



3. ZWISCHENBERICHT

BBGT / 69612373 /03

Datum: 22.11.2011

Auftraggeber:

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

Projekt:

LfU – Projekt 3602
Fortführung der wissenschaftlichen Betreuung der
Messfelder E 50 und E 35 auf der Deponie „Im Dienst-
feld“, Aurach

Auftrag:

Zusatzstudie: Wasserhaushalt der Rekultivierungs-
schichten

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 53 Seiten und 2 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.

H:\BBGT\Mitarbeiter\Henken_Mellies\Aurach\3602\Berichte\3-Zwischenbericht\3-Zwischenbericht-11-2011.doc/ Seite 1 von 53

TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH • Tillystraße 2 • 90431 Nürnberg **Sitz und Registergericht Nürnberg HRB 20586**
Tel.: +49 (0) 911 655-5559 • Fax: +49 (0) 911 655-5510 Geschäftsführer: Dr. Frank Voßloh, Eckhard Lippold
E-Mail: grundbauinstitut@lga.de • <http://www.lga.de> Steuer-Nr. 241/115/90733 Ust-IdNr. DE813835574

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung.....	3
2 Vorgang.....	5
3 Aufgabenstellung: Wasserhaushaltsschichten	5
4 Verwendete Literatur.....	6
5 Beschreibung der Rekultivierungsschichten.....	7
5.1 Aufgabenstellung für die bodenkundlichen Zusatzuntersuchungen	7
5.2 Versuchsfeld E 35.....	8
5.3 Versuchsfeld E 50.....	10
5.4 Deponie Weiden-West.....	14
5.5 Versuchsfelder auf der Deponie Heinersgrund.....	17
6 Beurteilung des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschichten	20
6.1 Einführung.....	20
6.2 Dokumentation der Abflussmessungen der Rekultivierungsschichten.....	20
6.3 Vergleich des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschichten	22
6.4 Vergleich mit Literatur-Daten anderer Versuchsfelder.....	27
6.5 Diskussion der Ergebnisse	28
6.6 Folgerungen für den Bau von Rekultivierungsschichten / Wasserhaushaltsschichten	31
7 HELP-Berechnungen / Modellberechnungen des Wasserhaushalts.....	33
7.1 Einführung.....	33
7.2 Kurzbeschreibung des HELP-Modells	34
7.3 HELP-Berechnungen Versuchsfeld E 35F	36
7.4 HELP-Berechnungen Versuchsfeld E 50.....	41
7.5 HELP-Berechnungen Deponie Weiden-West.....	43
7.6 HELP-Berechnungen Versuchsfeld auf der Deponie Heinersgrund.....	46
7.7 Zusammenfassende Beurteilung der HELP-Modellrechnungen	48
8 Zusammenfassung und Folgerungen	50
 Anlagenverzeichnis.....	 53

1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie zum Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten wird untersucht, welches die entscheidenden Einflussgrößen für die langfristige Effektivität von Rekultivierungsschichten bzw. Wasserhaushaltsschichten sind.

Hierzu wurden die Niederschlags- und Abflussdaten der Versuchsfelder auf der Deponie „Im Dienstfeld“ (E 35, E 50), des Versuchsfeldes auf der Deponie Heinersgrund (E 54) sowie der Deponie Weiden-West ausgewertet und verglichen. Zusätzlich war es erforderlich, durch eigene Beprobungen bodenkundliche Daten, insbesondere zur Luftkapazität und nutzbaren Feldkapazität zu gewinnen.

Die Qualität der untersuchten Rekultivierungsschichten umfasst ein weites Spektrum von der 1,0 m dicken Schicht aus schwach schluffigem Sand (Versuchsfeld E 50) über die 1,5 m bzw. 2,0 m dicken Schichten aus gemischtkörnigem Bodenmaterial (Versuchsfelder E 54 und E 35) bis zur 2,0 m dicken, gezielt locker eingebauten Wasserhaushaltsschicht aus schluffigem Feinsand der Deponie Weiden-West.

Die Untersuchungsdauer des Wasserhaushalts reicht von 4 Jahren (Weiden-West) bis zu 12 Jahren (Versuchsfeld E 50). Die mittleren Jahresniederschläge liegen zwischen 700 und 800 mm/a (mit Extremwerten zwischen 500 und 1100 mm/a). Die mittlere Höhe der Durchsickerung liegt bei 200 bis 300 mm/a bzw. 30% bis 40% vom jeweiligen Niederschlag. Angesichts der sehr unterschiedlichen Materialien und Schichtdicken der Rekultivierungsschichten sind die gemessenen Unterschiede der Durchsickerung vergleichsweise gering.

Die vergleichende Auswertung der Wasserhaushaltsdaten zeigt, dass die Schichtdicke allein keine hinreichende Bedingung für die Minimierung der Durchsickerung darstellt. Erst im Zusammenhang mit einer intensiven Vegetation, deren Wurzelwerk auch die tieferen Bereiche der Rekultivierungsschicht erschließt, sind die Voraussetzungen für eine hohe Evapotranspirationsleistung gegeben. Bei der durchgehend locker gelagerten Rekultivierungsschicht der Deponie Weiden-West, die bereits bis zu 2 m Tiefe durchwurzelt ist, ist mit Weiterentwicklung der intensiven Vegetation mit einem deutlichen Rückgang der Durchsickerung zu rechnen.

Die dicken (1,5 m bzw. 2,0 m), aber nicht locker eingebauten Rekultivierungsschichten erzielen zusammen mit dem Bewuchs keine überdurchschnittliche Evapotranspirationsleistung und keine erkennbare Verringerung der Durchsickerung. Dies ist auf eine geringe Durchwurzelung der unteren Bodenschichten zurückzuführen, was andererseits hinsichtlich des Schutzes von darunter liegenden austrocknungsempfindlichen Abdichtungskomponenten vorteilhaft ist.

Bei der Planung und Bemessung von Rekultivierungsschichten sollte vorab geklärt werden, ob die Minimierung der Durchsickerung oder der Schutz von darunter liegenden Abdichtungskomponenten gewünscht wird. Hierfür sind teilweise gegenläufige Anforderungen zu erfüllen.

Vergleichend zu den Feldmessungen wurden Wasserhaushalts-Modellrechnungen mit dem HELP-Programm durchgeführt. Sie sollten dazu dienen, die Frage zu beantworten, ob sich damit die Durchsickerung von Rekultivierungsschichten hinreichend genau prognostizieren lässt.

Als zusammenfassende Beurteilung auf der Grundlage des Vergleichs der HELP-Modellrechnungen mit langjährigen Niederschlags- und Abflussdaten der 4 Großlysimeter-Felder ist folgendes festzustellen:

- HELP-Modellrechnungen eignen sich dazu, den Wasserhaushalt unterschiedlicher Varianten von Deponieabdichtungen grundsätzlich miteinander zu vergleichen und die Abflüsse der Größenordnung nach abzuschätzen.
- Nach den hier vorgelegten Ergebnissen ist das HELP-Modell in der Lage, die Jahressummen der Absickerung aus sandigen bis grobschluffigen Rekultivierungsschichten annähernd richtig (auf +/- 15%) zu berechnen.
- Bei Rekultivierungsschichten aus dichter gelagerten Böden mit höheren bindigen Anteilen ist mit höheren Unsicherheitsspannen der HELP-Berechnungsergebnisse zu rechnen; die Abweichungen von den tatsächlichen Messwerten betragen hier 5 bis 50%.
- Es ist nicht zu empfehlen, HELP-Modellrechnungen als alleinige Bemessungs- oder Genehmigungsgrundlage für Wasserhaushaltsschichten nach DepV heranzuziehen.

2 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).

Zusätzlich zu der wissenschaftlichen Betreuung der Versuchsfelder auf der Deponie „Im Dienstfeld“ umfasst der Forschungsauftrag eine Studie über Wasserhaushaltsschichten.

Vertragsgemäß ist diese Zusatzstudie zu Wasserhaushaltsschichten bis zum 30.06.2011 im Entwurf beim Auftraggeber vorzulegen. In Absprache mit dem LfU wird der Entwurf dieser Zusatzstudie nunmehr zum 15.07.2011 vorgelegt.

3 Aufgabenstellung: Wasserhaushaltsschichten

Mit den Versuchsfeldern E35 und E 50 auf der Deponie „Im Dienstfeld“ sowie mit dem Versuchsfeld E 54 auf der Deponie Bayreuth-Heinersgrund werden langjährige Wasserhaushaltsdaten von Rekultivierungsschichten gewonnen. Ein weiterer Datensatz steht in Form des „Mega-Lysimeters“ der Oberflächenabdichtung der Deponie Weiden-West zur Verfügung.

Diese Datensätze sollen im Hinblick auf die Frage der Funktionalität von Wasserhaushaltsschichten vergleichend ausgewertet werden.

Es geht hierbei um folgende Fragestellungen:

- Was leisten Wasserhaushaltsschichten im konkreten Einsatzfall? – Welche Randbedingungen sind für die Wirksamkeit entscheidend (Schichtdicke, Bodenart, Gefüge, Bewuchs, Sonstiges)?
- (Wie) Lassen sich die anspruchsvollen Anforderungen der neuen DepV an Wasserhaushaltsschichten an Standorten in Bayern erfüllen?
- Lässt sich ihre Funktion mit Modellrechnungen (z.B. HELP) hinreichend genau prognostizieren?
- Wie sollten Rekultivierungsschichten /Wasserhaushaltsschichten gebaut werden? – Zeigt der aufwändige Einbau mit Baggerlöffel langfristig Vorteile?

Die Klima- und Abflussdaten werden an den jeweiligen Versuchsfeldern gemessen; sie werden für diese Zusatzstudie gezielt ausgewertet. Zusätzlich wurden die relevanten bodenkundlichen Daten erhoben; hierzu war eine Nachbeprobung und bodenkundliche Untersuchung erforderlich.

Die folgenden Auswertungen sollten durchgeführt werden:

- Auswertung der Wasserhaushaltsdaten zur Beurteilung der Leistung der jeweiligen Rekultivierungsschicht,
- Vergleich der Feldmessungen mit Wasserhaushalts-Modellrechnungen (HELP),
- Auswertung der bodenkundlichen Daten zur Überprüfung von systematischen Zusammenhängen zwischen Bodendaten (Bodenart, Dicke, Einbauverfahren etc.) und Wasserhaltevermögen.

Es sollte untersucht werden, welche die entscheidenden Einflussgrößen für die langfristige Effektivität von Rekultivierungsschichten bzw. Wasserhaushaltsschichten sind. Anhand dieser Erkenntnisse sollten Empfehlungen zur Optimierung der einzusetzenden Ressourcen und des Kostenaufwandes bei Planung und Bau von Rekultivierungsschichten gegeben werden.

4 Verwendete Literatur

- Barth, C. (2003): Die Wirksamkeit der Kapillarsperre als Deponieoberflächenabdichtung – Feldversuche auf der Deponie Bayreuth. Dissertation, LMU München.
- Berger, K., (1998): Validierung und Anpassung des Simulationsmodells HELP zur Berechnung des Wasserhaushalts von Deponien für deutsche Verhältnisse. Umweltbundesamt, Fachgebiet III 3.6 (Projekträger Abfallwirtschaft und Altlastensanierung des BMBF), Berlin, 569 S.
- Bodenkundliche Kartieranleitung (2005): Hrsg. von Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 5. Auflage, Hannover.
- Gallersdörfer, H. & H. Rupp (2011): Qualifizierter Einbau einer Wasserhaushaltsschicht auf der Deponie Weiden-West und Folgen für die Bodenbeschaffenheit, Bewuchs und Durchwurzelung. in: Tagungsband 22. Nürnberger Deponieseminar 2011.
- GDA-Empfehlung E 2-30 Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik – DGGT, Stand 2011

- GDA-Empfehlung E 2-31 Rekultivierungsschichten, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik – DGGT, Stand: 2011
- Melchior, S., B. Steinert & S. Raabe (2010): Ergebnisse zur Wirksamkeit ausgewählter Oberflächenabdichtungssysteme der Versuchsfelder der MEAB auf der Deponie Deetz. – in: Tagungsband 21. Nürnberger Deponieseminar 2010.
- Schroeder, P.R. & Berger, K., (2001): Das Hydrologie Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell: Benutzerhandbuch für die deutsche Version 3. Unter Mitarbeit von N.M. AZIZ, C.M. LLOYD & P.A. ZAPPI. 2., aktualisierte Auflage, Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg.
- Sokollek, V., S. Melchior, K. Berger & B. Steinert (2008): Zwanzig Jahre Überwachung und Nachsorge der gesicherten Deponie Georgswerder/Hamburg. – Tagungsband Deponieworkshop Liberec-Zittau 2008.
- Wattendorf, P., O. Ehrmann & W. Konold (2007): Wasserhaushalt qualifizierter Rekultivierungsschichten. - Zwischenbericht anlässlich des BWPLUS-Statuskolloquiums 2007.
- Wattendorf, P., O. Ehrmann & W. Konold (2010): Wasserhaushalt qualifizierter Rekultivierungsschichten. - Zwischenbericht anlässlich des Statuskolloquiums Umweltforschung Baden-Württemberg 2010.

5 Beschreibung der Rekultivierungsschichten

5.1 Aufgabenstellung für die bodenkundlichen Zusatzuntersuchungen

In den nachfolgenden Kapiteln werden die im Rahmen dieser Zusatzstudie betrachteten Rekultivierungsschichten hinsichtlich der eingesetzten Bodenmaterialien und des jeweiligen Einbauverfahrens kurz charakterisiert.

Für die Wasserhaushalts-Studie war es erforderlich, zusätzliche bodenkundliche Parameter zu ermitteln, insbesondere die nutzbare Feldkapazität (nFK). Vom Versuchsfeld E 50 liegen aus dem Jahr 2008 Bestimmungen der nFK der Rekultivierungsschicht vor. Im Versuchsfeld E 35 sowie auf der Deponie Weiden-West wurden im Jahr 2010 Schürfe in der Rekultivierungsschicht angelegt und Bodenproben zur Bestimmung der nFK entnommen. Die bodenkundliche Probenahme im Versuchsfeld E 54 auf der Deponie Heinersgrund erfolgte im Juli 2011.

5.2 Versuchsfeld E 35

5.2.1 Charakterisierung der Rekultivierungsschicht

Das Versuchsfeld E 35F besteht aus zwei Teilfeldern, die sich nur hinsichtlich der Dicke der Rekultivierungsschicht unterscheiden; ansonsten ist ihr Aufbau identisch:

- 0,2 m Oberboden (Sand, schluffig, humushaltig) mit Vegetation,
- 1,8 m (im Teilfeld 1) bzw. 1,3 m (im Teilfeld 2) Unterboden aus schluffigem Sand.

Die charakteristischen Kenngrößen der Böden sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Charakteristische Kennwerte der Rekultivierungsschicht des Versuchsfeldes E 35.

	Oberboden	Unterboden
Dicke	0,2 m	1,8 m / bzw. 1,3 m
Bodenart	Sand, schluffig, humushaltig	Sand, schluffig
Kornverteilung: Kornziffern (%-Anteile Ton / Schluff / Sand / Kies)	5 / 14/ 77/ 4	10/ 15/ 71/ 4
Trockendichte	ca. 1,6 g/cm ³	ca. 1,6 g/cm ³
k-Wert	ca. 10 ⁻⁶ m/s	ca. 10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁷ m/s

Der Bau des Versuchsfeldes fand im Herbst 2001 statt. Die Rekultivierungsschicht wurde in zwei Lagen mit einer Moorwalze vor Kopf von oben nach unten eingebaut. Die Einbaudichte wurde baubegleitend von der LGA überprüft und wies Werte von 1,5 g/cm³ bis 1,8 g/cm³ auf. Im Mai 2002 wurden nochmals ungestörte Bodenproben entnommen (im Zuge des Einbaus von in-situ-Messinstrumenten). Dabei wurden Trockendichten von zumeist 1,66 bis 1,71 g/cm³ gemessen.

Vegetation: Die Erstbegrünung des Versuchsfeldes E 35F erfolgte im Jahr 2001 mit einer handelsüblichen Gras-Kraut-Saatmischung. In der Zwischenzeit hat sich eine natürliche Vegetation eingestellt, die aus Gräsern, Kräutern (darunter u.a. auch Tiefwurzler wie Disteln, Hornklee, Ampfer) sowie abschnittsweise einer dominierenden Buschvegetation (vor allem Brombeeren) besteht. Die Vegetation unterliegt keiner regelmäßigen Pflege.

5.2.2 Aufgrabungen der Rekultivierungsschicht

Zur Gewinnung von ungestörten Bodenproben für die bodenkundlichen Untersuchungen wurde am 27.07.2010 im Teilfeld 1 (Dicke der Rekultivierungsschicht: 2,0 m) ein abgetreppter Baggerschurf mit den Tiefenstufen 0,2 m / 0,6 m / 1,0 m / 1,4 m angelegt (siehe **Abbildung 5-1**). Aus den jeweiligen Tiefenstufen wurden mittels Stechzylinder ungestörte Bodenproben gewonnen.



Abbildung 5-1: Fotodokumentation: bodenkundlicher Schurf im Teilfeld 1 (E 35).

An den Wänden des Schurfs war die Durchwurzelungsintensität der Rekultivierungsschicht zu erkennen: Der Oberboden war in einer Stärke von ca. 0,15 m stark durchwurzelt. Bis 0,6 m Tiefe waren zahlreiche Wurzeln vorhanden; darunter waren bis 1,0 m vereinzelte Wurzeln und bis 1,4 m sehr wenige, dünne Wurzeln zu erkennen.

5.2.3 Ergebnisse der bodenkundlichen Untersuchungen

Die Bestimmung der Dichte und des Wassergehalts der Bodenproben erfolgte im geotechnischen Labor der LGA. Die aufwändige Untersuchung der nutzbaren Feldkapazität und der Luftkapazität wurde im Labor von ICP, Karlsruhe durchgeführt. Nachfolgend sind die Ergebnisse der Laboruntersuchungen tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Zusammenfassung der bodenkundlichen Laboruntersuchungen an der Rekultivierungsschicht des Versuchsfeldes E 35.

Probenbez.	Entnahmetiefe	Trockendichte	Wassergehalt	nFK	Luftkapazität
	m	g/cm ³	Gew.-%	%	%
TF 1 / 1	0,2	1,75	14,5	7,3	4,0
TF 1 / 2	0,6	1,67	10,8	9,0	8,6
TF 1 / 3	1,0	1,74	13,9	12,7	4,2
TF 1 / 4	1,4	1,73	14,2	12,9	3,5

Die Trockendichte der Bodenproben liegt zwischen 1,67 und 1,75 g/cm³ und hat sich damit gegenüber der Untersuchung im Jahr 2002 (1,66 – 1,71 g/cm³) nochmals leicht erhöht. Der Boden der Rekultivierungsschicht ist offenbar im Laufe der 8 Jahre durch Sackung unter Eigengewicht etwas weiter verdichtet.

Gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung wird eine Rohdichte von 1,65 – 1,85 g/cm³ als „hohe Dichte; pt4“ bezeichnet. Die nutzbare Feldkapazität (nFK) des Unterbodens beträgt 9 – 13 Vol.-%; die Luftkapazität (LK) liegt zwischen 3,5 und 8%. Den Tabellen der Bodenkundlichen Kartieranleitung zufolge wären für einen schwach lehmigen Sand bei hoher Lagerungsdichte eine nFK von 17% und eine LK von 10% zu erwarten.

5.3 Versuchsfeld E 50

5.3.1 Charakterisierung der Rekultivierungsschicht

Die Haupt-Fragestellung des Versuchsfeldes E 50 betrifft die Langzeit-Wirksamkeit einer Bentonitmatte als Abdichtungskomponente. Die Rekultivierungsschicht war hier seinerzeit (im Jahre 1998) entsprechend den Mindest-Vorgaben der TASI mit einer Dicke von 1,0 m geplant worden, wobei gezielt ein sandiges Material eingebaut wurde, um die Reaktion der Bentonitmatte auf Trockenstress testen zu können.

Die Rekultivierungsschicht des Versuchsfeldes E 50 besteht aus zwei Schichten:

- 0,2 m Oberboden: Sand, schluffig, humushaltig
- 0,8 m Unterboden: Mittel- bis Grobsand, schwach schluffig

Tabelle 5-3: Charakteristische Kennwerte der Rekultivierungsschicht des Versuchsfeldes E 50.

	Oberboden	Unterboden
Dicke	0,2 m	0,8 m
Bodenart	Sand, schluffig, humushaltig	Sand, schwach schluffig
Kornverteilung: Kornziffern (%-Anteile Ton / Schluff / Sand / Kies)	5 / 14/ 77/ 4	4 / 9/ 85/ 2
Trockendichte	ca. 1,6 g/cm ³	ca. 1,6 g/cm ³
k-Wert	ca. 10 ⁻⁶ m/s	ca. 7 · 10 ⁻⁶ m/s

Bauverfahren: Wegen der darunter liegenden, empfindlichen dünnen Schichten (Bentonitmatte und Dränmatte) wurden die ersten 0,3 m der Rekultivierungsschicht mit der Baggerschaufel vor Kopf in das Versuchsfeld geschüttet. Anschließend erfolgte der weitere Einbau der Rekultivierungsschicht vor Kopf mittels Planierdrape.

Vegetation: Die Erstbegrünung des Versuchsfeldes E 50 erfolgte im Jahr 1998 mit einer handelsüblichen Gras-Kraut-Saatmischung. In der Zwischenzeit hat sich eine natürliche Vegetation eingestellt, die aus Gräsern, Kräutern (darunter u.a. auch Tiefwurzler wie Disteln, Hornklee, Ampfer) sowie einzelnen Büschen (z.B. Heckenrosen, Brombeeren) besteht. Die Vegetation unterliegt keiner regelmäßigen Pflege.

5.3.2 Aufgrabungen der Rekultivierungsschicht

Im Sommer 2008 war im Rahmen von Zusatzuntersuchungen für die LAGA-Zulassung von Bentonitmatten im Auftrag der Firma Huesker im Versuchsfeldes E 50 ein Baggerschurf bis 0,7 m Tiefe angelegt worden, um die Rekultivierungsschicht optisch begutachten und schichtenweise Proben für geotechnische und bodenkundliche Laboruntersuchungen zu gewinnen. Die Fotodokumentation (**Abbildung 5-2**) gibt einen Eindruck von der Probenahme.

Der Oberboden besteht gemäß feldmäßiger Bodenansprache aus einem schwach schluffigen, schwach humushaltigen, braunen Sand. Zum Untersuchungszeitpunkt war der Boden nahezu trocken. Die Durchwurzelung des Bodens ist vor allem auf die obersten ca. 10 cm konzentriert. Darunter ist der Boden augenscheinlich deutlich weniger durchwurzelt.



Abbildung 5-2: Fotodokumentation: bodenkundlicher Schurf im Versuchsfeld E 50.

Der Unterboden ist ein homogener schwach schluffiger Mittel- bis Grobsand von gelbgrauer Farbe. Der Unterboden wurde in zwei Schichten freigelegt: Zunächst wurde der Boden mit der Baggerschaufel bis 0,4 m Tiefe abgezogen. Hier erfolgte eine erste Beprobung des Unterbodens. Anschließend wurde der Schurf auf 0,7 m vertieft und der Boden erneut beprobt. Im oberen Beprobungsniveau (0,4 m) war der Boden trocken, im unteren Beprobungsniveau (0,7 m) war der Boden erdfeucht. Nach dem Vertiefen des Schurfs auf 0,7 m war zu beobachten, dass mehrere Regenwürmer an die Oberfläche krochen. Wurzeln waren im Unterboden nur vereinzelt zu erkennen.

Seitens der LGA erfolgte in allen 3 Lagen (0,1 m; 0,4 m; 0,7 m) die Entnahme von ungestörten und gestörten Bodenproben für nachfolgende Untersuchungen im Labor des LGA-Grundbauinstituts. Parallel dazu entnahm Dr. Melchior (Büro Melchior & Wittpohl, Hamburg) jeweils ungestörte Bodenproben für bodenkundliche Laboruntersuchungen.

5.3.3 Ergebnisse der bodenkundlichen Untersuchungen

Die Ergebnisse der bodenkundlichen Untersuchungen sind in **Tabelle 5-4** zusammengefasst. Die Ergebnisse des bodenkundlichen Instituts Melchior + Wittpohl, Hamburg, sind in den Laborprotokollen (**Anlagengruppe 1**) dokumentiert.

Tabelle 5-4: Versuchsfeld E 50: Ergebnisse der bodenkundlichen Untersuchungen der Rekultivierungsschicht im Jahr 2008.

	Oberboden	Unterboden	Unterboden
Entnahmetiefe	0,10 – 0,14 m	0,40 – 0,44 m	0,70 – 0,74 m
Trockendichte in g/cm³	1,415	1,503	1,547
Porenvolumen in Vol.-%	46,6	43,3	41,6
Luftkapazität in Vol.-%	19,8	29,0	26,3
Feldkapazität in Vol.-%	26,9	14,2	15,3
Permanenter Welkepunkt in Vol.-%	13,2	7,3	6,5
nutzbare Feldkapazität in Vol.-%	13,7	7,0	8,8
Wasserdurchlässigkeit		3,7 * 10 ⁻⁶ m/s	2,0 * 10 ⁻⁵ m/s

Die Trockendichte des sandigen Unterbodens beträgt ca. 1,5 bis 1,6 g/cm³, was gemäß bodenkundlicher Kartieranleitung als mittlere Dichte (pt3; Dichtebereich: 1,45 – 1,65 g/cm³) anzusprechen ist. Die Luftkapazität des Materials ist hoch; sie beträgt 26 bis 29 Vol.-%. Die nutzbare Feldkapazität des Unterbodens beträgt 7 – 9 Vol.-% und ist damit vergleichsweise gering.

Zum Vergleich: Gemäß Tabelle 56 der Bodenkundlichen Kartieranleitung hat ein grobsandiger Mittelsand bei mittlerer Trockendichte (pt3) eine Luftkapazität von 25% und eine nFK von 8,5%. In diesem Fall stimmen also die an den entnommenen Bodenproben bestimmten Werte gut mit den Tabellenwerten überein.

5.4 Deponie Weiden-West

5.4.1 Wasserhaushaltsschicht der Deponie Weiden-West

Die Oberflächenabdichtung der Deponie Weiden-West besteht aus einer insgesamt 2,3 m dicken Rekultivierungsschicht über einer Dränmatte und einer Kunststoffdichtungsbahn. Die Rekultivierungsschicht ist hinsichtlich ihrer Dicke und Materialbeschaffenheit so ausgelegt, dass sie – im Zusammenwirken mit der geplanten Vegetation – möglichst viel Niederschlagswasser zwischenspeichern und zur Verdunstung bringen kann, so dass auf lange Sicht der versickernde Anteil der Niederschläge gering ist.

Die Rekultivierungsschicht der Deponie Weiden-West besteht aus den folgenden Schichten:

- 0,15 m Humoser Oberboden: Schluff, sandig, lehmig, humushaltig,
- 1,7 m Rekultivierungsschicht / Wasserspeicherschicht: Schluff, feinsandig, lehmig,
- 0,45 m Schutzschicht: Sand, schwach schluffig
- darunter: Dränmatte und KDB

Um die gewünschte lockere Lagerung der Rekultivierungsschicht erzielen zu können, erfolgte der Einbau mittels Baggerschaufel unter Verwendung eines Schaufelseparators. Die gesamte Schichtstärke wurde einlagig eingebaut. Zur Vermeidung einer Bodenverdichtung wurde streng darauf geachtet, dass die fertiggestellte Fläche nicht befahren wurde.

Der Auswahl und der Anpflanzung der Vegetation wurde auf der Deponie Weiden-West große Bedeutung beigemessen. Als Erstbegrünung und Erosionsschutz wurde eine Kräuter-Saatkultur aufgebracht, die mit einer Gehölzsaat (bestehend aus Birken, Kiefern, Eiche und Stieleiche) kombiniert wurde. Anschließend wurde eine große Anzahl von weiteren Gehölzen angepflanzt. Nach einer Zählung der Stadtgärtnerei Weiden ca. 20.000 Gehölze pro Hektar auf der Deponie. Aufgrabungen nach 3 – 4 Jahren zeigen, dass bis zu einer Tiefe von 2 m eine deutliche Durchwurzelung der Rekultivierungsschicht zu beobachten ist.

5.4.2 Aufgrabungen der Wasserhaushaltsschicht der Deponie Weiden-West

In der Rekultivierungsschicht / Wasserhaushaltsschicht der Deponie Weiden-West wurden am 28.06.2010 zwei Schürfe angelegt (je einer auf der Nordflanke und auf der Südflanke der Deponie). Diese wurden im Auftrag der Stadt Weiden von Frau Dipl.-Geoökol. Rupp (Büro Rupp

Bodenschutz, Grafenwöhr) hinsichtlich der Durchwurzelungsintensität aufgenommen. Die gleichen Schürfe wurden von der LGA zur Entnahme ungestörter Bodenproben zur Bestimmung der nFK herangezogen. Dabei wurde in beiden Schürfen das folgende Bodenprofil aufgenommen (vgl. auch **Abbildung 5-3**):

- 0,0 – 0,1 m: Feinsand, schluffig, schwach kiesig; humushaltig; dunkelbraun.
- 0,1 – 1,8 m: Feinsand, schluffig, schwach kiesig; locker gelagert; hellbraun.
- 1,8 – 2,0 m: Sand, schwach kiesig; mitteldicht gelagert; dunkelbraun.



Abbildung 5-3: Fotodokumentation: bodenkundlicher Schurf der Rekultivierungsschicht, Deponie Weiden-West

Die Rekultivierungsschicht erwies sich durchgehend als auffällig locker gelagert: Bis zur untersten Entnahmetiefe von 1,6 m konnten die Stechzylinder zur Entnahme der ungestörten Bodenproben von Hand in den Boden eingedrückt werden, ohne Zuhilfenahme des sonst üblichen Hammers. Das gesamte Bodenprofil war durchwurzelt, bis hinein in die sandige Schutzschicht in 1,8 m Tiefe.

5.4.3 Ergebnisse der bodenkundlichen Untersuchungen

Die Ergebnisse der bodenkundlichen Untersuchungen, die vom Labor ICP, Karlsruhe durchgeführt wurden, sind in Tabelle 5-5 zusammengefasst. Die Ergebnisse im Einzelnen sind in **Anlage 2** beigefügt.

Tabelle 5-5: Zusammenfassung der bodenkundlichen Laboruntersuchungen an der Rekultivierungsschicht / Wasserhaushaltsschicht der Deponie Weiden-West.

Probenbez.	Entnahmetiefe	Trockendichte	Wassergehalt	nFK	Luftkapazität
	m	g/cm ³	Gew.-%	Vol.-%	Vol.-%
Schurf 3 (Nordflanke)					
Sch 3 / 1	0,3	1,51	8,1	7,6	25,9
Sch 3 / 2	0,7	1,56	9,6	7,7	23,9
Sch 3 / 3	1,1	1,56	8,8	8,9	22,7
Sch 3 / 4	1,5	1,58	9,3	8,3	22,5
Schurf 4 (Südflanke)					
Sch 4 / 1	0,3	1,58	8,8	8,9	24,2
Sch 4 / 2	0,7	1,51	8,5	8,1	27,3
Sch 4 / 3	1,2	1,55	9,6	8,6	25,5
Sch 4 / 4	1,6	1,60	9,5	9,6	22,4

Die Trockendichte des Bodens liegt im gesamten Bodenprofil bei 1,5 bis 1,6 g/cm³. Die Luftkapazität weist mit 22 bis 27 Vol.-% hohe Werte auf. Die nutzbare Feldkapazität liegt zwischen 7,6 und 9,6 Vol.-% und ist damit deutlich geringer, als es gemäß der Tabelle der Bodenkundlichen Kartieranleitung für einen stark schluffigen Sand (Su4) zu erwarten gewesen wäre (nFK bei pt3: 24,5 Vol.-%).

5.5 Versuchsfelder auf der Deponie Heinersgrund

5.5.1 Kurzbeschreibung der Versuchsfelder

Auf der Deponie Heinersgrund (Lkr. Bayreuth) wurden im Jahr 1999 im Rahmen des Projekts E 54 zwei Versuchsfelder zur Untersuchung der Wirksamkeit von Kapillarsperren in Oberflächenabdichtungssystemen eingerichtet. Das Versuchsfeld 1 befindet sich auf der flachen Ostflanke der Deponie (Neigung: 10%); das Versuchsfeld 2 auf der steilen Nordwestflanke (Neigung: 26%). Die Versuchsfelder haben jeweils eine Abmessung von ca. 40 m x 30 m. Ca. die Hälfte der Fläche der Versuchsfelder ist als Großlysimeter zur Erfassung der Wasserabflüsse ausgebaut. Die restliche Fläche der Versuchsfelder steht für weitere Untersuchungen zur Verfügung; in diesem Bereich erfolgten die unten beschriebenen Aufgrabungen.

Der Profilaufbau der in den Versuchsfeldern zu testenden Oberflächenabdichtung besteht aus einer 1,5 m dicken Rekultivierungsschicht/Wasserhaushaltsschicht und darunter einem Kapillarsperrensystem (aus 0,5 m Kapillarschicht [Mittel- bis Grobsand] und darunter 0,3 m Kapillarbruchschicht [Fein- bis Mittelkies]). Die Wasserhaushaltsschicht hat in diesem System vor allem die Aufgabe, starke Niederschläge zu puffern und dadurch für einen ausgeglichenen Sickerwasserzufluss zur Kapillarschicht zu sorgen.

Die gewünschte Anforderung an die Vergleichmäßigung des Abflusses aus der Rekultivierungsschicht wird in den Versuchsfeldern hauptsächlich durch die Dicke der Rekultivierungsschicht von 1,5 m erzielt. Bei den eingebauten Böden handelt es sich um örtlich anfallendes Keuper-Verwitterungsmaterial, überwiegend weit gestufte schluffige Sande. Der Einbau erfolgte mehrlagig mittels Raupenbagger vor Kopf.

5.5.2 Aufgrabung der Wasserhaushaltsschicht

Am 29.07.2011 wurden zwei Baggerschürfe in der Rekultivierungsschicht / Wasserhaushaltsschicht des flachen Versuchsfeldes angelegt und bodenkundlich aufgenommen und beprobt. Aus der Rekultivierungsschicht wurden in den Tiefenstufen 0,3 m / 0,6 m / 1,0 m ungestörte Bodenproben gewonnen zur Untersuchung der nutzbaren Feldkapazität.



Abbildung 5-4: Fotodokumentation: bodenkundlicher Schurf 1 (links) und Schurf 2 (rechts) in der Rekultivierungsschicht, Versuchsfeld E 54, Deponie Bayreuth-Heinersgrund

Die Rekultivierungsschicht besteht in beiden Schürfen aus einer ca. 0,1 m dicken, stark durchwurzelten, humosen Oberboden-Auflage und darunter aus stark schluffigem, kiesigen Sand, der mit Steinanteilen durchsetzt ist (vgl. **Abbildung 5-4**). Nach feldmäßiger Ansprache war die Rekultivierungsschicht dicht gelagert und durchgehend erdfeucht. Im Unterboden wurden sehr wenige Wurzeln festgestellt.

5.5.3 Ergebnisse der bodenkundlichen Untersuchungen

Die Ergebnisse der bodenkundlichen Untersuchungen, die vom Labor ICP, Karlsruhe durchgeführt wurden, sind in **Tabelle 5-6** zusammengefasst. Die Ergebnisse im Einzelnen sind in **Anlage 2** beigefügt.

Die Trockendichte des Bodens liegt zwischen 1,69 und 1,85 g/cm³ und ist damit gemäß bodenkundlicher Kartieranleitung als „hohe Rohdichte; pt4“ zu bezeichnen.

Die nutzbare Feldkapazität beträgt ca. 5% bis 11%, im Mittel 8,5%. Die Luftkapazität liegt zwischen 4 und 8 Vol.-%. Gemäß der Tabelle der bodenkundlichen Kartieranleitung ist für einen mittel- bis stark lehmigem Sand (SI3 bis SI4) bei hoher Rohdichte (pt4) eine nutzbare Feldkapazität von 14,5 bis 16% zu erwarten und eine Luftkapazität von 6 bis 7,5%. Hier wird erneut deutlich, dass die Werte für die nFK der erdbautechnisch hergestellten Rekultivierungsschicht um mehrere Prozentpunkte unter denen der bodenkundlichen Kartieranleitung liegen.

Tabelle 5-6: Zusammenfassung der bodenkundlichen Laboruntersuchungen an der Rekultivierungsschicht / Wasserhaushaltsschicht des Versuchsfeldes E 54 auf der Deponie Bayreuth-Heinersgrund.

Proben- bez.	Entnahme- tiefe	Trocken- dichte	Wasser- gehalt	Feld- kapazität	Welke- punkt	nFK	Luftkapazi- tät
	m	g/cm ³	Gew.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%
Sch 1 / 1	0,3	1,78	14,2	27,4	22,8	4,6	5,7
Sch 1 / 2	0,6	1,75	16,2	30,2	20,1	10,1	4,1
Sch 1 / 3	1,0	1,69	17,9	31,6	20,9	10,6	5,5
Sch 2 / 1	0,3	1,85	11,4	22,7	15,4	7,3	8,0
Sch 2 / 2	0,6	1,81	13,4	27,5	20,4	7,1	4,9
Sch 2 / 3	1,0	1,74	17,2	30,4	19,2	11,2	4,6

Nach dem Bau der Rekultivierungsschicht waren von der Universität München im Rahmen des Projekts E 54 Bodenproben untersucht worden. Demnach lag die durchschnittliche Feldkapazität des Bodenmaterials bei 30 Vol.-%; der permanente Welkepunkt betrug im Mittel 19 Vol.-%. Daraus ergibt sich eine nutzbare Feldkapazität von 11 Vol.-%. Bei der im Sommer 2011 durchgeführten Beprobung wurde in den oberen Horizonten eine geringere nFK festgestellt; in den unteren Bereichen der Rekultivierungsschicht stimmen die Werte von Feldkapazität, Welkepunkt und nFK gut mit den angegebenen Werten der Univ. München überein.

6 Beurteilung des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschichten

6.1 Einführung

Großlysimeter dienen der quantitativen Erfassung des Wasserhaushalts eines Versuchsfeldes oder eines bestimmten Bodenaufbaus. Im vorliegenden Fall steht die Durchsickerung der Rekultivierungsschicht im Mittelpunkt des Interesses. Nachfolgend werden zunächst die Wasserhaushaltsmessungen an den einzelnen Deponiestandorten als Jahressummen dokumentiert. Anschließend erfolgt eine vergleichende Beurteilung der einzelnen Rekultivierungsschichten hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Wasserhaushalt.

6.2 Dokumentation der Abflussmessungen der Rekultivierungsschichten

6.2.1 Versuchsfelder E 35 und E 50 auf der Deponie „Im Dienstfeld“

In den Versuchsfeldern E 35 und E 50 fließt das Wasser, das durch die Rekultivierungsschicht nach unten absickert, entweder als Abfluss in der Entwässerungsschicht seitlich ab (= Dränabfluss), oder es sickert durch die Dichtungsschicht hindurch. Die Absickerung aus der Rekultivierungsschicht entspricht somit der Summe aus Dränabfluss und Dichtungsdurchsickerung. Die Jahressummen der Niederschläge und der Durchsickerung gehen aus Tabelle 6-1 hervor.

Tabelle 6-1: Versuchsfelder E 35 und E 50 auf der Deponie „Im Dienstfeld“: Jahressummen der Niederschläge und der Abflüsse aus der Rekultivierungsschicht.

Jahr	Niederschlag	Abfluss E 50		Abfluss E35, TF1		Abfluss E35, TF2	
	(mm/Jahr)	(mm/Jahr)	(% von N)	(mm/Jahr)	(% von N)	(mm/Jahr)	(% von N)
1999	971.4	281.6	29%				
2000	823.7	235.9	29%				
2001	1173.9	424.8	36%				
2002	1174.3	572.2	49%				
2003	519.9	151.6	29%	78.4	15%	154.8	30%
2004	745.1	168.9	23%	179.7	24%	73.5	10%
2005	753.8	344.0	46%	177.8	24%	148.2	20%
2006	576.1	138.7	24%	276.9	48%	85.3	15%
2007	985.0	394.3	40%	374.0	38%	256.8	26%
2008	614.8	211.6	34%	274.4	45%	256.0	42%
2009	730.0	95.0	13%	439.5	60%	426.4	58%
2010	744.0	233.0	31%	238.0	32%	259.0	35%

6.2.2 Versuchsfelder E 54 auf der Deponie Heinersgrund

Im Versuchsfeld E 54 fließt das Wasser, das durch die Rekultivierungsschicht absickert, entweder in der Kapillarschicht (KS) oder in der Kapillarbruchschicht (KBS) ab. Die Absickerung aus der Rekultivierungsschicht entspricht hier der Summe aus den Abflussmessungen von KS und KBS. Die Jahressummen der Niederschläge und der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht sind in Tabelle 6-2 zusammengestellt.

Tabelle 6-2: Versuchsfelder E 54 auf der Deponie Heinersgrund: Jahressummen der Niederschläge und der Abflüsse aus der Rekultivierungsschicht.

Jahr	Niederschlag	Abfluss E 54, TF1		Abfluss E54, TF2	
	(mm/Jahr)	(mm/Jahr)	(% von N)	(mm/Jahr)	(% von N)
2000	670.8	193.1	29%	232	35%
2001	849.6	323	38%	347	41%
2002	949.9	477	50%	524	55%
2003	513.4	173	34%	162	32%
2004	676.7	210	31%	192	28%
2005	775.9	268	35%	295	38%
2006	778.2	270	35%	274	35%
2007	640.4	314	49%	308	48%
2008	730.5	307	42%	280	38%
2009	753.2	348	46%	305	40%
2010	857.4	493	57%	444	52%

6.2.3 Deponie Weiden-West

Auf der Deponie Weiden-West wird das Wasser, das durch die Rekultivierungsschicht sickert, vom darunterliegenden System aus Dränmatte und Kunststoffdichtungsbahn vollständig erfasst und gemessen.

Tabelle 6-3: Deponie Weiden-West: Jahressummen der Niederschläge und der Abflüsse aus der Rekultivierungsschicht.

Jahr	Niederschlag	Abfluss-Messung	
	(mm/Jahr)	(mm/Jahr)	(% von N)
2007	990.2	371.6	38%
2008	695.2	310.3	45%
2009	752.2	176.7	23%
2010	811.3	313.9	39%

6.3 Vergleich des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschichten

In diesem Kapitel werden die Wasserhaushaltsmessungen der einzelnen Versuchsfelder ausgewertet und miteinander verglichen, um nach Möglichkeit Empfehlungen für die Planung und den Bau von Rekultivierungsschichten / Wasserhaushaltsschichten abgeben zu können.

6.3.1 Vergleich der Durchsickerung der Rekultivierungsschichten

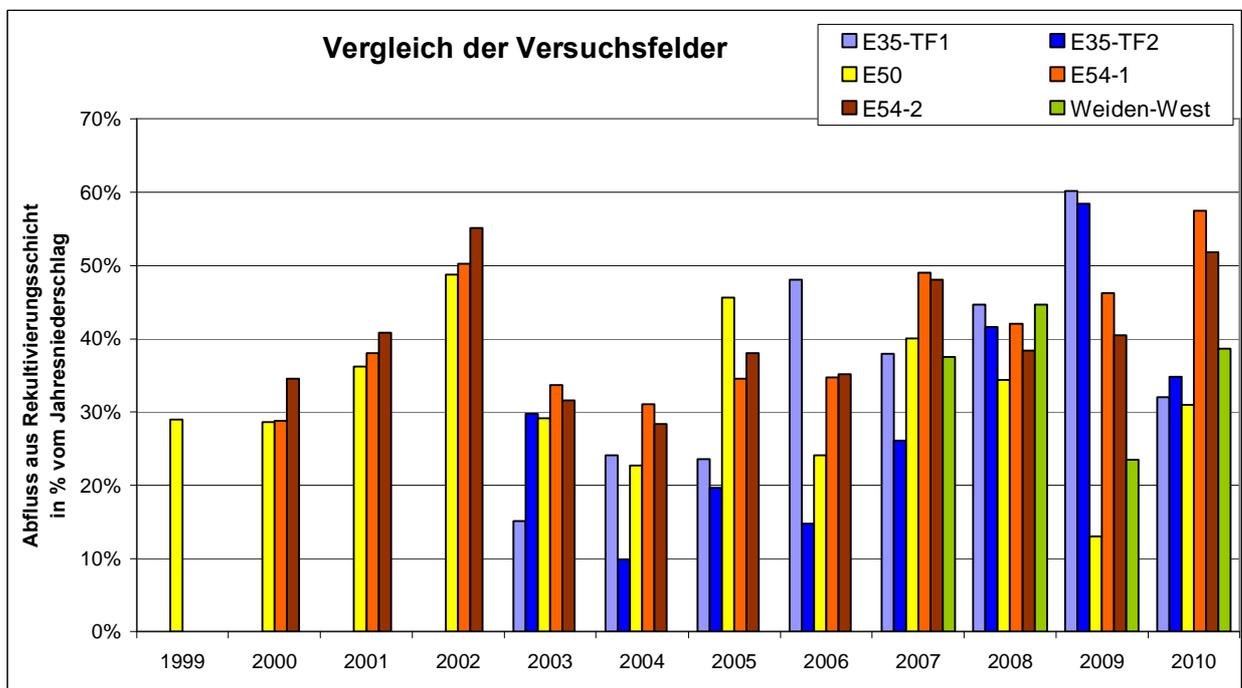


Abbildung 6-1: Vergleich der Rekultivierungsschichten: Durchsickerung in % vom Jahresniederschlag.

Abbildung 6-1 zeigt eine Gegenüberstellung der Durchsickerung der Rekultivierungsschichten der Versuchsfelder im Jahresvergleich. Dargestellt ist die Durchsickerung der einzelnen Jahre in Prozent vom Jahresniederschlag. Generell liegt die Durchsickerung zwischen 20% und 60% des Jahresniederschlages. (Einzelne „Ausreißer“ im Feld E 35 und E 50 in der Größenordnung von 10% sind auf versuchsbedingte Minderbefunde zurückzuführen.) Das Diagramm zeigt einige systematische Unterschiede der Durchsickerung zwischen den einzelnen Versuchsfeldern:

- In allen Jahren (außer 2005) ist die prozentuale Durchsickerung im Feld E 50 (1,0 m dicke, sandige Reku.) geringer als in den Feldern E 54 (1,5 m dicke sandig-schluffige Reku.).

- Die Versuchsfelder E 35 (2,0 m bzw. 1,5 m dicke sandig-schluffige Reku.) am gleichen Standort wie E 50 zeigen in den ersten Beobachtungsjahren tendenziell geringere und anschließend höhere Durchsickerungen als das Versuchsfeld E 50.
- Das Teil-Versuchsfeld E35-1 mit 2,0 m dicker Reku. weist in den meisten Jahren höhere Durchsickerungen auf als das Teilfeld E 35-2 mit 1,5 m dicker Reku.
- Die Durchsickerung an der Deponie Weiden-West (2,0 m dicke Reku.) liegt zumeist in einer ähnlichen Größenordnung wie am Standort „Im Dienstfeld“ (Versuchsfelder E 35 und E 50).

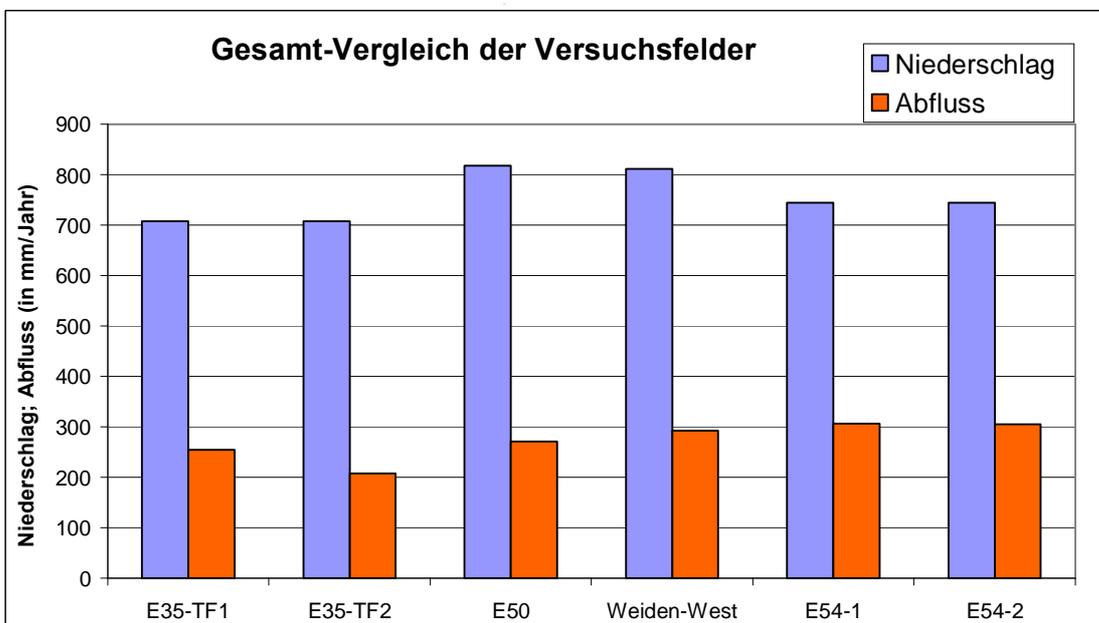


Abbildung 6-2: Vergleich der Rekultivierungsschichten: Durchschnittlicher Niederschlag am jeweiligen Deponiestandort und mittlere Durchsickerung (in mm/Jahr).

Abbildung 6-2 zeigt die Jahresdurchschnittswerte der jeweiligen Niederschläge und der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht der Versuchsfelder im Gesamt-Vergleich. Die durchschnittlichen Jahresniederschläge (bezogen auf den jeweiligen Untersuchungszeitraum) liegen zwischen 700 und 820 mm/Jahr. Die gleichen Daten, ergänzt um Prozentangaben, sind in **Tabelle 6-4** nochmals zahlenmäßig dargestellt.

Tabelle 6-4: Vergleich der Rekultivierungsschichten: Durchschnittlicher Niederschlag am jeweiligen Deponiestandort und mittlere Durchsickerung

Versuchsfeld	Niederschlag	Abfluss	Abfluss
	Jahresmittel in mm	Jahresmittel in mm	(in % von N)
E35-TF1	709	255	36%
E35-TF2	709	208	29%
E50	818	271	33%
Weiden-West	812	293	36%
E54-1	745	307	41%
E54-2	745	306	41%

Die zahlenmäßig und prozentual höchsten Durchsickerungen (mit über 300 mm/Jahr bzw. über 40% vom Niederschlag) treten in den Versuchsfeldern E 54 auf der Deponie Heinersgrund auf.

Bei den Versuchsfeldern auf der Deponie Im Dienstfeld betragen die durchschnittlichen Abflüsse ca. 210 bis 270 mm/Jahr, bzw. 29% bis 36%. Es ist nicht erkennbar, dass die nur 1,0 m dicke, sandige Rekultivierungsschicht des Feldes E 50 zu höheren Durchsickerungen führt als die 1,5 m bzw. 2,0 m dicken Rekultivierungsschichten des Versuchsfeldes E 35. Die Unterschiede innerhalb der Teilfelder E 35 sind größer als die Unterschiede zwischen E 35 und E 50.

Die durchschnittliche Durchsickerung der 2,0 m dicken Rekultivierungsschicht der Deponie Weiden-West beträgt im bisherigen, 4-jährigen Beobachtungszeitraum 293 mm/Jahr bzw. 36% vom Niederschlag.

6.3.2 Vergleich der Evapotranspiration

Nachfolgend wird ein Vergleich der Evapotranspirations-Leistung der einzelnen Rekultivierungsschichten vorgenommen. Vereinfacht lässt sich die Evapotranspiration aus der Differenz (Jahresniederschlag – Abfluss) berechnen. Hierbei bleibt der ggf. unterschiedliche Bodenwassergehalt am jeweiligen Stichtag zum Jahresende unberücksichtigt. Dies kann zu einem gewissen Bilanzierungsfehler zwischen den einzelnen Jahren führen; im Gesamt-Vergleich über mehrere Jahre spielt dieser Bilanzierungsfehler jedoch keine Rolle.

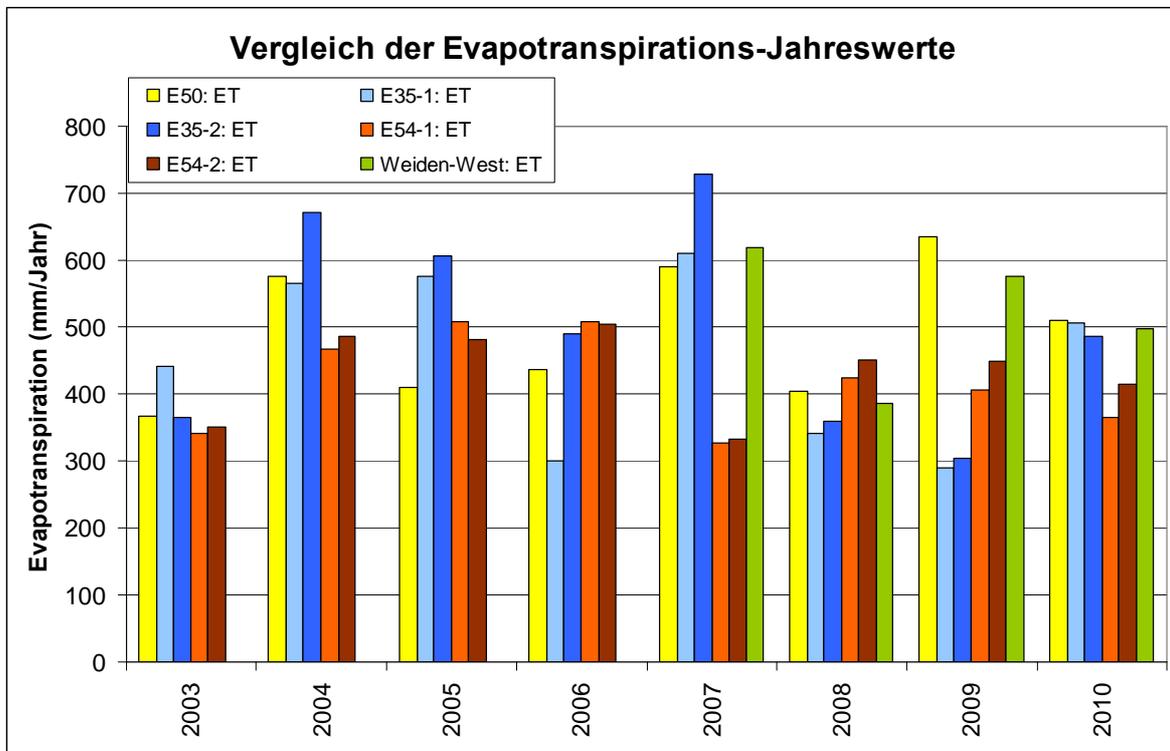


Abbildung 6-3: Vergleich der Rekultivierungsschichten: Jahressummen der Evapotranspiration (in mm/Jahr).

Abbildung 6-3 zeigt den Vergleich der jährlichen Höhe der Evapotranspiration der Versuchsfelder. Die Evapotranspiration (ET) liegt zwischen ca. 300 mm/Jahr und ca. 600 mm/Jahr. Im extremen Trockenjahr 2003 war die ET in allen Versuchsfeldern niedrig, da nur ein geringes Angebot an Niederschlagswasser (zur Verdunstung möglichen Bodenwassers) vorhanden war. – (die „potenzielle Evapotranspiration“ war in dem Jahr erheblich höher). Hohe Werte der ET werden in Jahren mit feuchten Sommerhalbjahren erreicht, so z.B. in den Jahren 2004, 2005, 2007 und 2010.

Die ET der Rekultivierungsschichten an den Standorten Im Dienstfeld und Weiden-West ist tendenziell höher als am Standort Heinersgrund. Bei der Deponie Im Dienstfeld kann dies damit zusammenhängen, dass sich die Versuchsfelder auf der Südflanke befinden. Die Versuchsfelder E 54 sind nach Osten bzw. nach Nordwesten orientiert; die Deponie Weiden-West besteht aus einem langen, flachen Osthang und einem kurzen, steileren Westhang.

6.3.3 Zusammenfassende Auswertung des Wasserhaushalts

Als zusammenfassende Auswertung der Wasserhaushalts-Daten der untersuchten Rekultivierungsschichten sind in **Abbildung 6-4** in Form eines Korrelationsdiagramms jeweils für die einzelnen Versuchsfelder Wertepaare der einzelnen Jahressummen von Niederschlag und Durchsickerung der Rekultivierungsschicht gegenübergestellt. Die Punktschar zeigt die bekannte, in erster Näherung lineare Abhängigkeit der Durchsickerung von der Niederschlagshöhe.

Die Bereiche, in denen die Punkte der unterschiedlichen Versuchsfelder zu liegen kommen, überschneiden sich stark; es ist keine Tendenz zu erkennen, dass eine bestimmte Rekultivierungsschicht bei gleichem Jahresniederschlag systematisch niedrigere oder höhere Abflüsse aufweist als die anderen.

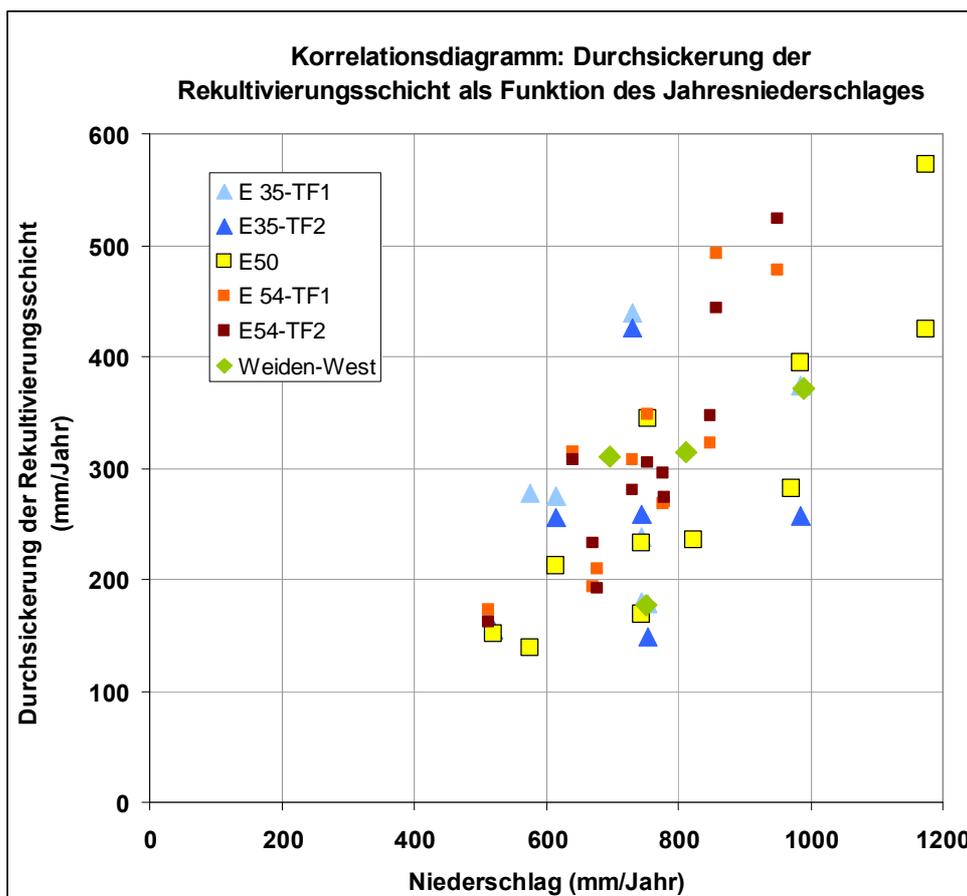


Abbildung 6-4: Vergleich der Rekultivierungsschichten: Jahressummen der Durchsickerung in Abhängigkeit vom Jahresniederschlag (in mm/Jahr).

6.4 Vergleich mit Literatur-Daten anderer Versuchsfelder

Es gibt außerhalb von Bayern einige weitere Großlysimeter, in denen über lange Jahre die Durchsickerung von Rekultivierungsschichten gemessen wird. In der Literatur zugängliche Daten liegen vor für

- Hamburg-Georgswerder („Obere Abdeckung“),
- Deponie Deetz (Wasserhaushaltsschicht I; Dicke ca. 2,0 m),
- Deponie Leonberg (unverdichtet eingebaute Rekultivierungsschicht „U-Feld“).

Diese sind in **Abbildung 6-5** zusätzlich zu den Daten der Abbildung 6-4 dargestellt.

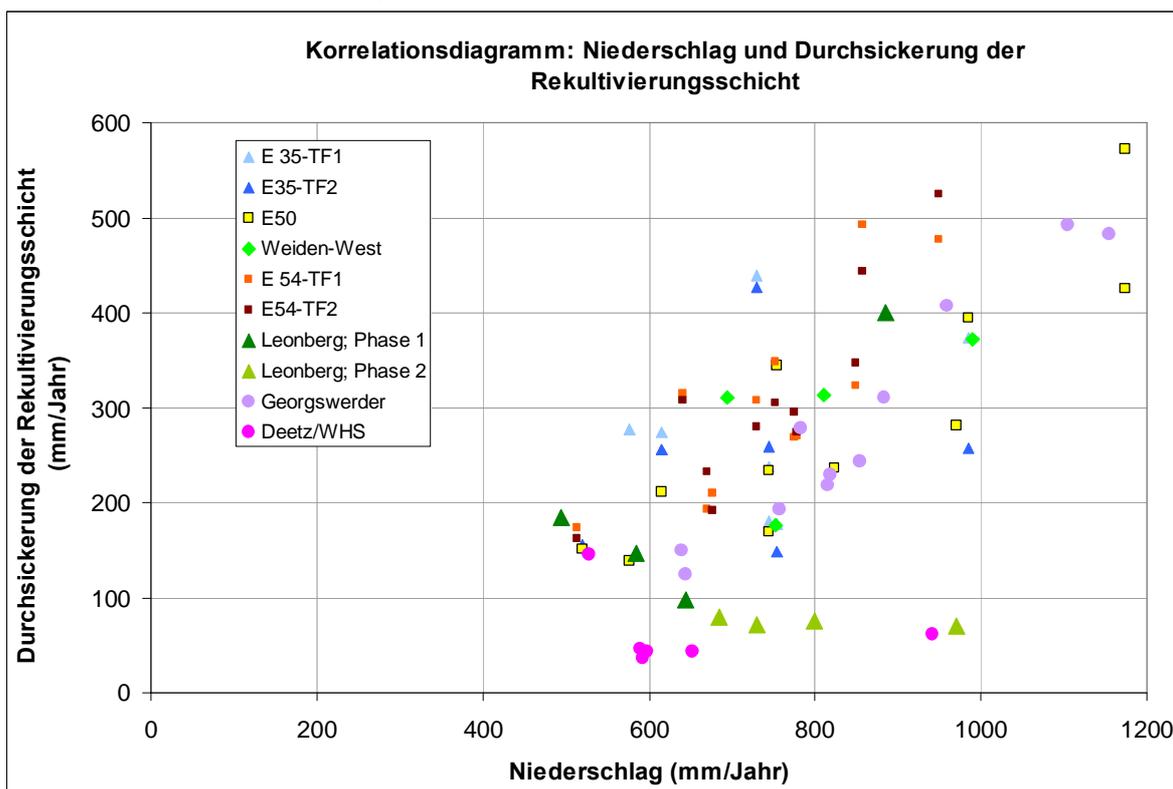


Abbildung 6-5: Vergleich der Rekultivierungsschichten: Jahressummen der Durchsickerung in Abhängigkeit vom Jahresniederschlag (in mm/Jahr).

Die Niederschlags- und Abfluss-Datenpunkte der Rekultivierungsschicht der Deponie Georgswerder liegen annähernd im gleichen Feldbereich wie die Datenpunkte der bayerischen Versuchsfelder.

Die Versuchsfelddaten der Deponie Leonberg sind in zwei Phasen unterteilt: Die erste Phase (dunkelgrüne Dreiecke in Abb. 6-5) entspricht den ersten 5 Jahren der Vegetationsentwicklung (2001 – 2005); die zweite Phase (hellgrüne Dreiecke) umfasst die Jahre 2006 – 2009, in denen sich eine vitale Busch- und Baumvegetation entwickelt hat. Deutlich ist zu erkennen, dass in Phase 1 die Jahresdaten-Punkte ungefähr in der Punktwolke der zuvor genannten Versuchsfelder liegt, während in der Phase 2, trotz ähnlich hoher Niederschläge, systematisch niedrigere Durchsickerungen zu verzeichnen sind.

Auch die Datenpunkte der Wasserhaushaltsschicht WHS1 auf der Deponie Deetz zeigt systematisch niedrige Durchsickerungen, die nicht dem oben beschriebenen linearen Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abfluss folgen.

Das Diagramm der Abbildung 6-5 zeigt, dass es bei den Wasserhaushalts-Versuchsfeldern Deetz und Leonberg gelungen ist, von der sonst üblichen linearen Beziehung zwischen Niederschlag und Durchsickerung abzuweichen. Ausschlaggebend hierfür ist offenbar eine gezielt bepflanzte, intensive Vegetation, die in den locker eingebauten Böden gute Voraussetzungen für das Wurzelwachstum vorfindet. Es bleibt abzuwarten, ob sich das Niederschlags-/Durchsickerungs-Verhältnis auf der Deponie Weiden-West mit wachsender Vegetation in ähnlicher Weise verringert.

6.5 Diskussion der Ergebnisse

6.5.1 Zusammenhang mit der Dicke der Rekultivierungsschicht

Die langjährigen Messdaten der untersuchten Großlysimeter zeigen keine Tendenz, dass sich eine größere Dicke der Rekultivierungsschicht positiv auf die Höhe der Evapotranspiration und somit auf eine Minderung der Durchsickerung auswirkt. Offenbar ist die Vegetation nicht (bzw. im Fall der Deponie Weiden-West: noch nicht) in der Lage, das in den dickeren Rekultivierungsschichten gespeicherte Bodenwasser zu erreichen und aufzubrauchen.

Die Höhe der Durchsickerung ist vor allem für Wasserhaushaltsschichten im engeren Sinne (gemäß DepV) von Belang, da diese tatsächlich an ihrer (möglichst geringen) Durchsickerung gemessen werden.

Bei sonstigen Rekultivierungsschichten ist auch die Frage der Schutzfunktion, insbesondere hinsichtlich der Austrocknung von darunter liegenden empfindlichen Abdichtungsschichten, von Belang. Hier hatten die Feldversuche und in-situ-Messungen der Felder E 35 und E 50 gezeigt, dass die 1,0 m dicke sandige Rekultivierungsschicht (E 50) keinen ausreichenden Schutz der darunterliegenden Bentonitmatte vor Durchwurzelung und periodischer Austrocknung bietet, während insbesondere die 2,0 m dicke Rekultivierungsschicht (E 35, Teilfeld 1) selbst in extremen Trockenjahren wie 2003 an der Unterkante feucht bleibt.

6.5.2 Zusammenhang mit der Vegetation

Die intensive Vegetation auf der Deponie Weiden-West macht sich im bisherigen Beobachtungszeitraum noch nicht in Form einer deutlich erhöhten Evapotranspirationsleistung bemerkbar. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass das Alter der Vegetation hier erst 4 Jahre beträgt und das Vegetationsziel eines abgestuften Waldes erst nach einem Zeitraum von deutlich über 10 Jahren erreicht sein wird.

In diesem Zusammenhang ist die Anforderung der DepV für Wasserhaushaltsschichten, dass spätestens 5 Jahre nach der Herstellung die anspruchsvollen Ziele an die Durchsickerung erreicht werden müssen, als kritisch zu bewerten. Eine auf maximale Evapotranspiration ausgelegte Baum- und Buschvegetation kann sich in so kurzer Zeit nicht ausbilden.

Bei den Versuchsfeldern E 35 scheint die Evapotranspiration nach einer anfänglichen Steigerung wieder nachzulassen. Dies kann auf erhöhte Abflüsse im Sommerhalbjahr (infolge der Ausbildung präferenzialer Fließwege) oder auf eine Verringerung der Vitalität der Vegetation zurückzuführen sein. Ähnliches wird auch von Versuchsfeldern ohne Pflege der Vegetation auf der Deponie Georgswerder berichtet.

6.5.3 Zusammenhang mit dem Bauverfahren

Im Falle der Deponie Weiden-West ist die geringe Lagerungsdichte der Rekultivierungsschicht eindeutig auf das Einbauverfahren mittels Schaufelseparator zurückzuführen. Aufgrund der lockeren Lagerung ist die Luftkapazität des Bodens sehr hoch. Pflanzenwurzeln sind in der Lage, in wenigen Jahren das gesamte Bodenprofil von 2 m Dicke zu durchwurzeln. Das lockere Substrat begünstigt das Pflanzenwachstum, und es ist längerfristig mit einer deutlichen Erhöhung der Evapotranspirationsleistung der Vegetation zu rechnen.

Die auf der Deponie Weiden-West beobachtete Tatsache, dass bei locker gelagerten Rekultivierungsschichten ein starkes Tiefenwachstum von Pflanzenwurzeln ermöglicht wird, sollte bei der Erarbeitung von Empfehlungen für die Gestaltung von Rekultivierungsschichten über austrocknungsempfindlichen Abdichtungskomponenten berücksichtigt werden. Ein lockerer Einbau der unteren Bereiche der Rekultivierungsschicht ist hier unseres Erachtens nicht sinnvoll.

Die übrigen Rekultivierungsschichten wurden jeweils in ähnlicher Weise mittels Raupe vor Kopf eingebaut (im Feld E 50 wurden die unteren ca. 0,3 m mit der Baggerschaufel vorgeschüttet.). Unabhängig vom Einbauverfahren hat die Rekultivierungsschicht des Feldes E 50 eine relativ hohe Luftkapazität (26% - 29%), während die Luftkapazität der Böden von E 35 (Aurach) und E 54 (Heinersgrund) mit 4% bis 8% gering ist.

Die Unterschiede sind vor allem auf die unterschiedliche Körnung des Materials zurückzuführen: Der Sand mit geringen Feinanteilen von E 50 ist gegen Kompaktion beim Überfahren wenig anfällig, während die schluffigen Sande der Rekultivierungsschichten von E35 und E 54 hierfür anfälliger sind.

6.6 Folgerungen für den Bau von Rekultivierungsschichten / Wasserhaushaltsschichten

Bei Rekultivierungsschichten und Wasserhaushaltsschichten gibt es zwei grundlegende Anforderungen an ihre Funktion (gemäß DepV Anhang 1, Nr. 2.3.1), die sich in den Bedingungen teilweise widersprechen:

- Rekultivierungsschichten sollen die darunter liegenden Systemkomponenten vor Durchwurzelung und vor Austrocknung schützen – dies gilt insbesondere für empfindliche Abdichtungskomponenten wie tonmineralische Dichtungen oder Bentonitmatten.
- Andererseits soll mittels eines geeigneten Bewuchses eine möglichst hohe Evapotranspiration erreicht werden. Die Vorgaben der hohen Feldkapazität (nach DepV: wenigstens 140 mm; bzw. 220 mm für WHS) und der Luftkapazität (nach BQS 7-1: über 8%) sollen dazu dienen, ein lockeres, wasserspeicherndes, leicht durchwurzelbares Bodensubstrat zu garantieren.

Wenn sich unter der Rekultivierungsschicht eine gegen Austrocknung und Durchwurzelung empfindliche Abdichtungskomponente befindet, ist es für die langfristige Funktionsfähigkeit dieser Dichtung kontraproduktiv, wenn Rekultivierungsschicht und Bewuchs hinsichtlich einer möglichst hohen Evapotranspiration optimiert werden: Eine hohe Evapotranspiration wird, wie dargestellt, über einen tiefgründig lockeren, durchwurzelbaren Boden mit optimierter Kraut- und Gehölzvegetation erreicht. Eine derartige Vegetation stellt andererseits ein deutliches Risiko für die empfindliche Abdichtungskomponente dar.

Es ist daher keinesfalls zu empfehlen, unter einer als Wasserhaushaltsschicht ausgeführten Rekultivierungsschicht als einzige Abdichtungskomponente ein gegen Austrocknung und Durchwurzelung empfindliches Material (tonmineralische Dichtung; Bentonitmatte) zu wählen.

Die Daten der bayerischen Versuchsfelder zeigen, dass die Durchsickerung der Rekultivierungsschicht in allen Fällen weit oberhalb der für Wasserhaushaltsschichten nach DepV einzuhaltenden 60 mm/Jahr liegt. Wasserhaushaltsschichten im Sinne der DepV lassen sich nach unserer Einschätzung in Bayern allenfalls in niederschlagsarmen Gebieten Unterfrankens realisieren.

Bei Altdeponien (wie der Deponie Weiden-West), die nicht dem Anwendungsbereich der DepV (2009) unterliegen, könnten weniger strenge Anforderungen hinsichtlich der Durchsickerung gestellt werden. Im Falle der Deponie Weiden-West werden die weiteren Messungen der Durchsickerung in den kommenden Jahren zeigen, ob die günstigen Bodeneigenschaften und die gezielten Bepflanzungen zu einer deutlichen Erhöhung der Evapotranspiration und damit zu einer Minderung der Durchsickerung der Komponente Wasserhaushaltsschicht führen.

Die ausgewerteten, unterschiedlich dicken Versuchsfelder in Bayern zeigen (unerwartet) ähnliche Größen der jährlichen Durchsickerung und Evapotranspiration. Eine dicke Rekultivierungsschicht als alleiniges Kriterium führt nicht zu einer Verringerung der Durchsickerung. Der Bodenwasservorrat im unteren Teil der dicken (1,5 bzw. 2,0 m), aber nicht speziell locker eingebauten Rekultivierungsschicht ist offenbar für Pflanzenwurzeln kaum zugänglich. Dies ist aber sogar von Vorteil im Hinblick auf die Zielsetzung des Schutzes von darunter befindlichen austrocknungsempfindlichen Abdichtungskomponenten.

Das Einbauverfahren der Rekultivierungsschicht hat große Auswirkungen auf die Lagerungsdichte von Böden mit bindigen Anteilen und damit auf die Durchwurzelbarkeit: Der lockere Einbau mittels Schaufelseparator auf der Deponie Weiden-West hat in wenigen Jahren zu einem vitalen Bewuchs mit starkem und tief reichenden Wurzelwachstum geführt. Die vor Kopf mit der Raupe eingeschobenen Rekultivierungsschichten der Versuchsfelder E 35 und E 54 weisen dagegen eine deutlich höhere Dichte auf und sind zur Tiefe hin nur gering durchwurzelt.

Wenn die Rekultivierungsschicht nicht ausdrücklich als Wasserhaushaltsschicht dienen soll, ist es nach unserer Ansicht nicht gerechtfertigt, einen besonderen Bauaufwand zur Erzielung lockerer Lagerungen zu treiben.

7 HELP-Berechnungen / Modellberechnungen des Wasserhaushalts

7.1 Einführung

Die Planung von Deponie-Oberflächenabdichtungen und hier insbesondere der Rekultivierungsschichten erfordert qualifizierte Abschätzungen und Prognosen des Wasserhaushalts. Hierfür sind Wasserhaushalts-Simulationsmodelle ein wichtiges Hilfsmittel. Sie können prinzipiell für folgende Aufgabenstellungen genutzt werden (nach GDA-Empfehlung E 2-30):

- Planungsphase:
 - Vergleich der hydrologischen Wirksamkeit unterschiedlich aufgebauter Abdichtungssysteme
 - Optimierung einzelner Schichten von Abdichtungssystemen
- Risikoanalysen: Abschätzung spezifischer Risiken älterer Abdichtungen im Rahmen von Gefährdungsabschätzungen
- Nachsorgephase: Abschätzung des Wasserhaushalts im Rahmen der Nachsorge

Speziell für den Wasserhaushalt von Deponien und Deponie-Abdichtungssystemen wurde in den USA das HELP-Modell (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) entwickelt (Schroeder et al., 1994). Es findet in den USA breite Anwendung und wurde im Rahmen eines BMBF-Forschungsvorhabens einer Validierung für deutsche Klimaverhältnisse unterzogen (Berger, 1998). Anschließend wurde die deutsche Version des HELP-Programms weiterentwickelt, wobei einige Schwachpunkte der Vorgängerversion eliminiert wurden (Schroeder & Berger, 2001).

Von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik wird das HELP-Modell zur Modellierung des Wasserhaushalts von Oberflächenabdichtungssystemen empfohlen, GDA-Empfehlung E 2-30.

Die Validierungsstudie des HELP-Programms bezog sich im wesentlichen auf die Testfeld-Daten von Hamburg-Georgswerder. Die umfangreichen Wasserhaushalts- und Abfluss-Messdaten aus den Versuchsfeldern auf der Deponie "Im Dienstfeld" sowie Heinersgrund sowie von der Deponie Weiden-West sollen nachfolgend für eine weitere Validierung des HELP-Modells herangezogen werden.

7.2 Kurzbeschreibung des HELP-Modells

Das HELP-Computerprogramm ist ein quasi-zweidimensionales hydrologisches Modell des Wasserhaushalts und der Wasserflüsse in Deponien. Eingabegrößen sind Angaben zum Profilaufbau der Deponie mit Kenngrößen für die einzelnen Schichten, sowie Klimadaten (Tageswerte von Niederschlag, Temperatur und Globalstrahlung sowie Quartalswerte der Luftfeuchtigkeit und die mittlere Windgeschwindigkeit). Es lassen sich vier verschiedene Schichttypen darstellen, für die die folgenden Prozesse modelliert werden:

- Reaktivierungsschichten ("Perkolationsschichten").
 - Niederschlag
 - Schneedeckenaufbau/Schneesmelze
 - Oberflächenabfluss
 - Bodenfrost
 - Infiltration und ungesättigter vertikaler Fluss
 - Pflanzenwachstum
 - Potentielle und tatsächliche Evapotranspiration
 - Speichervorgänge im Boden
- Entwässerungsschichten:
 - Lateraler Abfluss auf geneigter Sohle
- Mineralische Abdichtungsschichten:
 - Durchsickerung nach Darcy
- Kunststoffdichtungsbahnen:
 - Durchsickerung durch Fehlstellen
 - Wasserdampfdiffusion.

Für eine detailliertere Beschreibung des HELP-Programms wird auf das Benutzerhandbuch (Schroeder & Berger, 2001) und auf Validierungsstudie zu HELP (Berger, 1998) verwiesen.

Zweierlei Datensätze müssen für die Durchführung von HELP-Berechnungen eingegeben werden:

- Standortbezogene Wetterdaten und
- der Schichtenaufbau des Deponieprofils mit entsprechenden Bodeneigenschaften.

Als Eingabedaten für die klimatischen Verhältnisse wurden die am jeweiligen Standort gemessenen Niederschläge und Lufttemperaturen verwendet. Die Globalstrahlungsdaten wurden mit einer im HELP-Programm implementierten Routine synthetisch generiert, wobei Tagestemperatur, Niederschlag und die geographische Breite des Standortes als Eingangsparameter dienen. für das Versuchsfeld E 54 (Deponie Heinersgrund) standen aus dem Forschungsvorhaben der Universität München Globalstrahlungsdaten zur Verfügung.

Zur modellmäßigen Beschreibung der einzelnen Bodenschichten sind folgende Angaben erforderlich:

- Porenvolumen
- Feldkapazität
- Permanenter Welkepunkt
- Durchlässigkeitsbeiwert
- Maximale Tiefe der Bodenevaporationszone

Es ist übliche Praxis bei der Anwendung des HEPL-Rechenprogramms, mehrere Rechenläufe unter Variierung der bodenbezogenen Eingabeparameter durchzuführen, um die Bandbreite der berechneten Abflüsse zu ermitteln.

- Die Größenordnung des Porenvolumens, der Feldkapazität und des permanenten Welkepunktes der Bodenschichten kann den Tabellen der Bodenkundlichen Kartieranleitung bzw. dem deutschen Benutzerhandbuch zum HELP-Programm entnommen werden. Im vorliegenden Fall liegen darüber hinaus konkrete Laborwerte dieser Parameter vor.
- Für die Tiefe der Bodenevaporationszone und der Durchwurzelung wurde jeweils in Abhängigkeit von den vor Ort gemachten Beobachtungen eingegeben und in entsprechenden Grenzen variiert.
- Der Durchlässigkeitsbeiwert der Rekultivierungsschicht wurde ebenfalls im Rahmen der gemessenen bzw. aus den Wertetabellen abgelesenen Größenordnung variiert.

7.3 HELP-Berechnungen Versuchsfeld E 35F

Die Rekultivierungsschicht der Versuchsfelder E 35 wurde als zweischichtiger Bodenaufbau mit einer 0,2 m dicken Perkolationsschicht (Oberboden) und einer 1,8 m (Teilfeld 1) bzw. 1,3 m (Teilfeld 2) dicken Perkolationsschicht (Unterboden) modelliert. Für jedes Teilfeld wurden fünf Rechenläufe mit unterschiedlichen Parameterkombinationen durchgeführt. Die maßgeblichen, variierten Parameter sind in **Tabelle 7-1** zusammengefasst.

Tabelle 7-1: Parameterkombinationen der HELP-Rechenläufe für die Versuchsfelder E 35

Variante	Schichtaufbau	Dicke	PV	FK	WP	kF	Wurzeltiefe	BFI
		cm	Vol/Vol.	Vol/Vol.	Vol/Vol.	m/s	cm	
E35_TF1A	Schicht 1	20	0.37	0.17	0.09	1.00E-06	180	5
	Schicht 2	180	0.37	0.3	0.17	1.00E-07	180	5
E35_TF1B	Schicht 1	20	0.37	0.17	0.09	1.00E-05	180	5
	Schicht 2	180	0.37	0.3	0.17	1.00E-06	180	5
E35_TF1C	Wie E35_TF1A						100	5
E35_TF1D	Wie E35_TF1A						50	5
E35_TF1E	Schicht 1	20	0.37	0.19	0.07	1.00E-06	180	5
	Schicht 2	180	0.37	0.3	0.12	1.00E-07	180	5
E35_TF2A	Wie E35_TF1A	Dicke Schicht 2 = 130 cm					130	5
E35_TF2B	Wie E35_TF1B	Dicke Schicht 2 = 130 cm					130	5
E35_TF2C	Wie E35_TF1C	Dicke Schicht 2 = 130 cm					100	5
E35_TF2D	Wie E35_TF1D	Dicke Schicht 2 = 130 cm					50	5
E35_TF2E	Wie E35_TF1E	Dicke Schicht 2 = 130 cm					130	5

Abkürzungen: PV: Porenvolumen; FK: Feldkapazität; WP: Permanenter Welkepunkt; kF: Durchlässigkeitsbeiwert; BFI: Blattflächenindex.

Für die nutzbare Feldkapazität (= FK – WP) wurden in Variante A bis D die Werte aus der bodenkundlichen Untersuchung eingesetzt (nFK des Unterbodens = 13%). In Variante E wurde der Tabellenwert der Bodenkundlichen Kartieranleitung für schwach bis mittel lehmigen Sand bei mittlerer Rohdichte (nFK = 18%) eingesetzt.

In Variante B wurde der Durchlässigkeitsbeiwert um eine Zehnerpotenz vergrößert.

In den Varianten C und D wurde die Tiefe der Wurzelzone auf 100 cm bzw. 50 cm verringert.

Die Ergebnisse der HELP-Berechnungen sind nachfolgend graphisch aufbereitet. **Abbildung 7-1** zeigt die berechneten Monatssummen der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht und zum Vergleich die gemessenen Abflüsse im Feld E 35-Teilfeld1 (rote Datenpunkte).

Das grundsätzliche Muster der Abflusskurve mit abflusslosen Phasen im Sommerhalbjahr und wechselnd hohen Abflüssen im Winterhalbjahr wird in den HELP-Rechenläufen annähernd nachgebildet; die Abflüsse in den feuchten Sommerhalbjahren der Jahre 2008 und 2009 werden von HELP jedoch nicht abgebildet.

Im Einzelnen gibt es erhebliche Abweichungen zwischen den tatsächlichen Messwerten und den HELP-Berechnungsergebnissen. Die Kurven der HELP-Rechenläufe weichen zwar – bedingt durch die unterschiedlich angesetzten Bodeneigenschaften – durchaus voneinander ab, sie sind aber untereinander ähnlicher als die Kurve der tatsächlich gemessenen Abflüsse.

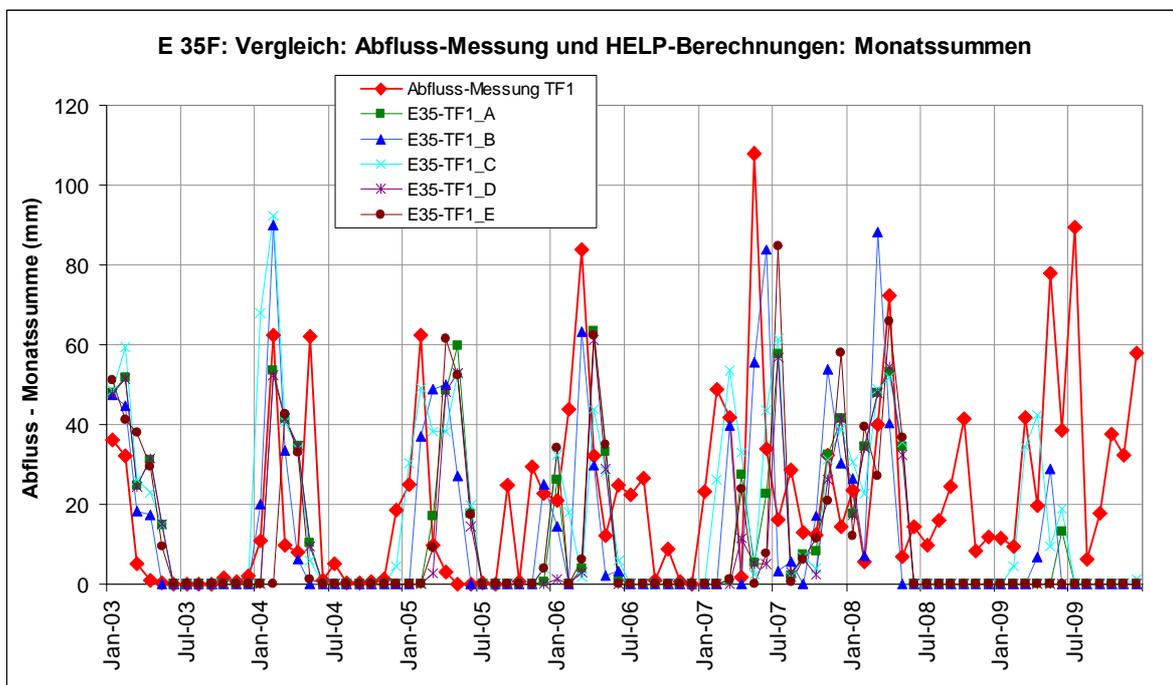


Abbildung 7-1: Monatssummen der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht: Vergleich der Abfluss-Messungen und der HELP-Rechenläufe für das Versuchsfeld E 35-Teilfeld 1.

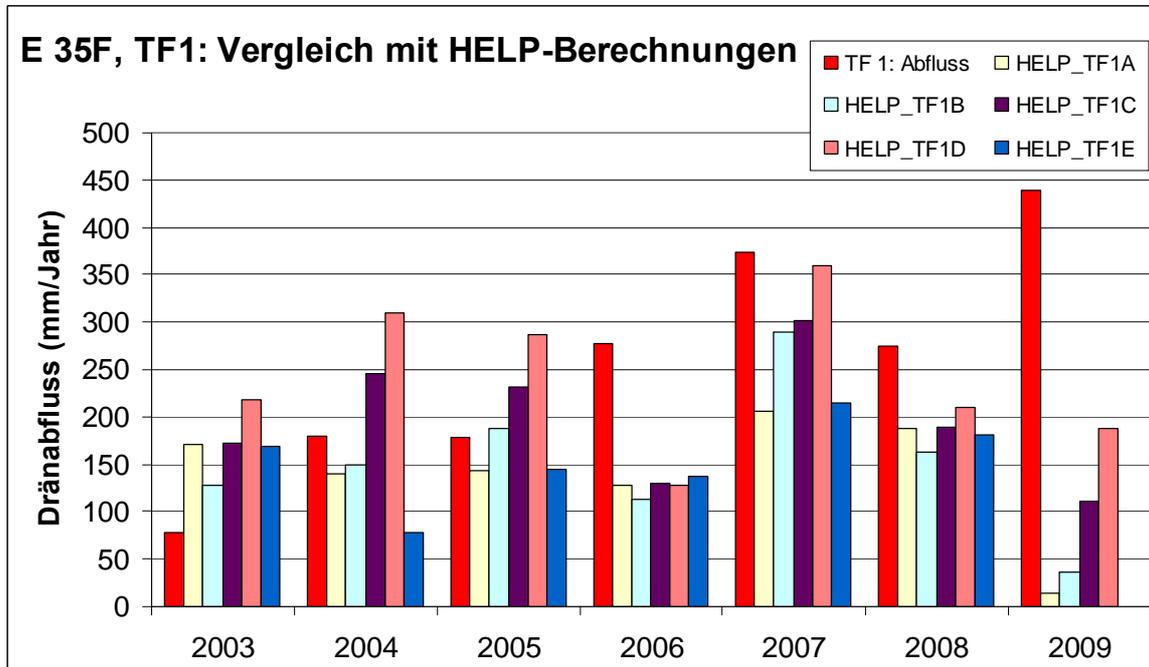


Abbildung 7-2: Jahressummen der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht: Vergleich der Abflussmessungen und der HELP-Rechenläufe für das Versuchsfeld E 35-Teilfeld 1.

Abbildung 7-2 zeigt die berechneten Jahressummen der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht und zum Vergleich die gemessenen Abflüsse im Feld E 35-Teilfeld 1 (rote Säulen). Die Ergebnisse lassen sich wie folgt beurteilen:

- Zwischen den einzelnen durchgerechneten HELP-Varianten, die alle im Bereich plausibler und begründbarer Annahmen für die Beschaffenheit der Rekultivierungsschicht liegen, gibt es erhebliche Unterschiede.
- Die höchsten Werte für die Jahressumme der Abflüsse werden generell für die Varianten „C“ und „D“ mit Durchwurzelungstiefen von 1,0 m bzw. 0,5 m errechnet.
- Die niedrigsten Jahresabflüsse werden meistens für die Variante „E“ mit der erhöht angesetzten nFK errechnet.
- Die tatsächlich gemessenen Jahreswerte der Durchsickerung weichen in den meisten Jahren erheblich von den berechneten Varianten ab. Dabei sind die gemessenen Abflüsse zum Teil niedriger (z.B. im Jahr 2003) und zum Teil erheblich höher (z.B. 2006, 2008 und 2009) als die mit HELP berechneten Abflüsse.

- Die Abweichungen der Jahressummen in den einzelnen HELP-Varianten sind durch die Unterschiede der Eingabedaten begründbar und plausibel.
- Die großen (und scheinbar unsystematischen) Abweichungen der tatsächlichen Abflussmesswerte von den HELP-Rechenergebnissen erschließen sich keiner einfachen Erklärung. – Eine Ursache der Abweichungen könnte sein, dass die tatsächliche Porenstruktur des Bodens mit Makroporen und präferenziellen Fließwegen zu komplexeren Retentions- und Fließvorgängen führt, als dies mit einem homogenen Material, das dem Darcy'schen Gesetz folgt, modelliert werden kann.

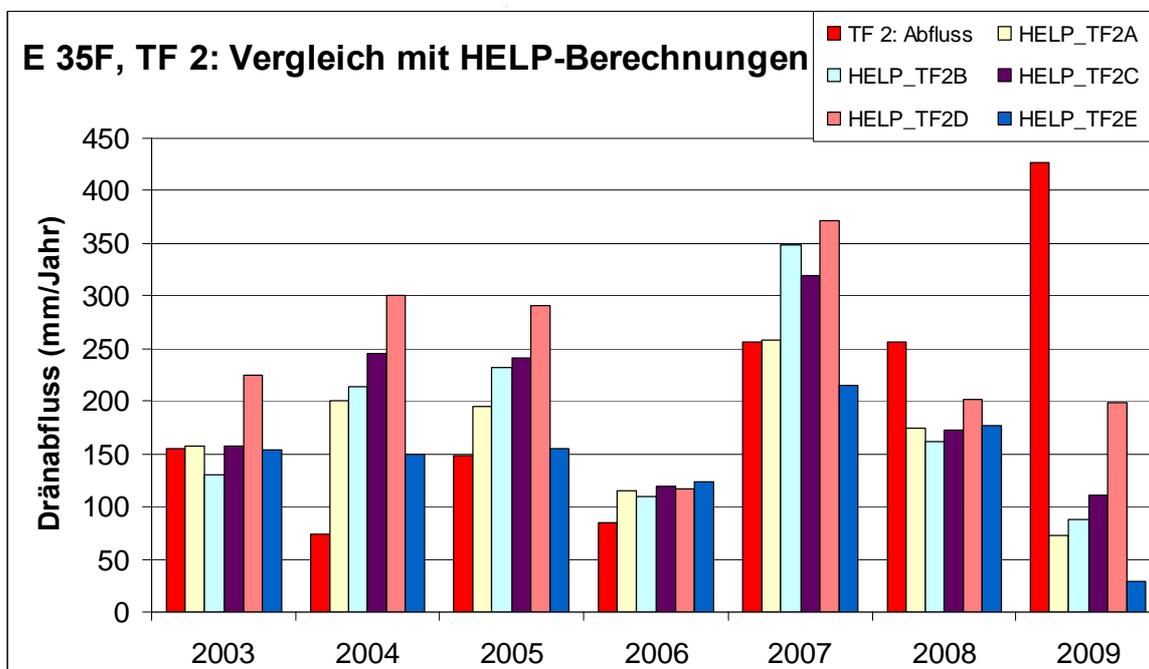


Abbildung 7-3: Jahressummen der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht: Vergleich der Abflussmessungen und der HELP-Rechenläufe für das Versuchsfeld E 35-Teilfeld 2.

Abbildung 7-3 zeigt die berechneten Jahressummen der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht und zum Vergleich die gemessenen Abflüsse im Feld E 35-Teilfeld 2 (rote Säulen). Die Ergebnisse der HELP-Rechenläufe A bis E sind jeweils ähnlich mit denen des Teilfeldes 1, wobei im Teilfeld 2 zumeist etwas höhere Abflüsse berechnet werden. Die tatsächlich gemessenen Abflüsse sind dagegen im Teilfeld 2 in den meisten Jahren geringer (was der Vermutung widerspricht, dass eine geringere Dicke der Rekultivierungsschicht zu einer erhöhten Durchsickerung führen müsste. – Die tatsächliche Ursache für die gemessenen Unterschiede ist nicht klar.)

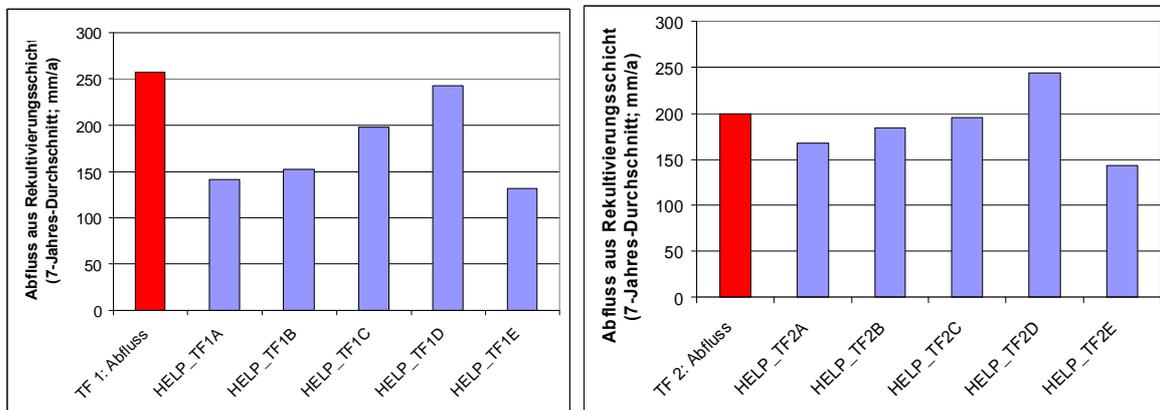


Abbildung 7-4: Gesamt-Vergleich (Jahresdurchschnitt der Durchsickerung) der Abfluss-Messungen und der HELP-Rechenläufe für das Versuchsfeld E 35-Teilfeld 1 (linkes Diagramm) und Teilfeld 2 (rechtes Diagramm).

Abbildung 7-4 zeigt als Gesamt-Vergleich die durchschnittliche Jahressumme der gemessenen Durchsickerung der Rekultivierungsschicht (rote Säulen) und der mit HELP berechneten Durchsickerung für die Varianten A bis E.

- Im Teilfeld 1 (linkes Diagramm) liegt der 7-Jahres-Durchschnitt der gemessenen Durchsickerung der Rekultivierungsschicht bei 260 mm/Jahr; die mit HELP berechnete Durchsickerung liegt je nach Variante zwischen 130 und 240 mm/Jahr.
- Im Teilfeld 2 (rechtes Diagramm) liegt der 7-Jahres-Durchschnitt der gemessenen Durchsickerung der Rekultivierungsschicht bei 200 mm/Jahr; die mit HELP berechnete Durchsickerung liegt je nach Variante zwischen 140 und 240 mm/Jahr.

Zusammenfassend ist für die HELP-Berechnungen der Rekultivierungsschicht der Versuchsfelder E 35 festzustellen, dass es auch in der summarischen Betrachtung erhebliche Abweichungen der mit HELP berechneten Abfluss-Summen von den gemessenen Abfluss-Summen gibt. Die Abweichung beträgt 10% bis 50% für Teilfeld 1 und 5% bis 30% für Teilfeld 2.

7.4 HELP-Berechnungen Versuchsfeld E 50

Die Rekultivierungsschicht des Versuchsfeldes E 50 wurde als zweischichtiger Bodenaufbau mit einer 0,2 m dicken Perkolationsschicht (Oberboden) und einer 0,8 m dicken Perkolationsschicht (Unterboden) modelliert. Insgesamt wurden 6 Rechenläufe mit unterschiedlichen Parameterkombinationen durchgeführt (siehe **Tabelle 7-2**).

Tabelle 7-2: Parameterkombinationen der HELP-Rechenläufe für das Versuchsfeld E 50

Variante	Schichtaufbau	Dicke	PV	FK	WP	kF	Wurzeltiefe	BFI
		cm	Vol/Vol.	Vol/Vol.	Vol/Vol.	m/s	cm	
E50_A	Schicht 1	20	0.47	0.27	0.13	1.00E-06	90	5
	Schicht 2	80	0.43	0.16	0.07	4.00E-06	90	5
E50_B	Schicht 1	20	0.47	0.27	0.13	1.00E-06	90	5
	Schicht 2	80	0.43	0.15	0.08	4.00E-06	90	5
E50_C	Schicht 1	20	0.47	0.27	0.13	1.00E-05	90	5
	Schicht 2	80	0.43	0.16	0.07	2.00E-05	90	5
E50_D	Schicht 1	20	0.47	0.27	0.13	1.00E-05	90	5
	Schicht 2	80	0.43	0.15	0.08	2.00E-05	90	5
E50_E	Wie Variante C, jedoch						70	5
E50_F	Wie Variante C, jedoch						90	10

Abkürzungen: PV: Porenvolumen; FK: Feldkapazität; WP: Permanenter Welkepunkt; kF: Durchlässigkeitsbeiwert; BFI: Blattflächenindex.

Die nutzbare Feldkapazität wurde in relativ engen Grenzen variiert, da die Werte der Laborergebnisse und der Tabellenwerte der Bodenkundlichen Kartieranleitung nahe beieinander liegen. Für die Varianten C und D wurde der Durchlässigkeitsbeiwert um ca. eine Zehnerpotenz erhöht. In Variante E wurde die Auswirkung einer geringeren Wurzeltiefe und in Variante F die Wirkung eines stark erhöhten Blattflächenindex (Begründung: beginnender Buschbewuchs) getestet.

Die Ergebnisse der HELP-Rechenläufe sind nachfolgend graphisch zusammengefasst. **Abbildung 7-5** zeigt die Jahressummen der gemessenen Durchsickerung des Versuchsfeldes E 50 (rote Säulen) und die jeweiligen Jahressummen der HELP-Rechenvarianten A bis F. In einigen Jahren gibt es eine recht gute Übereinstimmung der Messwerte mit den HELP-Prognosewerten (z.B. in den Jahren 2003, 2006, 2007 und 2008); in anderen Jahren werden die Abflüsse in den HELP-Berechnungen überschätzt (z.B. 2000, 2001) oder unterschätzt (z.B. 2002, 2005).

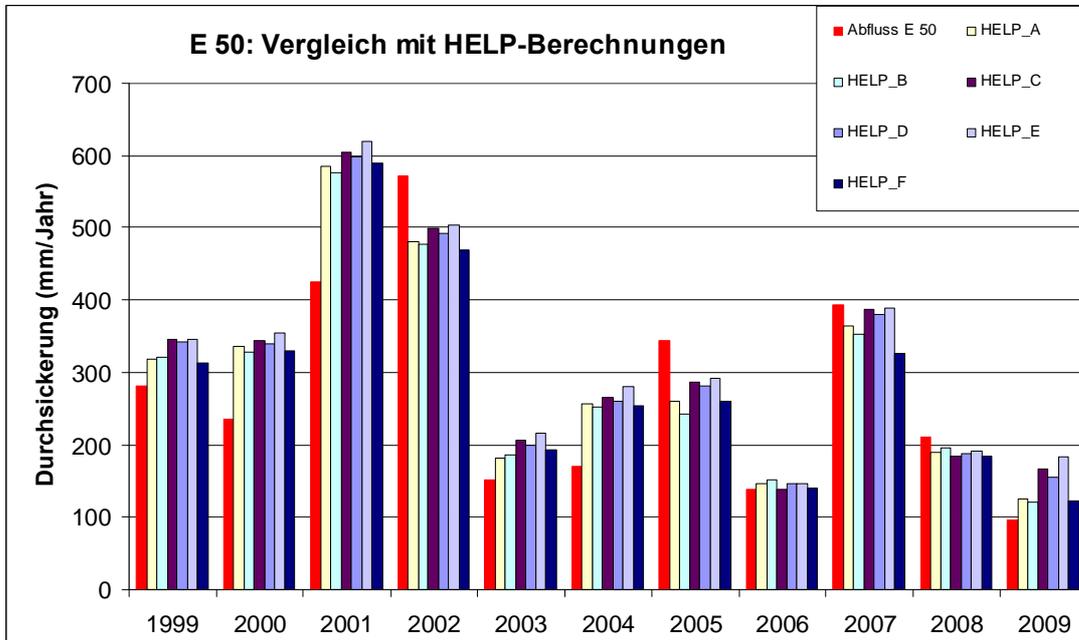


Abbildung 7-5: Jahressummen der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht: Vergleich der Abfluss-Messungen und der HELP-Rechenläufe für das Versuchsfeld E 50.

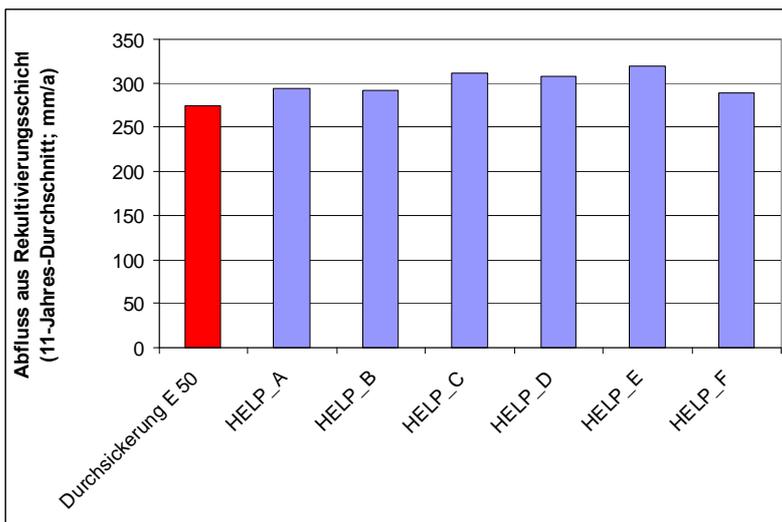


Abbildung 7-6: Gesamt-Vergleich (Jahresdurchschnitt der Durchsickerung) der Abfluss-Messungen und der HELP-Rechenläufe für das Versuchsfeld E 50.

In der summarischen Gesamtbetrachtung über den gesamten 11-jährigen Untersuchungszeitraum liegt der Jahresdurchschnitt der tatsächlich gemessenen Durchsickerung bei 275 mm/Jahr, während die mit HELP berechneten Werte in der Spanne von 290 bis 320 mm/Jahr liegen. Die Abweichung beträgt hier somit ca. 5% bis 15%.

7.5 HELP-Berechnungen Deponie Weiden-West

Der Aufbau der Oberflächenabdichtung der Deponie Weiden-West wurde als Abfolge von drei Perkolationschichten modelliert: 10 cm Oberboden; 170 cm Wasserhaushaltsschicht und 20 cm Schutzschicht. Es wurden 4 Rechenläufe mit den in **Tabelle 7-3** dargestellten Parameterkombinationen ausgeführt.

Tabelle 7-3: Übersicht über die HELP-Berechnungsvarianten für Weiden-West

Variante	Schichtaufbau	Dicke	Bodenart	PV	FK	WP	kF	Wurzeltiefe	BFI
		cm		Vol/Vol.	Vol/Vol.	Vol/Vol.	m/s	cm	
WEWE_A	Schicht 1	10	Nr. 102	0.425	0.18	0.07	1.30E-05	180	5
	Schicht 2	170	Nr. 102	0.425	0.18	0.07	1.30E-05	180	5
	Schicht 3	20	Nr. 302	0.365	0.18	0.065	5.70E-06	180	5
WEWE_L	Schicht 1	10		0.42	0.18	0.09	3.00E-06	180	5
	Schicht 2	170		0.42	0.18	0.09	3.00E-06	180	5
	Schicht 3	20	Nr. 310	0.365	0.23	0.07	2.80E-06	180	5
WEWE_U	Schicht 1	10	Nr. 120	0.47	0.32	0.12	2.50E-06	180	5
	Schicht 2	170	Nr. 120	0.47	0.32	0.12	2.50E-06	180	5
	Schicht 3	20	Nr. 310	0.365	0.23	0.07	2.80E-06	180	5
WEWE_UB	wie WEWE_U							180	10

Abkürzungen: PV = Porenvolumen; FK = Feldkapazität; WP = Permanenter Welkepunkt; kF = gesättigte Wasserdurchlässigkeit; BFI = Blattflächenindex

In der Variante A wurden für die Rekultivierungsschicht die in der deutschen HELP-Version voreingestellten Bodeneigenschaften für schwach lehmigen Sand mit geringer Lagerungsdichte herangezogen. In der Variante L wurden die Werte der Laboruntersuchungen für die Luftkapazität und nutzbare Feldkapazität verwendet. Die Variante U greift wiederum auf in HELP voreingestellte Werte zurück, hier jedoch für sandigen Schluff in geringer Lagerungsdichte. In der Variante UB ist der Blattflächenindex wegen der intensiven Vegetation auf 10 erhöht.

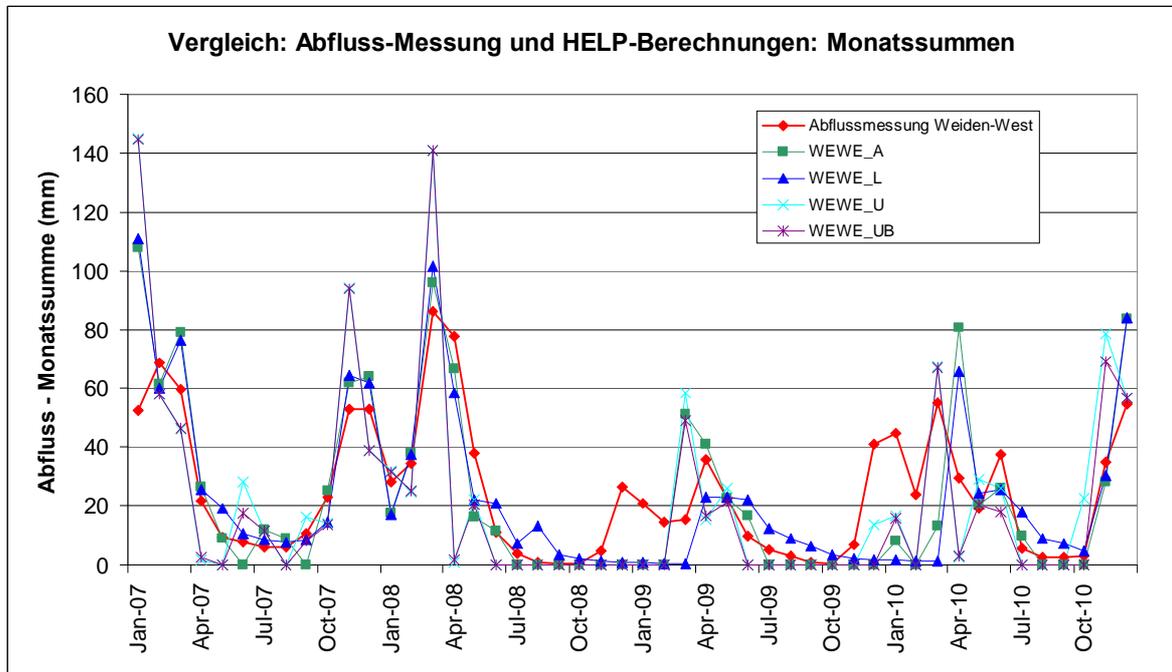


Abbildung 7-7: Deponie Weiden-West; Monatssummen der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht: Vergleich der Abfluss-Messungen und der HELP-Rechenläufe.

Abbildung 7-7 zeigt die berechneten Monatssummen der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht und zum Vergleich die gemessenen Abflüsse der Deponie Weiden-West (rote Datenpunkte). Der Kurvenverlauf zeigt in der Regel eine recht gute Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Werten. Es gibt allerdings zwei systematische Abweichungen:

- Die gemessenen Abflüsse im Herbst 2008 und 2009 nach niederschlagsreichen Sommerhalbjahren werden von HELP nicht abgebildet.
- Die Höhe der Abfluss-Spitzen in den Wintermonaten wird von allen HELP-Varianten überschätzt.

Die gemessenen bzw. mit HELP berechneten Jahressummen der Durchsickerung sind in **Abbildung 7-8** gegenübergestellt. Im Jahr 2007 sind die berechneten Abflüsse höher als die gemessenen. In den Folgejahren sind die berechneten Abflüsse dagegen niedriger als die tatsächlich gemessenen Werte. Im 4-Jahres-Durchschnitt (**Abbildung 7-9**) sind die Unterschiede vergleichsweise gering: Die durchschnittliche Durchsickerung beträgt 290 mm/Jahr; die berechneten Werte liegen mit 250 bis 280 mm/Jahr um 3% bis 13% darunter.

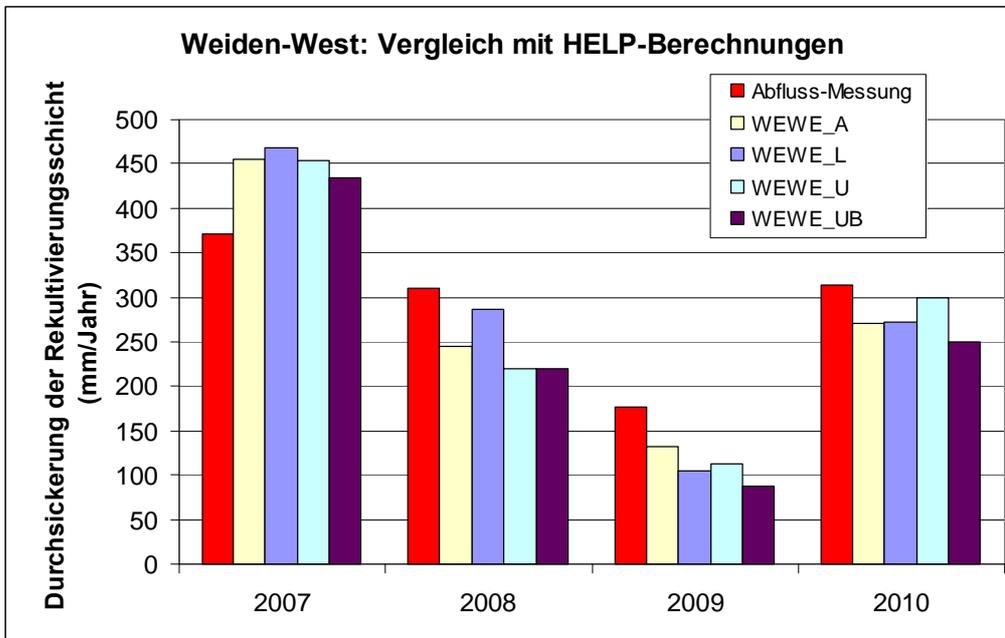


Abbildung 7-8: Deponie Weiden-West; Jahressummen der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht: Vergleich der Abfluss-Messungen und der HELP-Rechenläufe.

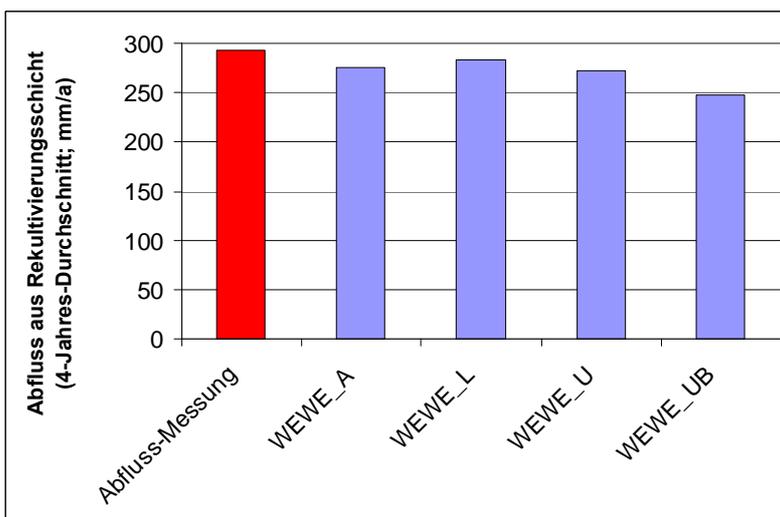


Abbildung 7-9: Deponie Weiden-West; Gesamt-Vergleich (Jahresdurchschnitt der Durchsickerung) der Abfluss-Messungen und der HELP-Rechenläufe.

7.6 HELP-Berechnungen Versuchsfeld auf der Deponie Heinersgrund

Die Rekultivierungsschicht des Versuchsfeldes E 54 auf der Deponie Heinersgrund wurde als zweischichtiger Aufbau mit den in **Tabelle 7-4** aufgeführten Varianten modelliert. Da das Material der Rekultivierungsschicht, den Angaben von Barth (2001) zufolge, ein recht weites Sieblienspektrum umfasst, wurde für Variante A ein schwach lehmiger Sand und für Variante B ein stark lehmiger Sand angesetzt (jeweils mit den in der deutschen HELP-Version voreingestellten Bodeneigenschaften). Als Variante C wurden die Werte übernommen, die Barth (2001) für die HELP-Modellierung im Rahmen seiner Dissertation verwendet hat. Variante D entspricht hinsichtlich der Bodenkennwerte der Variante A, hier wurden jedoch für die Globalstrahlung die tatsächlichen Messwerte verwendet, und nicht, wie bei den sonstigen Rechenläufen, von HELP synthetisch generierte Werte.

Tabelle 7-4: Übersicht über die HELP-Berechnungsvarianten für das Versuchsfeld E 54, Lysimeter 1 auf der Deponie Heinersgrund.

Variante	Schichtaufbau	Dicke	Bodenart	PV	FK	WP	kF	Wurzeltiefe	BFI
		cm		Vol/Vol.	Vol/Vol.	Vol/Vol.	m/s	cm	
HEINER_A	Schicht 1	10	Nr. 104	0.45	0.27	0.125	5.00E-06	100	5
	Schicht 2	140	Nr. 304	0.385	0.235	0.115	2.50E-06	100	5
HEINER_B	Schicht 1	10	Nr. 102	0.425	0.18	0.07	1.30E-05	100	5
	Schicht 2	140	Nr. 302	0.365	0.18	0.065	5.70E-06	100	5
HEINER_C	Schicht 1	10		0.32	0.28	0.19	2.20E-07	100	5
	Schicht 2	140		0.32	0.28	0.19	2.20E-07	100	5
HEINER_D	Schicht 1	10	Nr. 104	0.45	0.27	0.125	5.00E-06	100	5
	Schicht 2	140	Nr. 304	0.385	0.235	0.115	2.50E-06	100	5

Abkürzungen: PV = Porenvolumen; FK = Feldkapazität; WP = Permanenter Welkepunkt; kF = gesättigte Wasserdurchlässigkeit; BFI = Blattflächenindex

Die Jahressummen der gemessenen und der mit den HELP-Varianten berechneten Durchsickerung der Rekultivierungsschicht sind in **Abbildung 7-10** dargestellt. Es wird deutlich, dass in allen HELP-Varianten die tatsächliche Durchsickerung unterschätzt wird. Insbesondere in den Jahren ab 2007 zeigt sich eine zunehmende Abweichung zwischen den gemessenen und den modellierten Werten. Die Variante D dient der Überprüfung der Richtigkeit der mit dem im HELP-Programmpaket enthaltenen Wettergenerator für Globalstrahlungsdaten (wobei die Tagesniederschläge und der wert der geographischen Breite des Standorts zugrunde gelegt werden). Die im Allgemeinen nur geringe Abweichung zwischen Variante A und D zeigt, dass die

Verwendung der synthetisch generierten Globalstrahlungsdaten allenfalls zu einem geringen Fehler der mit HELP berechneten Abflusswerte beiträgt.

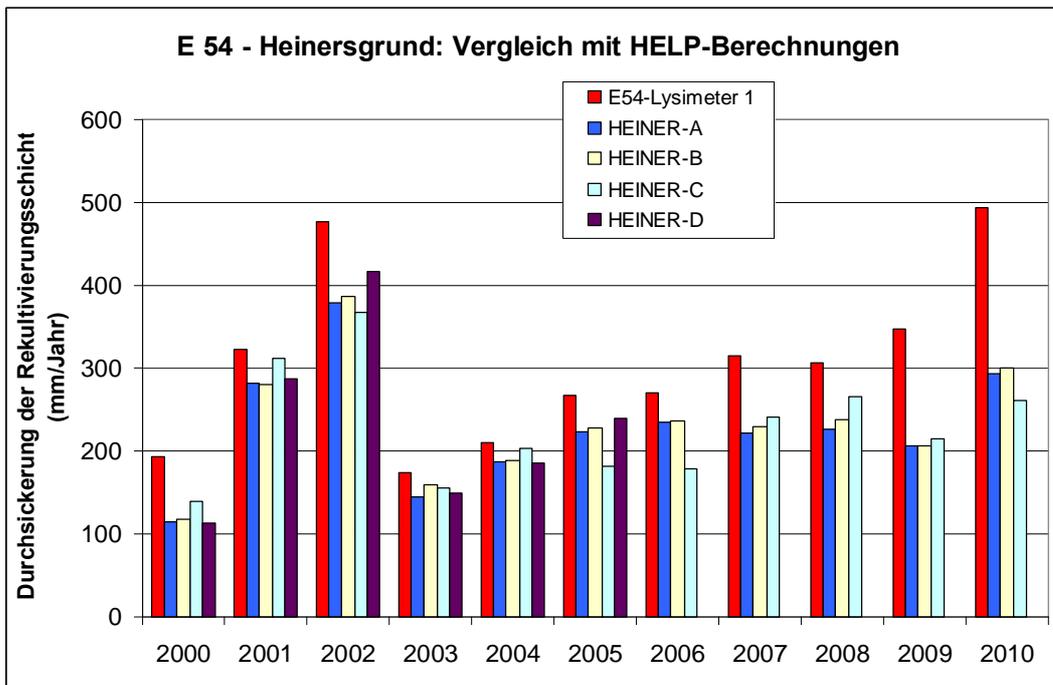


Abbildung 7-10: Deponie Heinersgrund, Versuchsfeld E 54, Lysimeter 1; Jahressummen der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht: Vergleich der Abfluss-Messungen und der HELP-Rechenläufe.

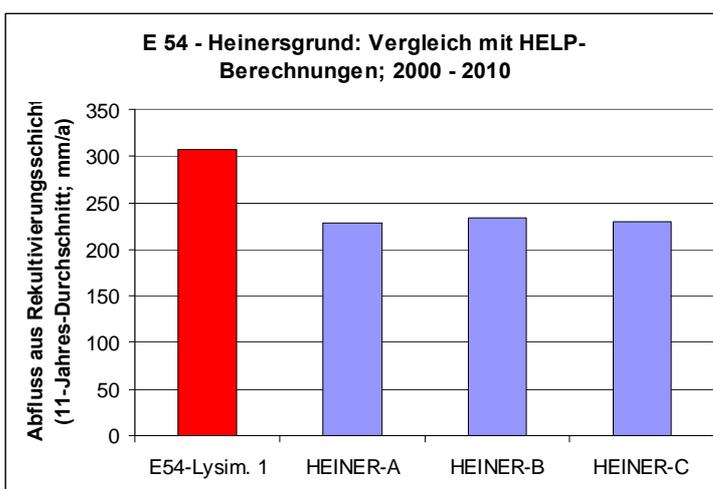


Abbildung 7-11: Deponie Heinersgrund, Versuchsfeld E 54, Lysimeter 1; Gesamt-Vergleich (Jahresdurchschnitt der Durchsickerung) der Abfluss-Messungen und der HELP-Rechenläufe.

In der summarischen Betrachtung des gesamten 11-jährigen Untersuchungszeitraum (vgl. **Abbildung 7-11**) liegt der Jahresdurchschnitt der tatsächlich gemessenen Durchsickerung im Lysimeter 1 des Versuchsfeldes E 54 bei 310 mm/Jahr, während die mit HELP berechneten Werte in der Spanne von 220 bis 230 mm/Jahr liegen. Hier liegt somit in allen Rechenläufen eine erhebliche Abweichung in der Größenordnung von 25% bis 30% vor.

7.7 Zusammenfassende Beurteilung der HELP-Modellrechnungen

Das HELP-Modell dient dazu, den Wasserhaushalt und die Abflüsse von Deponien näherungsweise zu berechnen. Insbesondere für die Beurteilung von Oberflächenabdichtungen wird HELP häufig herangezogen. Die Rekultivierungsschicht – bzw. Wasserhaushaltsschicht – stellt das oberste Teil-System eines Oberflächenabdichtungssystems dar. In der hier durchgeführten Untersuchung geht es nur um dieses oberste Teilsystem und um die Frage, in wie weit der Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten und die Größenordnung der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht mit HELP zutreffend berechnet werden kann.

Hierzu wurden langjährige (Untersuchungszeitraum: 4 – 11 Jahre) Messungen an Großlysimetern in Bayern ausgewertet. Die Datengrundlage ist als exzellent zu bezeichnen: Von den Rekultivierungsschichten sind nicht nur die Bodenarten, sondern darüber hinaus die tatsächliche Lagerungsdichte und an konkreten Proben laborativ bestimmte Werte der nutzbaren Feldkapazität und der Luftkapazität bekannt. An jedem Standort liegen örtliche Niederschlagsmessungen vor.

Als generelles Fazit der durchgeführten HELP-Modellrechnungen ist festzustellen, dass es zu meist deutliche Abweichungen zwischen den HELP-Berechnungen und den tatsächlich gemessenen Durchsickerungen der vier untersuchten Rekultivierungsschichten gibt. Bei den Versuchsfeldern E 50 (Aurach) und Weiden-West liegt die Abweichung im langjährigen Mittel bei ca. 3 – 15%. Bei den Versuchsfeldern E 35 (Aurach) und E 54 (Heinersgrund) weichen die mit HELP berechneten durchschnittlichen Jahressummen der Durchsickerung um 5 bis 50% von den tatsächlich gemessenen durchschnittlichen Jahressummen ab.

Bei Betrachtung einzelner Jahre können die Unterschiede noch größer ausfallen. Es handelt sich häufig nicht um regelmäßige, systematische Abweichungen der Modellergebnisse von den

tatsächlichen Messwerten in einer Richtung, sondern von Jahr zu Jahr wird die Durchsickerung fallweise über- oder unterschätzt.

Im Fall des Versuchsfeldes E 50 und der Rekultivierungsschicht der Deponie Weiden-West sind die Abweichungen der Modellergebnisse geringer als bei den Versuchsfeldern E 35 und E 54. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die beiden ersteren Rekultivierungsschichten aus eher gleichkörnigem Material mit hoher Porosität bestehen, in dem die Wasserbewegung annähernd mit dem Darcy'schen Gesetz beschreibbar ist. In den Versuchsfeldern E 35 und E 54 besteht die Rekultivierungsschicht aus dichter gelagerten Böden mit höheren bindigen Anteilen. In diesen Fällen finden die Abflüsse teilweise entlang von präferenziellen Fließwegen statt, was von HELP nicht modelliert wird.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Wattendorf et al. (2007) im Vergleich der Messdaten von den Leonberger Lysimeterfeldern mit HELP-Berechnungen: „Beide Modelle [HELP und BOWA-HALD] unterschätzen nicht nur die Absickerung in der Summe, auch die jahreszeitliche Verteilung der Absickerung wurde nicht naturgetreu wiedergegeben.“ Die mit HELP berechnete Summe der Durchsickerung lag für den 6-jährigen Zeitraum 2001 – 2006 um ca. 25% unter den tatsächlichen Messdaten der Leonberger Lysimeterfelder.

Als zusammenfassende Beurteilung auf der Grundlage des Vergleichs der HELP-Modellrechnungen mit langjährigen Niederschlags- und Abflussdaten der 4 Großlysimeterfelder ist folgendes festzustellen:

- HELP-Modellrechnungen eignen sich dazu, den Wasserhaushalt unterschiedlicher Varianten von Deponieabdichtungen grundsätzlich miteinander zu vergleichen und die Abflüsse der Größenordnung nach abzuschätzen.
- Nach den hier vorgelegten Ergebnissen ist das HELP-Modell in der Lage, die Jahressummen der Absickerung aus sandigen bis grobschluffigen Rekultivierungsschichten annähernd richtig (auf +/- 15%) zu berechnen.
- Bei Rekultivierungsschichten aus dichter gelagerten Böden mit höheren bindigen Anteilen ist mit höheren Unsicherheitsspannen der HELP-Berechnungsergebnisse zu rechnen; die Abweichungen von den tatsächlichen Messwerten betragen hier 5 bis 50%.
- Es ist nicht zu empfehlen, HELP-Modellrechnungen als alleinige Bemessungs- oder Genehmigungsgrundlage für Wasserhaushaltsschichten nach DepV heranzuziehen.

8 Zusammenfassung und Folgerungen

In der vorliegenden Studie zum Wasserhaushalt von Rekultivierungsschichten wurde untersucht, welches die entscheidenden Einflussgrößen für die langfristige Effektivität von Rekultivierungsschichten bzw. Wasserhaushaltsschichten sind.

Als Grundlage für die Studie wurden vier Großlysimeter-Versuchsfelder herangezogen, die nach Art und Dicke unterschiedliche Rekultivierungsschichten aufweisen. Die mehrjährigen Messreihen der Niederschläge und Abflüsse der Versuchsfelder auf der Deponie „Im Dienstfeld“ (E 35, E 50), des Versuchsfeldes auf der Deponie Heinersgrund (E 54) sowie der Deponie Weiden-West wurden ausgewertet und verglichen. Zusätzlich war es erforderlich, durch eigene Beprobungen bodenkundliche Daten, insbesondere zur Luftkapazität und zur nutzbaren Feldkapazität zu gewinnen.

Die Qualität der untersuchten Rekultivierungsschichten umfasst ein weites Spektrum von der 1,0 m dicken Schicht aus schwach schluffigem Sand (Versuchsfeld E 50) über die 1,5 m bzw. 2,0 m dicken Schichten aus gemischtkörnigem Bodenmaterial (Versuchsfelder E 54 und E 35) bis zur 2,0 m dicken, gezielt locker eingebauten Wasserhaushaltsschicht aus schluffigem Feinsand der Deponie Weiden-West.

Die Untersuchungsdauer des Wasserhaushalts reicht von 4 Jahren (Weiden-West) bis zu 12 Jahren (Versuchsfeld E 50). Die mittleren Jahresniederschläge liegen zwischen 700 und 800 mm/a (mit Extremwerten zwischen 500 und 1100 mm/a). Die mittlere Höhe der Durchsickerung liegt bei 200 bis 300 mm/a bzw. 30% bis 40% vom jeweiligen Niederschlag. Die mittlere jährliche Evapotranspiration liegt zwischen 450 mm und ca. 520 mm, bzw. 60% bis 70% vom Niederschlag.

Angesichts der sehr unterschiedlichen Materialien und Schichtdicken der Rekultivierungsschichten sind die gemessenen Unterschiede der Durchsickerung und der Evapotranspiration vergleichsweise gering.

Die vergleichende Auswertung der Wasserhaushaltsdaten zeigt, dass die Schichtdicke allein keine hinreichende Bedingung für die Minimierung der Durchsickerung darstellt. Erst im Zusammenhang mit einer intensiven Vegetation, deren Wurzelwerk auch die tieferen Bereiche der Rekultivierungsschicht erschließt, sind die Voraussetzungen für eine hohe Evapotranspirationsleistung gegeben. Bei der durchgehend locker gelagerten Rekultivierungsschicht der Deponie

Weiden-West, die bereits bis zu 2 m Tiefe durchwurzelt ist, ist mit Weiterentwicklung der intensiven Vegetation mit einem deutlichen Rückgang der Durchsickerung zu rechnen.

Die dicken (1,5 m bzw. 2,0 m), aber nicht locker eingebauten Rekultivierungsschichten erzielen zusammen mit dem Bewuchs keine überdurchschnittliche Evapotranspirationsleistung und keine erkennbare Verringerung der Durchsickerung. Dies ist auf eine geringe Durchwurzlung der unteren Bodenschichten zurückzuführen: Der Bodenwasservorrat im unteren Teil der dicken (1,5 m bzw. 2,0 m) aber nicht speziell locker eingebauten Rekultivierungsschicht ist offenbar für Pflanzenwurzeln kaum zugänglich. Dies ist aber andererseits von Vorteil im Hinblick auf die Zielsetzung des Schutzes von darunter liegenden austrocknungsempfindlichen Abdichtungskomponenten.

Das Einbauverfahren der Rekultivierungsschicht hat große Auswirkungen auf die Lagerungsdichte von Böden mit bindigen Anteilen und damit auf die Durchwurzelbarkeit: Der lockere Einbau mittels Schaufelseparator auf der Deponie Weiden-West hat in wenigen Jahren zu einem vitalen Bewuchs mit starkem und tief reichenden Wurzelwachstum geführt. Die vor Kopf mit der Raupe eingeschobenen Rekultivierungsschichten der Versuchsfelder E 35 und E 54 weisen dagegen eine deutlich höhere Dichte auf und sind zur Tiefe hin nur gering durchwurzelt.

Bei der Planung und Bemessung von Rekultivierungsschichten sollte vorab geklärt werden, ob die Minimierung der Durchsickerung oder der Schutz von darunter liegenden Abdichtungskomponenten gewünscht wird. Hierfür sind teilweise gegenläufige Anforderungen zu erfüllen.

Wenn die Rekultivierungsschicht nicht ausdrücklich als Wasserhaushaltsschicht dienen soll, ist es nach unserer Ansicht nicht gerechtfertigt, regelmäßig einen besonderen Bauaufwand zur Erzielung lockerer Lagerungen zu treiben. Zum Schutz von darunter liegenden austrocknungsempfindlichen Abdichtungskomponenten ist eine mit konventionellem Erdbau hergestellte Rekultivierungsschicht, die das Tiefenwachstum von Wurzeln beschränkt, unseres Erachtens sogar von Vorteil.

Vergleichend zu den Feldmessungen wurden Wasserhaushalts-Modellrechnungen mit dem HELP-Programm durchgeführt. Sie sollten dazu dienen, die Frage zu beantworten, ob sich damit die Durchsickerung von Rekultivierungsschichten hinreichend genau prognostizieren lässt.

Als zusammenfassende Beurteilung auf der Grundlage des Vergleichs der HELP-Modellrechnungen mit langjährigen Niederschlags- und Abflussdaten der 4 Großlysimeter-Felder ist folgendes festzustellen:

- HELP-Modellrechnungen eignen sich dazu, den Wasserhaushalt unterschiedlicher Varianten von Deponieabdichtungen grundsätzlich miteinander zu vergleichen und die Abflüsse der Größenordnung nach abzuschätzen.
- Nach den hier vorgelegten Ergebnissen ist das HELP-Modell in der Lage, die Jahressummen der Absickerung aus sandigen bis grobschluffigen Rekultivierungsschichten annähernd richtig (auf +/- 15%) zu berechnen.
- Bei Rekultivierungsschichten aus dichter gelagerten Böden mit höheren bindigen Anteilen ist mit höheren Unsicherheitsspannen der HELP-Berechnungsergebnisse zu rechnen; die Abweichungen von den tatsächlichen Messwerten betragen hier 5 bis 50%.
- Es ist nicht zu empfehlen, HELP-Modellrechnungen als alleinige Bemessungs- oder Genehmigungsgrundlage für Wasserhaushaltsschichten nach DepV heranzuziehen.

Zusammenfassend zeigen die durchgeführten Untersuchungen und Auswertungen, dass die nutzbare Feldkapazität der Rekultivierungsschicht vor allem von der Bodenart abhängt, während die Luftkapazität maßgeblich von der Einbautechnik des Bodens bestimmt wird.

Die hohe Luftkapazität locker gelagerter Böden begünstigt das Tiefenwachstum von Pflanzenwurzeln (vgl. Deponie Weiden-West), und ermöglicht damit langfristig eine intensive Vegetation zur Maximierung der Evapotranspiration.

Die konventionell eingebauten Rekultivierungsschichten weisen eine geringe Luftkapazität und eine geringe Durchwurzelungsintensität des Unterbodens auf. Hier werden trotz der Schichtdicken von 1,5 m bzw. 2,0 m keine überdurchschnittlichen Evapotranspirationsleistungen erzielt.

Bei der Planung und Bemessung von Rekultivierungsschichten ist zu beachten, dass ein Zielkonflikt besteht zwischen der Minimierung der Durchsickerung (durch Maximierung von Durchwurzelung des Bodens und Evapotranspiration) und dem Schutz von darunter befindlichen austrocknungsempfindlichen Abdichtungskomponenten. Dies sollte in jedem Einzelfall entsprechend gewürdigt werden.

TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH
Grundbauinstitut

Bearbeiter:



Dr.-Ing. Bernd Müller
Baudirektor



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

Anlagenverzeichnis

Anlage 1 Laboruntersuchungen Büro m+w – Melchior + Wittpohl, Hamburg

Anlage 2 Laboruntersuchungen Büro ICP – Czurda & Partner, Karlsruhe