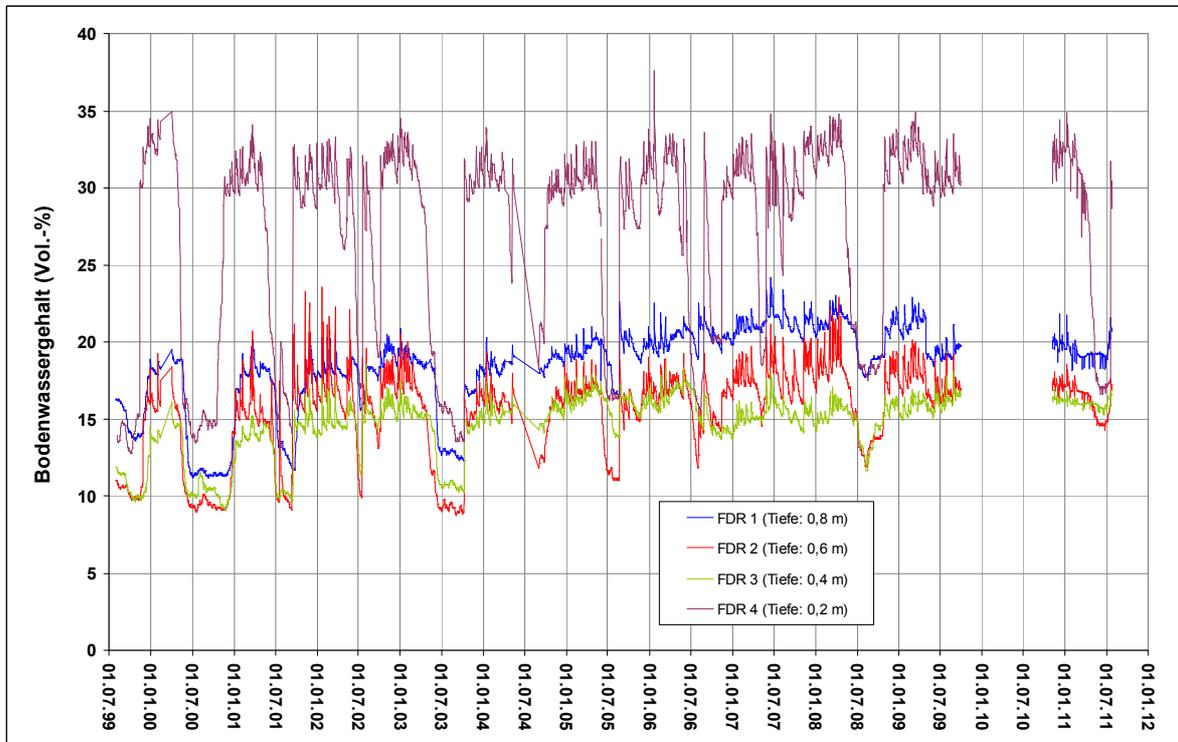


Abbildung 7-4: Versuchsfeld E 50: Ergebnisse der Bodenfeuchtemessungen in der Rekultivierungsschicht mittels FDR-Sonden.

8 Auswertung und Beurteilung der Untersuchungsergebnisse

8.1 Wasserhaushalt der untersuchten Oberflächenabdichtungssysteme

Abbildung 8-1 zeigt den Wasserhaushalt der untersuchten Oberflächenabdichtungssysteme als Gesamtbilanz über den Zeitraum Mai 2002 bis September 2011. (Dies ist der Messzeitraum der Versuchsfelder E 35. Um einen einheitlichen Vergleich zu ermöglichen, wurden die niederschlagsreichen ersten Versuchsjahre des Feldes E 50 hier nicht berücksichtigt.) Die weitaus größte Komponente der Abflüsse ist in allen drei Versuchsfeldern der Dränabfluss (28% bis 30%). Der Oberflächenabfluss ist mit 1% bis 3% minimal. Der Sickerwasserabfluss (d.h. die Durchsickerung der jeweiligen Abdichtungskomponente) liegt zwischen 2% des Niederschlags im Teilfeld E 35-2 und ca. 5% im Teilfeld E 35-1 und im Versuchsfeld E 50.

Der Anteil der Niederschlagssumme, der nicht in Form von Abflüssen gemessen wurde, ist in den Abbildungen als „Evapotranspiration“ ausgewiesen (angesichts des 9-jährigen Messzeitraums kann das Bilanzglied „Änderung des Bodenwasservorrats“, das bei kurzen Bilanzzeiträumen zusätzlich zu berücksichtigen ist, vernachlässigt werden.). Die Evapotranspiration liegt recht einheitlich bei 63% bis 66% der Niederschlagssumme. Angesichts der Tatsache, dass sich die Rekultivierungsschichten hinsichtlich ihrer Dicke und Bodenart deutlich unterscheiden, ist die Ähnlichkeit der erreichten Evapotranspiration erstaunlich. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die klimatischen Standortgegebenheiten (die in den unmittelbar benachbart liegenden Versuchsfeldern identisch sind) den Wasserhaushalt offenbar stärker prägen als die unterschiedlich aufgebauten Rekultivierungsschichten.

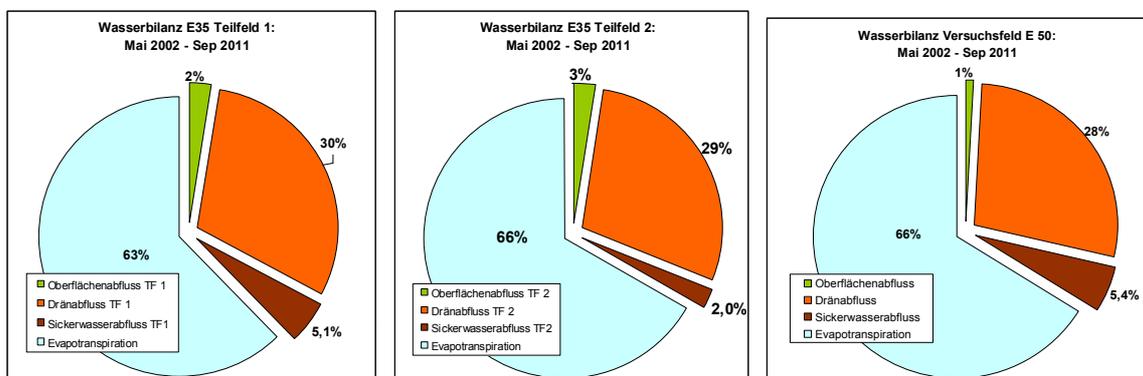


Abbildung 8-1: Wasserbilanz der Versuchsfelder E 35 und E 50: Abflüsse und Evapotranspiration in Prozent der Niederschlagssumme im Zeitraum Mai 2002 bis September 2011.

8.2 Wirksamkeit der Komponenten der Abdichtungssysteme

8.2.1 Rekultivierungsschicht

Die Rekultivierungsschicht hat nach DepV (2009), Anhang 1, Nr. 2.3.1 die Aufgabe, die darunter liegenden Funktionsschichten zu schützen:

- Schutz der Entwässerungsschicht vor Durchwurzelung und sonstigen Beeinträchtigungen der Funktionsfähigkeit,
- Schutz der Abdichtungskomponenten vor Wurzel- und Frosteinwirkung sowie vor Austrocknung.

Weiter macht die DepV Mindest-Vorgaben für die Rekultivierungsschicht:

- Minstdicke: 1 m,
- nutzbare Feldkapazität: wenigstens 140 mm.

Im BQS 7-1 „Rekultivierungsschichten“ werden diese Vorgaben konkretisiert und um den Parameter „Luftkapazität: mindestens 8 Vol.-%“ erweitert.

Im 3. Zwischenbericht (Zusatzstudie „Wasserhaushalt der Rekultivierungsschichten“) wurde das Thema Rekultivierungsschicht und Wasserhaushaltsschicht ausführlich behandelt; an dieser Stelle wird daher nur kurz auf die Wirksamkeit der untersuchten Rekultivierungsschichten eingegangen.

Die 1,0 m dicke Rekultivierungsschicht des Versuchsfeldes E 50 hält die Vorgabe der DepV an die nutzbare Feldkapazität nicht ein (nFK: ca. 90 mm). Die Langzeit-Untersuchungen haben gezeigt, dass die Rekultivierungsschicht mehrfach bis zur Unterkante austrocknet und die darunter liegende Abdichtungskomponente (hier: Bentonitmatte) nicht vor Austrocknung und vor Wurzeleinwirkung geschützt wurde.

Die 2,0 m bzw. 1,5 m dicke Rekultivierungsschicht der zwei Teilfelder des Versuchsfeldes E 35 halten die Vorgaben der DepV an die nutzbare Feldkapazität ein (nFK: ca. 210 mm bzw. 160 mm). Die in-situ-Messungen der Bodenfeuchte haben gezeigt, dass in trockenen Sommerhalbjahren bis zur Unterkante der Rekultivierungsschicht eine deutliche Abnahme des Bodenwassergehalts stattfindet. Unterhalb der 1,5 m dicken Rekultivierungsschicht des Teilfeldes 2 wurde

in zwei Jahren sogar eine Abnahme des Wassergehaltes der mineralischen Dichtung festgestellt. Dies hat zwar bislang nicht zu einer Abnahme der Abdichtungswirkung geführt, aber es ist ein Indiz dafür, dass die 1,5 m dicke Rekultivierungsschicht die Schutzanforderung gemäß DepV nicht zu allen Zeiten vollständig erfüllt.

Gemäß BQS 5-1 „Mineralische Oberflächenabdichtungskomponenten aus natürlichen Baustoffen“, Anhang 1: „Schutzmaßnahmen gegen schädliche Wasserspannungen“ ist bei Einhaltung einer Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht von $\geq 1,5$ m und einer nFK von 200 mm in der Regel davon auszugehen, dass keine schädlichen Wasserspannungen auf die mineralische Abdichtungskomponente einwirken können.

Das Teilfeld 2 des Versuchsfeldes E 35 erfüllt die o.g. Anforderung hinsichtlich der Dicke, wenn auch nicht hinsichtlich der nFK. – Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass man bei Einhaltung einer Mindestdicke der Rekultivierungsschicht von 1,5 m nicht ohne weiteres davon ausgehen darf, dass für darunter folgende austrocknungsempfindliche Abdichtungskomponenten ein Schutz vor schädlichen Wasserspannungen gegeben ist.

8.2.2 Abdichtungskomponenten

Aus der DepV lässt sich auch für Abdichtungskomponenten, deren Wirksamkeit mit einem Durchlässigkeitsbeiwert beschrieben werden kann, sinngemäß die Anforderung ableiten, dass im Oberflächenabdichtungssystem für DK I und DK II der Durchfluss nicht mehr als 20 mm/Jahr betragen soll.

Die mineralische Abdichtungskomponente des Teilfeldes 1, Versuchsfeld E 35 hält diese Anforderung an den Durchfluss seit dem Jahr 2006 nicht mehr ein; die Durchsickerung liegt im Mittel bei 36 mm/Jahr. Die baugleich ausgeführte mineralische Abdichtungskomponente des Teilfeldes 2 hält die Anforderung an die Durchsickerung ein (Jahresmittel: 16 mm). Eine Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten der beiden Teilfelder lässt sich aus den Daten nicht ableiten. (Entgegen den Erwartungen ist die Abdichtungswirkung in dem Teilfeld 1 mit dickerer Rekultivierungsschicht (2,0 m) schlechter als in dem Teilfeld 2 mit 1,5 m Rekultivierungsschicht.)

Die Bentonitmatte als Abdichtungskomponente im Versuchsfeld E 50 hat nur in den ersten drei Beobachtungsjahren die Anforderung an den Durchfluss eingehalten. Nach einer irreversiblen Schädigung durch Austrocknung liegt die Durchsickerung der Bentonitmatte seit dem Jahr 2005

in der Größenordnung von 20 bis 80 mm/Jahr. – Die darüber liegende Rekultivierungsschicht hält allerdings weder hinsichtlich der Dicke noch hinsichtlich der nFK die Anforderungen des Anhang 1, BQS 5-5 (Schutzmaßnahmen gegen schädliche Wasserspannungen) ein.

8.3 Beurteilung der Messsysteme in den Versuchsfeldern

Die Großlysimeter-Versuchsfelder E 35 und E 50 erfüllen die gleichen Messaufgaben, wie sie auch von „Kontrollfeldern“ gemäß DepV, Anhang 1, Nr. 2.3 zu erbringen sind:

Kontrollfelder mit einer Größe von wenigstens 300 m² zur Messung des Durchflusses durch das Oberflächenabdichtungssystem sind erforderlich bei Deponien der DK I bis DK III mit Oberflächenabdichtungssystemen ohne Konvektionssperre. Diese Kontrollfelder sollen bis zum Ende der Nachsorgephase betrieben werden; d.h. dass sie mindestens 30 Jahre funktionsfähig sein müssen.

Grundsätzlich sind die Versuchsfelder E 35 und E 50 robust hergestellt und hat sich die Messtechnik (Kippwaagen zur Messung der Durchflüsse; Datenlogger zur Datenaufzeichnung) als wenig fehleranfällig und weitgehend zuverlässig erwiesen.

Allerdings zeigen sich in den Versuchsfeldern E 35 zunehmend unplausibel werdende Messergebnisse, die möglicherweise auf Fehler bzw. Schwachstellen der Wasserableitungssysteme zurückzuführen sind:

- Obwohl die beiden Teilfelder nahezu baugleich sind (bis auf die Dicke der Rekultivierungsschicht) gibt es deutliche Unterschiede in den Jahressummen der Dränabflüsse: Im Teilfeld 1 mit der dickeren Rekultivierungsschicht lagen die Dränabflüsse zunächst niedriger und dann in den Jahren bis 2008 höher als im Teilfeld 2. Für Minderbefunde im Teilfeld 2 in den Jahren 2004 und 2006 waren Ausfällungen in der Ablaufleitung verantwortlich; die Ursachen für die sonstigen Unterschiede sind
- ~~unklar~~ Im Winter 2010/11 wurden im Teilfeld 1 stark angestiegene Sickerwasserabflüsse gemessen. Diese Messwerte sind wenig plausibel, da dieses Teilfeld die dickere Rekultivierungsschicht hat und die FDR-Messungen keinen Hinweis auf Austrocknungen der mineralischen Dichtung geben. Es besteht die Vermutung, dass es (u.U. aufgrund von unregelmäßigen Setzungen des Deponiekörpers) zu Umläufigkeiten in den Wasser-

erfassungssystemen gekommen sein könnte, so dass hier ein Anteil des Dränabflusses in das darunter liegende Erfassungssystem für Durchsickerung der mineralischen Dichtung gelangen kann.

Zur Erkundung dieser unklaren Befunde wäre eine Aufgrabung in dem Versuchsfeld E 35 empfehlenswert. Dabei könnten die möglichen Fehler oder Schwachstellen der Wasserauffangsysteme begutachtet und gegebenenfalls repariert werden. Hierzu könnte folgendermaßen vorgegangen werden:

- Durchführung einer Aufgrabung im unteren Abschnitt des Versuchsfeldes E 35 im Bereich der Wasserfassungssysteme,
- Freilegung der Entwässerungsschicht und der mineralischen Dichtungsschicht in Teilbereichen,
- Begutachtung des Zustandes der Entwässerungsschicht und der mineralischen Dichtung, ggf. Probenahme für geotechnische Untersuchungen,
- Überprüfung der Dichtheit der Abdichtungselemente zwischen den einzelnen Wasserfassungs- und -ableitungssträngen (Sichtprüfung bzw. Prüfung mittels Färbemittel etc.),
- nach Möglichkeit Reparatur und Wiederherstellung der Wasserfassungssysteme,
- Wiederherstellung des Oberflächenabdichtungssystems.

Grundsätzlich ist es von großem fachlichen Interesse, die Messungen der Versuchsfelder auf der Deponie „Im Dienstfeld“ weiterzuführen. Insbesondere die Versuchsfelder E 35 mit einem Oberflächenabdichtungssystem in Anlehnung an das ehemalige Regelsystem nach TAsi für DK I sind wichtig zur Gewinnung von Erkenntnissen über die langfristige Wirksamkeit mineralischer Oberflächenabdichtungen mit verstärkter Rekultivierungsschicht. Wenn sich bei den vorgeschlagenen Aufgrabungen zeigt, dass ein reparierbarer Fehler für die nicht nachvollziehbaren Änderungen der Abflüsse verantwortlich ist, so sollte unseres Erachtens diese Reparatur vorgenommen werden um die Messungen anschließend fortführen zu können.

9 Schlussbemerkung

Die Deponieverordnung stellt an Abdichtungssysteme den Anspruch, dass die Komponenten und das Gesamtsystem nachweislich über einen Zeitraum von mindestens 100 Jahren ihre Funktion erfüllen. Dieser Nachweis kann z.B. mittels „Kontrollfeldern“ erbracht werden, wie sie gemäß DepV bei Oberflächenabdichtungssystemen ohne Konvektionssperre vorgeschrieben sind.

Die Großlysimeter-Versuchsfelder auf der Deponie „Im Dienstfeld“, über die hier berichtet wurde, stellen umfangreich instrumentierte Kontrollfelder im Sinne der DepV dar:

- Im Versuchsfeld E 35 wird ein Oberflächenabdichtungssystem mit mineralischer Abdichtungskomponente und 1,5 m bzw. 2,0 m dicker Rekultivierungsschicht seit nunmehr über 9 Jahren messtechnisch überwacht.
- Im Versuchsfeld E 50 wird ein Oberflächenabdichtungssystem mit Bentonitmatte seit ca. 12 Jahren untersucht.

Die Langzeituntersuchungen liefern Erkenntnisse über die Wirkungsweise unterschiedlicher Komponenten von Oberflächenabdichtungssystemen, die auch auf andere Deponiestandorte übertragbar sind. Bundesweit existieren nur sehr wenige weitere Versuchsfelder, in denen ähnlich lange und intensiv die Wirkungsweise von Oberflächenabdichtungs-Komponenten untersucht wird. Es wird dafür plädiert, die Messungen in den Versuchsfeldern (nach Durchführung der beschriebenen Inspektions- und Reparaturmaßnahmen) fortzusetzen.

TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH
Grundbauinstitut

Bearbeiter:



Dr.-Ing. Bernd Müllner
Baudirektor



Dr. sc. nat. Ulrich Henken-Mellies
Diplom-Geologe

10 Schriftenverzeichnis

10.1 Verordnungen, Richtlinien, Empfehlungen

AG Boden – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.) (2005):
Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Stuttgart (Schweizerbart).

Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft (2000): Merkblatt Nr. 3.6/5: Bewertung von
Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungen von Deponien und Ablagerungen.

Deponieverordnung - DepV (2009): Verordnung über Deponien und Langzeitlager, vom 27.
April 2009 (BGBl. I S. 2900).

DIBt - Deutsches Institut für Bautechnik (1995): Grundsätze für den Eignungsnachweis von
Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen. - veröffentlicht im Anhang der GDA-
Empfehlungen, 3. Auflage, 1997.

EU-Deponierichtlinie (1999): RICHTLINIE 1999/EG DES RATES vom 26. April 1999 über
Abfalldeponien (ABl. EG Nr. L 182 S. 1).

GDA-Empfehlungen, Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage 1997, herausgegeben
von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT). Verlag Ernst & Sohn. – Der aktu-
elle Stand der GDA-Empfehlungen ist unter www.GDAonline.de veröffentlicht.

LAGA (2005): LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“: Allgemeine Grundsätze
für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächen-
abdichtungssysteme (systemunabhängige Anforderungen) - veröffentlicht in „Abfallwirtschafts-
fakten 11“, herausgegeben von W. Bräcker, Staatl. Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, April
2005.

LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ (2011): Bundeseinheitliche Qualitätsstandards (BQS) für
die Komponenten der Abdichtungssysteme.

TA Abfall (1991) - Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Teil 1: Techni-
sche Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung
und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12. März 1991.

TA Siedlungsabfall (1993): Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz:
Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von
Siedlungsabfällen. 14.05.1993, Beil. Bund. Anz. Nr. 99.

10.2 Literaturverzeichnis

Albright, W.H., C.H. Benson, et al. (2006): Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site. - Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 132, p 1393 - 1403.

Albright, W.H., C.H. Benson, et al. (2004): Field water balance of landfill final covers. - Journal of Environmental Quality 33, p. 2317 - 2332.

Behling, D. (2007): Die Gleichwertigkeit von Oberflächenabdichtungen vor dem Hintergrund bundesweitere Testfelduntersuchungen. - in: Henken-Mellies (Hrsg.): 18. Nürnberger Deponie-seminar - Tagungsband; Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts Heft 86, S. 265 - 288.

Braunisch, F. (2008): Untersuchungen zum Aufbau einer funktional optimierten Rekultivierungsschicht auf einer hochbasischen Aschendeponie. – Diss. Univ. Kassel.

Egloffstein (2000): Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien. – Dissertation Univ. Karlsruhe. ICP Eigenverlag Bauen und Umwelt, Band 3, Karlsruhe.

Gartung, E., W.U. Henken-Mellies & H. Sporer (2001): Deponieabdichtungen – Zusammenstellung und Diskussion von Forschungsergebnissen für Abdichtungssysteme. – Veröffentlichungen des LGA Grundbauinstituts; Eigenverlag LGA Nürnberg, 2001, Heft 80, 122 S.

Giurgea, V. & H. Hötzl (2004): Langzeituntersuchungen von alternativen Oberflächenabdichtungssystemen: Deponie Karlsruhe-West. - in: Henken-Mellies (Hrsg.): 15. Nürnberger Deponieseminar, Tagungsband, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts Heft 82, S. 257 - 279.

Henken-Mellies, W.U. & E. Gartung (2002): Wirksamkeit einfacher Deponie-Oberflächenabdichtungen: Langzeituntersuchungen an einem Versuchsfeld in Aurach. - Müll und Abfall 1/2002.

Henken-Mellies (2007): Water balance and effectiveness of mineral landfill covers - Results of large lysimeter test-fields. - in: T. Schanz (Ed.): Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Springer Proceedings in Physics, Vol. 112, p. 369 - 376.

Henken-Mellies, W.U. (2010): GCL in a landfill final cover: 10-year record of a lysimeter field test. – in: Zanzinger, Koerner & Touze-Foltz (eds.): Proceedings 3rd International Symposium on Geosynthetic Clay Liners, SKZ, Würzburg, Sept. 2010, p. 125-132

Henken-Mellies, W.U. & A. Schweizer (2011): Long-term Performance of Landfill Covers – Results of Lysimeter Test Fields in Bavaria (Germany). – waste management & research 29 (1), 59 –68.

Hoepfner, U. (2006): Das „Speicher- und Verdunstungskonzept“ alternativer Oberflächenabdichtungen: Messung und Simulation des Wasser- und Gashaushaltes und sein Einsatz bei der Sanierung der Wismut-Altlasten. Elektronische Dissertation, Ruhr-Universität Bochum.

Horn, R. (2004): Empfehlungen zur Herstellung nicht schrumpfanfälliger mineralischer Dichtungen mit zusätzlicher tonmineralischer Wasserspeicherschicht (nstmin) für Deponieoberflächenabdichtungssysteme. - Müll und Abfall 2/2004, S. 67 – 70.

Huber, W. (2003): Dicht oder nicht dicht? - Langfristige Sickerwassermengenentwicklung bei mineralisch abgedichteten Deponien in Bayern. in: Bayerische Abfall- und Deponietage 2003, Augsburg, Tagungsband.

LANUV (2010): Langzeitbeständigkeit mineralischer Deponieabdichtungen – LANUV-Fachbericht 25 (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen).

LfU-Projekt 3260 (2002): Statistische Auswertung des Sickerwasseranfalls auf bayerischen Deponien. – Bericht der A&U GmbH im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz, November 2002.

Meer, S.R. & C.H. Benson (2007): Hydraulic Conductivity of Geosynthetic Clay Liners Exhumed from Landfill Final Covers. – Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol. 133, 550 – 563.

Melchior, S. (2002): Field studies and excavations of geosynthetic clay barriers in landfill covers. – in: Zanzinger, Koerner & Gartung (eds.): Clay Geosynthetic Barriers, Lisse, NL (Swets & Zeitlinger) p. 321 – 330.

Melchior, S. (2010): Ergebnisse zur Wirksamkeit ausgewählter Oberflächenabdichtungssysteme der Versuchsfelder der MEAB auf der Deponie Deetz. - in: Henken-Mellies (Hrsg.): Tagungsband 21. Nürnberger Deponieseminar 2010; S. 103 – 116.

Melchior, S., V. Sokollek, K. Berger & B. Steinert (2007): Achtzehn Jahre Testfelduntersuchungen auf der Deponie Georgswerder/Hamburg. - in: Tagungsband 3. Leipziger Deponiefachtagung 2007, HTWK Leipzig.

Müller, M., Lippmann-Pipke, Baumert, Schneider & Schoenherr (2005): Langzeitbetrachtungen zu ausgewählten Deponieoberflächenabdichtungen anhand realer Testfelddaten und modellgestützter Simulationsrechnungen. - in: Kilchert (Hrsg.): Tagungsband Leipziger Deponiefachtagung 2005, HTWK Leipzig.

Müller-Kirchenbauer, A. (2009): Funktionsnachweis für geotextile Tondichtungsbahnen in Deponieoberflächenabdichtungen. – Diss. Univ. Hannover (Mitteilungen Institut für Grundbau, bodenmechanik und Energiewasserbau, Heft 67).

Nydegger, R. (2010): Die Kapillarsperre – 10 Jahre Messresultate bei zwei Testfeldern auf der Deponie Heinersgrund. – in: Henken-Mellies (Hrsg.): Tagungsband 21. Nürnberger Deponieseminar, Veröffentl. des LGA-Grundbauinstituts, Heft 89, S. 69 – 80.

Ranke, H.-G., E. Gartung et al. (Hrsg.) (2002): Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen - Tagungsband. Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Bd.3, FH Höxter, 2002

Schick P. (1995) Verformbarkeit und Rissicherheit mineralischer Deponiebasisabdichtungen. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 74 S. 69 – 92

Vielhaber, B., J. Locker, D. Hütteroth, T. Junge & S. Melchior (2006): „Trockener“ Einbau von mineralischen Dichtungsschichten; Grundlagen und Praxiserfahrungen. –in: Henken-Mellies (Hrsg.): Tagungsband 17. Nürnberger Deponieseminar, S. 131 - 145.

Wattendorf, Konold & Ehrman (2005): Rekultivierungsschichten und Wurzelsperren - Herstellung, Eigenschaften, Bodenentsicklung, Funktion. - Culterra; Schriftenreihe des Instituts für Landespflege der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Bd. 41, 2005.

Wattendorf, P. (2006): Funktion und Wirksamkeit von Rekultivierungsschichten - Ergebnisse der Lysimeterfelder auf der Deponie Leonberg. - in: Henken-Mellies (Hrsg.): Tagungsband 17. Nürnberger Deponieseminar 2006; S. 71 - 89.

Weiß, K. & H. Zepp (2004): Wirksamkeit eines alternativen Deponie-Oberflächenabschluss-systems mit mineralischer Dichtungsschicht. - Müll und Abfall 3/2004, S. 131 - 134.

Witt, K.-J. (2007): Bedingungen zur Beständigkeit tonmineralischer Abdichtungskomponenten. - in: Henken-Mellies (Hrsg.): 18. Nürnberger Deponieseminar, Tagungsband, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts Heft 86, S. 115 - 134.

Wolsfeld, N. & K.-J. Arlt (2008): Ergebnisse mehrjähriger Untersuchungen der Oberflächenabdichtungs-Versuchsfelder der Dillinger Hütte, Saarland. - in: Henken-Mellies (Hrsg.): 19. Nürnberger Deponieseminar, Tagungsband, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts Heft 87, S. 75 - 86.

Wunsch, R. (1997) Zum Selbstheilungsvermögen gerissener mineralischer Oberflächendichtungen von Abfalldeponien. Bautechnik 74 (1997), Heft 9, S. 587-594

Anlagenverzeichnis

Anlagengruppe 1: Karten und Lagepläne

- Anlage 1.1 Übersichtslageplan / Ausschnitt aus Topographischer Karte 6728
Anlage 1.2 Lageplan der Deponie „Im Dienstfeld“

Anlagengruppe 2: Versuchsfeld E 35; Ergebnisse der Messungen

- Anlage 2.1 Teilfeld 1: Tageswerte des Niederschlags und der Abflüsse
Anlage 2.2 Teilfeld 2: Tageswerte des Niederschlags und der Abflüsse
Anlage 2.3 Monatssummen der Niederschläge und Abflüsse (Tabelle)
Anlage 2.4 Teilfeld 1: In-situ-Messungen; Bodenfeuchte und Temperatur
Anlage 2.5 Teilfeld 2: In-situ-Messungen; Bodenfeuchte und Temperatur

Anlagengruppe 3: Versuchsfeld E 50; Ergebnisse der Messungen

- Anlage 3.1 Tageswerte des Niederschlags und der Abflüsse
Anlage 3.2 Monatssummen der Niederschläge und Abflüsse (Tabelle)

Anlagengruppe 4: Veröffentlichungen zum Projekt LfU 3602

- Anlage 4.1 Long-term performance of Landfill Covers – Results of Lysimeter Field Tests in Bavaria (Germany) veröffentlicht in der internationalen Fachzeitschrift „waste management & research“, Band 29 , Seite 59 – 68.
Anlage 4.2 12 Jahre Großlysimeter-Untersuchungen von Oberflächenabdichtungssystemen auf der Deponie „Im Dienstfeld“/ Aurach. in: Henken-Mellies (Hrsg.): Tagungsband 22. Nürnberger Deponieseminar, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 90, S. 133 – 152.