

Langzeitbetrachtungen zu ausgewählten Deponieoberflächenabdichtungen anhand realer Testfelddaten und modellgestützter Simulationsrechnungen

**Dipl.-Ing. Mario Müller^{1;4}; Dr. rer. nat. Johanna Lippmann-Pipke^{1;2};
Dipl.-Ing. René Baumert¹; Dipl.-Geol. Petra Schneider³;
Prof. Dr.-Ing. Jürgen I. Schoenherr¹**

¹ Hochschule Zittau/Görlitz; MVSR-Forschungslabor, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau

² GeoForschungsZentrum Potsdam, Telegrafenberg B320, 14473 Potsdam

³ C&E Consulting und Engineering GmbH, Jagdschänkenstr. 52, 09117 Chemnitz

⁴ ERGO Umweltinstitut GmbH, Lauensteiner Str. 42, 01277 Dresden

1 Einleitung

Der Regionale Abfallverband Oberlausitz-Niederschlesien (RAVON) ist Betreiber mehrerer verschiedener Deponien in seinem Verbandsgebiet. Im Sinne der Umsetzung des Multibarrierekonzeptes (Sicherheitskonzept) besteht seine Aufgabe u. a. darin, die Verbandsdeponien fachgerecht und gesetzeskonform zu betreiben und auch zu schließen.

Unter Beachtung der gültigen Gesetzeslage, landesspezifischer Regelungen sowie der jeweiligen Standortgegebenheiten ist der RAVON an der Nutzung von alternativen und kostengünstigen Oberflächensicherungsvarianten interessiert. Diese Möglichkeit ist durch die Technische Anleitung Siedlungsabfall (TASi) im Punkt 10.4.1.4, Buchstabe b (BERGS et al., 1997) zugelassen. Hierfür ist jedoch die Führung eines Gleichwertigkeitsnachweises des Alternativsystems gegenüber dem Regelsystem Voraussetzung. Zur Auswahl ökonomisch sinnvoller und technologisch machbarer Verfahren sowie langzeitbeständiger Materialien und Systeme wurden spezielle Versuchsreihen an einer „In situ Testfeldanlage“ auf der Deponie Bautzen/Nadelwitz realisiert. Durch die Nutzung einer solchen Testfeldanlage können sowohl alternative Dichtmaterialien als auch alternativ aufgebaute Systeme den realen, standorttypischen Klimabedingungen sowie den einzelfallspezifischen Deponierandbedingungen ausgesetzt und zielführend beurteilt werden. In der Kombination mit standortvalidierten Simulationsrechnungen soll zudem ein geeignetes Werkzeug zur Beurteilung und Bewertung der zeitbezogenen Funktionalität von Dichtelementen und/oder -systemen betrachtet werden. In Summe ist damit eine ökonomisch vertretbare und langzeitwirksame Oberflächensicherung von Deponien bestmöglichst charakterisierbar.

Diese Thematik ist Schwerpunkt einer jahrelangen Zusammenarbeit des RAVON mit der Hochschule Zittau/Görlitz sowie verschiedenen anderen Fachleuten aus den zuständigen Genehmigungsbehörden, ausgewählten Ingenieurbüros sowie anderen Forschungseinrichtungen.

2 Testfeldkonzeption und Datenerfassung

2.1 Testfeldkonzeption

Im Rahmen der Deponiestilllegungsbetrachtungen wird seit 1998/1999 auf der Deponie Bautzen/Nadelwitz eine Testfeldanlage betrieben. Ziel sind Wirksamkeitsuntersuchungen an unterschiedlichen Oberflächenabdichtungsmaterialien/-systemen unter dem Aspekt der Gleichwertigkeit zum Regelsystem nach TASI. Der Aufbau der Testfelder ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Bei einem Testfeld (Feld #7) sind die Anforderungen an das Regelsystem nach TASI, ohne Kunststoffdichtbahn (KDB), realisiert worden. Dieses Feld kann somit als Vergleichsbasis für alle anderen alternativen Abdichtvarianten (z. B. unterschiedliche Arten von Bentonitmatten, ... usw.) dienen. Dies ermöglicht, dass die Gleichwertigkeitsnachweisführung nicht ausschließlich nur auf theoretische und laborative Bereiche beschränkt bleibt und realitätsnahe Freilandbetrachtungen erweiternd und konkretisierend hinzugefügt werden können. Der im TASI-Feld #7 eingebrachte Ton der mineralischen Dichtschicht weist einen spez. Durchlässigkeitsbeiwert (k_f) von $1,6 \cdot 10^{-10}$ m/s auf und liegt somit über den Forderungen der TASI (MÜLLER, 2001; WERNER, 2003).

Der prinzipielle Aufbau der einzelnen Testfelder (von oben nach unten) umfasst folgende Grundelemente (MÜLLER, 2001):

- Erosionsschutzmatte
- Rekultivierungsschicht
- Drainschicht
- Dichtschicht
- Sickerwasserfassung

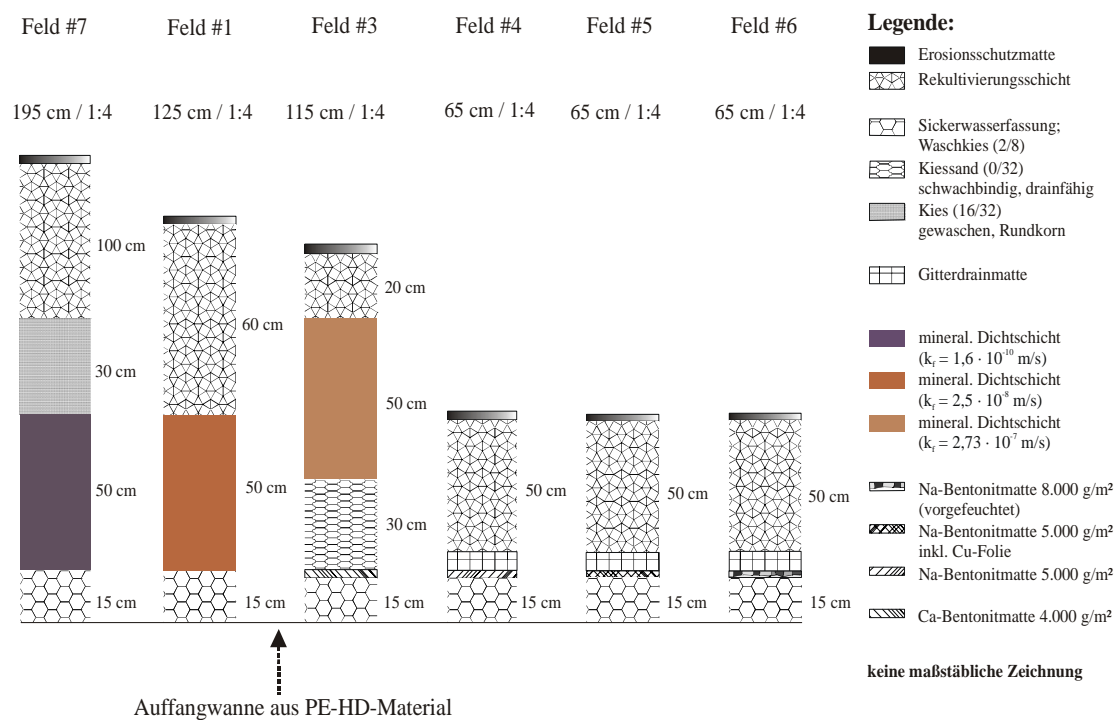


Abb. 1: Schematische Darstellung der Testfelder auf der Deponie Bautzen/Nadelwitz

Auf eine Gasdrainageschicht unter der Dichtschicht, wie nach TASI gefordert, wurde aufgrund des fehlenden Kontaktes zum Abfallkörper verzichtet. Die Testfelder unter-

scheiden sich somit lediglich in der unterschiedlichen Dimensionierung und Materialwahl bei der Rekultivierungs-, der Entwässerungs- und der Dichtschicht. Bei der folgenden Beschreibung soll demzufolge nur auf diese Schichten eingegangen werden.

Charakteristisch für die eingebauten Materialien in den Testfeldern sind:

Testfeld #1:

- Rekultivierungsschicht: nutzbare Feldkapazität $nF_k = 18,5\%$;
 k_f -Wert = $7,52 \cdot 10^{-8}$ m/s
- Drainschicht: keine
- Dichtschicht: 2-lagige, bindige mineralische Dichtschicht (mit 7% Tonmehl)

Testfeld #3:

- Rekultivierungsschicht: mit zusätzlicher Auflast auf der Dichtschicht durch schwach bindiges Material mit $nF_k = 12,12\%$
- Drainschicht: schwach bindiger, drainfähiger Kiessand 0/32
- Dichtschicht: Ca-Bentonitmatte, 4.000 g/m^2

Testfeld #4:

- Rekultivierungsschicht: $nF_k = 18,93\%$, k_f -Wert = $6,41 \cdot 10^{-8}$ m/s
- Drainschicht: Gitterdrainmatte
- Dichtschicht: Na-Bentonitmatte, 5.000 g/m^2

Testfeld #5:

- Rekultivierungsschicht: $nF_k = 19,83\%$, k_f -Wert = $6,41 \cdot 10^{-8}$ m/s
- Drainschicht: Gitterdrainmatte
- Dichtschicht: Na-Bentonitmatte, 5.000 g/m^2 , inkl. Cu-Wurzelschutzfolie

Testfeld #6:

- Rekultivierungsschicht: $nF_k = 13,06\%$, k_f -Wert = $6,32 \cdot 10^{-7}$ m/s
- Drainschicht: Gitterdrainmatte
- Dichtschicht: Na-Bentonitmatte, vorbefeuchtet, 8.000 g/m^2

Testfeld #7 (TASi-Feld):

- Rekultivierungsschicht: $nF_k = 13,45\%$, k_f -Wert = $5,37 \cdot 10^{-8}$ m/s
- Drainschicht: Kies 16/32, gewaschen, Rundkorn
- Dichtschicht: 2-lagige, bindige mineralische Dichtschicht

Die Testfelder sind in die Ostböschung des Altkörperbereiches der Hausmülldeponie Bautzen/Nadelwitz integriert. Jedes Testfeld nimmt eine Fläche von 60 m^2 ($15 \text{ m} \times 4 \text{ m}$) ein und weist eine Böschungsneigung, gemäß der realen Böschungssituation der Deponie, von 1:4 auf.

2.2 Beschreibung der Messmethodik

Im Untersuchungsbereich erfolgt eigene Erfassung der meteorologischen Daten sowie Abflussmessungen in den Testfeldern. Die Messungen werden teilweise manuell bzw. automatisch realisiert. Die manuelle Datenerfassung erfolgt dreimal wöchentlich, d. h. jeweils montags, mittwochs und freitags. Spezielle Aufgrabungsfelder mit äquivalenter Neigungslage, Materialien und Schichtfolgen (jedoch ohne Abgrenzung zum Deponiekörper) ermöglichen versuchsbegleitende direkte Untersuchungen an den einzelnen Systemeinheiten.

Die Klimadaten, wie Niederschlag, Luftfeuchte, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung, werden mit Hilfe einer oberhalb der Testfelder auf der Deponie

aufgestellten Klimastation (Typ: UNIKLIMA 7, Hersteller: TOSS GmbH, Potsdam) erfasst. Der Niederschlag wird dabei in 1 m ü. GOK bestimmt. Zudem sind noch zwei weitere Niederschlagsmessstationen zum Abgleich der Niederschlagsdaten vorhanden. Diese sind ebenerdig eingelassen und in direkter Testfeldnähe stationiert. Neben den eigenen meteorologischen Standortwerten werden ergänzend und vergleichend auch kommerzielle Wetterdaten über den Deutschen Wetterdienst („DWD-Standort 2033 - Görlitz“) abgefragt und in die Auswertung mit involviert. Somit kann die regionalspezifische Meteorologie als hinreichend erfasst gelten.

Bei der Abflussmessung in den Testfeldern wird der Abfluss unter der Dichtung sowie der Abfluss über der Dichtschicht jeweils separat erfasst. Die Abflüsse werden über Vollsickerrohre gewonnen und staufrei zur Messstation abgeführt. Über die jeweiligen Erfassungsbehälter (Volumen: ca. 600 l) wird das entsprechende Sickerwasser gesammelt und volumetrisch erfasst (MÜLLER et al., 2004). Ausschließlich am Testfeld 4 wird neben dem Sickerwasser über und unter der Dichtung auch der Oberflächenabfluss in einem separaten Messbehälter in gleicher Weise aufgefangen und erfasst. Dieser Wert ist auf alle anderen Felder übertragbar, da grundsätzlich die gleichen Bedingungen, wie Neigung, Bedeckung, sich entwickelnder Bewuchs, Oberflächenerosion, Fläche, ... usw. postuliert werden können.

Die zusätzlich zu den jeweiligen Testfeldern angelegten Aufgrabungsfelder bieten die Möglichkeit, versuchsbegleitende Bewertungen des Ist-Zustandes des jeweiligen Dichtsystems durchzuführen. In den Jahren 1999 und 2001 wurden derartige Aufgrabungen auf Veranlassung des RAVON durch Fachingenieure durchgeführt und dokumentiert (SÄNGER, 1999; SÄNGER, 2001).

3 Darstellung und Interpretation der Messergebnisse

3.1 Auswertungscharakteristik

Präzise Teilbewertungen einzelner Abdichtelemente sowie der Gesamtdichtsysteme stellen die Basis für fachlich sinnvolle und aussagekräftige Langzeitbetrachtungen zur Oberflächensicherung von Deponien dar. Die Implementierung der klimatologischen Standortcharakteristik in die systemspezifische Wirksamkeitsbetrachtung bildet hierzu die Grundvoraussetzung. Zur Ermittlung der jeweiligen Element- bzw. Systemeffektivität wird unter Berücksichtigung des Wirkungspfades Boden-Pflanze-Atmosphäre und der Standortcharakteristik eine Bilanzierung der Wasserhaushaltsgrößen (z. B. Niederschlag, Verdunstung, ... usw.) vorgenommen. Die Verwendung des „Hydrologischen Jahres“ als Bilanzierungsrahmen stellt, unter dem Aspekt eines ausgeglichenen Bodenwasserhaushalts, einen sinnvolleren Bilanzierungszeitraum im Vergleich zum Kalenderjahr dar (MÜLLER et al., 2004). Eine derartige Verfahrensweise wird in verschiedenen Literaturquellen empfohlen (GARTUNG, 1997; DYCK & PESCHKE, 1995).

Zielführend erweist sich auch die strikte Unterteilung in Winterhalbjahr (November bis April) und Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober). Diese Herangehensweise erlaubt die Berücksichtigung der in Form von Schnee und Eis gespeicherten Wasservolumina und der daraus resultierenden Beeinflussung des Bodenwasserhaushaltes (WWW.WISSENSCHAFT.DE, 2004).

3.2 Darstellung und Auswertung der Versuchsfelddaten

Um einen Überblick zum langzeitspezifischen Verhalten der einzelnen Testfelder zu erhalten, sind die bewertungsrelevanten Charakteristika in Tab. 1 zusammengefasst angegeben. Die Ergebnisse sind für den gesamten Versuchszeitraum (November 1999 bis März 2005) kumulativ dargestellt. Feldspezifisch wurden jeweils die Evapotranspirationleistung ($ET_a = N - Q_{\text{Obfl.}} - Q_{\text{Drain}} - Q_{\text{Dichtung}}$) errechnet und die Abflüsse (Oberflächenabfluss ($Q_{\text{Obfl.}}$), Drainageabflüsse (Q_{Drain}), Abflüsse unter der Dichtung (Q_{Dichtung})) messtechnisch erfasst. Die Niederschlagsmenge (N) wurde aus eigenen klimatologischen Messungen im Abgleich mit den DWD-Klimadaten ermittelt.

Tab. 1: Überblick über die Testfelderergebnisse im Untersuchungszeitraum

Zeitraum		01.11.1999 - 31.03.2005					
Testfeld		#1	#3	#4	#5	#6	#7
Niederschlag (N)	mm	3884,8					
Oberflächenabfluss ($Q_{\text{Obfl.}}$)	mm	140,4					
	% v. N	3,6					
Evapotranspiration (berechnet) (ET_a)	mm	2387,7	2512,6	2570,8	2402,5	2369,6	2350,3
	% v. N	61,5	64,7	66,2	61,8	61,0	60,5
Drainabfluss (Q_{Drain})	mm	108,7	204,9	321,4	1176,8	1066,9	1352,2
	% v. N	2,8	5,3	8,3	30,3	27,5	34,8
Abfluss unter der Dichtung (Q_{Dichtung})	mm	1248,0	1026,8	852,1	165,1	307,9	41,8
	% v. N	32,1	43,8	57,9	4,2	7,9	1,1
Wirkungsgrad des Gesamtsystems (η)	%	67,9	56,2	42,1	95,8	92,1	98,9

Den Vergleichsmaßstab zur Beurteilung der alternativen Dichtungssysteme bildet dabei das Regelsystem im Feld #7. Charakterisiert wird dieser Aufbau durch einen sehr hohen kum. Abfluss über der Dichtung (34,8%) sowie ein sehr geringer kum. Abfluss unter der Dichtung (1,1%). Mit einer Wirksamkeit von 98,9% über einen Versuchszeitraum von ca. 5 Jahren, stellt es das effektivste Dichtsystem innerhalb der getesteten Varianten dar. Die Wirksamkeit des Systems (Dichtwirkungsgrad η) wird dabei in der Differenz des Niederschlages (100%) zum prozentualen Durchlass unter der Dichtung vereinfacht bewertet. Für den Sachverhalt der Gleichwertigkeitsbetrachtung lässt sich ableiten, dass ein alternatives Abdichtsystem (unter Beachtung der Charakteristik des verwendeten Tons im Feld #7) vergleichsweise ähnliche Dichtwerte wie das TASI-Feld aufzeigen sollte.

Signifikant schlechtere Dichtwirkungen zeigen die Felder #1, #3 und #4 auf. Die Wirkungsgrade schwanken zwischen ca. 68% und 42%, bei einer mittleren Dichtleistung von ca. 55%. Die Ursache hierfür ist primär im konzeptionellen Aufbau der Felder zu sehen. Dabei kommen die vorteilhaft wirkenden Eigenschaften einer qualifizierten Rekultivierungsschicht (insbesondere deren Wasserhaushaltsfunktion), in ausreichender Dimensionierung und mit den systemoptimierenden, pedologischen Kenngrößen, nur unzureichend zum Tragen. Die geringen Mächtigkeiten der Rekultivierungsschicht (< 1 m) und das teilweise Fehlen einer Entwässerungsschicht (Reduzierung der lateralen Wasserabflüsse), bedingen die in Tab. 1 aufgezeigten signifikant hohen Durchflüsse. Des Weiteren tragen Austrocknungs-, Umwandlungs- und Bioturbationseinflüsse sowie Frosteinwirkungen mit Sicherheit zu erheblichen Wirksamkeitsverlusten bei. Auch chemische Einwirkungen mit dichtwirkungsvermindernden

Effekten sind zu beachten. Spezifisch an den Na-Bentonitmatten bedingten Umwandlungsprozesse (von Na-Bentonit zu Ca-Bentonit) eine Reduzierung der Dichtleistung. Eventuell auftretende Risse (z. B. durch Austrocknung, Wurzeinfluss, Frost-Tau-Wechsel) werden, unter anderem durch Wasserströmungsprozesse und den damit verbundenen Erosionswirkungen an den Rissufern, sukzessive vergrößert und tragen zur Dichtwirkungsverminderung bei.

Die geringeren Wasserdurchtritte (bessere Dichtwirkungen) in den Feldern #5 (4,2%) und #6 (7,9%) sind in den verwendeten Dichtschichtelementen (Feld #5: Bentonitmatte mit Cu-Folie als Wurzelschutz; Feld #6: modifizierte, feucht eingebaute Bentonitmatte, 8.000 g/m²) begründet. Gegenüber dem TASI-System (Feld #7) konnten, im Versuchszeitraum von 5 Jahren, bei Feld #5 ein nur um ca. 3% und bei Feld #6 ein nur um ca. 7% höherer Sickerwasserdurchtritt festgestellt werden.

Die Wirksamkeitsabweichungen resultieren unter anderem aus den sich zeitlich komplex überlagernden Einflüssen unterschiedlicher „Stressfaktoren“. Im Besonderen sind die Austrocknung und der Ionenaustausch zu nennen (MÜLLER et al., 2004). Explizit an den „Bentonitmatten-Feldern“ (Felder #4, #5 und #6) spielen des Weiteren die geringen Auflasten (resultierend aus den Schichthöhen von max. 50 cm) eine entscheidende Rolle. Unzureichende Auflastdrücke bedingen eine Funktionseinschränkung. Dies begründet sich auf die minder ausgeprägte Dichtwirkung des Bentonits beim Quellvorgang und den mangelnden Selbstheilungseffekten. Ähnliche Erkenntnisse konnten bei Überdeckungen von 45 cm, anhand von mit Bentonitmatten bestückten Testfeldern, auf der Deponie Hamburg-Georgswerder aufgezeigt werden (EGLOFFSTEIN & BURKHARDT, 2001). Die Bentonitmatte mit integrierter metallischer Folie in Feld #5 erreicht, trotz geringer Überdeckung, eine gute kumulative Dichtwirkung.

Um die einzelnen Teilabflüsse sowie die Verdunstungsleistung in Abhängigkeit vom gefallenem Niederschlag genauer bewerten und diskutieren zu können, ist das Betrachten des zeitlichen Verhaltens der einzelnen Abflussmengen notwendig. Beispielhaft wird dies für die Testfelder #4, #5 und #7 in den Abb. 2, 3 und 4 aufgezeigt.

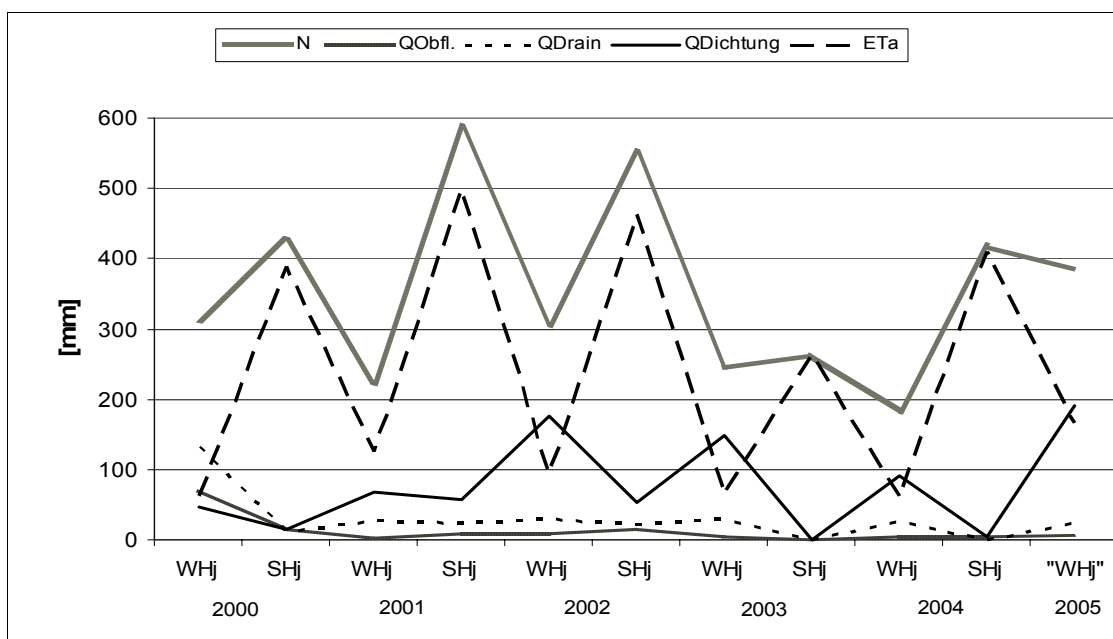


Abb. 2: Niederschlags- bzw. Abflussverteilung am Testfeld #4

In Abb. 2 wird die bekanntermaßen ausgewiesene Notwendigkeit der Anwendung des Bilanzierungszeitraumes „Hydrologisches Jahr“ und der Unterteilung in das Winter- (WHj) sowie Sommerhalbjahr (SHj) deutlich. Eine solche Darstellungsweise erlaubt eine Bewertung des Dichtverhaltens unter dem Aspekt der zeitlichen Variabilität der Niederschlagsereignisse bzw. Niederschlagsmengen.

Das Feld #4 (s. Abb. 2) zeigt ab dem Winterhalbjahr 2001 deutliche Durchflüsse unter der Dichtung. Mit rückläufiger Evapotranspirationsleistung in den Winterhalbjahren und dem verminderten Wasserspeichervermögen des Rekultivierungsbodens treten signifikant höhere Sickerwassermengen unterhalb des Dichtungselementes auf. Selbst in den Sommerhalbjahren sind, unter anderem durch die geringe Überdeckung von lediglich 50 cm sowie den eintretenden Perforationsereignissen (Austrocknung, Frost-Tau-Wechsel, Wurzeinfluss, ... usw.), Abflüsse unterhalb des Dichtelementes ausweisbar. Sehr deutlich wird dies im Nassjahr 2002 (Extremjahr). Im hydrologischen Sommerhalbjahr des Trockenjahres 2003 (Extremjahr), wird durch das Speichervermögen des Rekultivierungsbodens sowie die Verdunstungsleistung der Vegetation und des Bodens sämtlicher Niederschlag von der Dichtung ferngehalten.

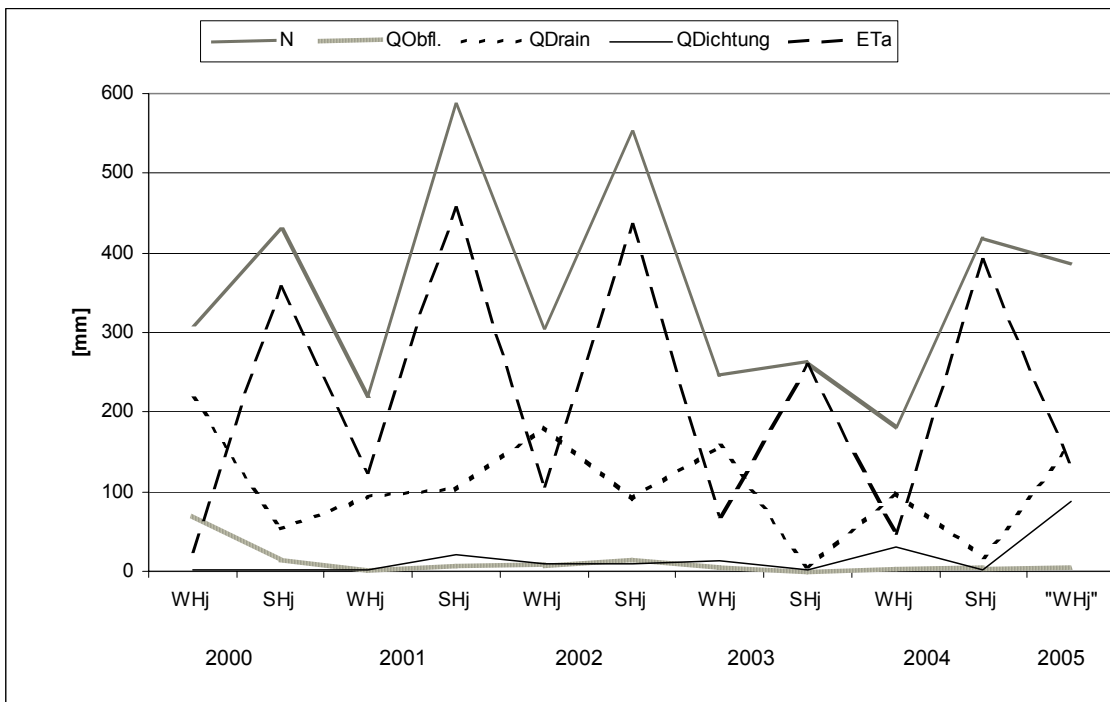


Abb. 3: Niederschlags- bzw. Abflussverteilung am Testfeld #5

Die ermittelte Abflussmenge (Q_{Dichtung}) am Feld #5 (s. Abb. 3) kann einen Wirksamkeitsverlust der verwendeten Bentonitmatte mit eingebrachter Wurzelschutzfolie nachweisen. Ursachen dafür sind in Analogie zum Feld #4 zu sehen. Eine tendenzielle Entwicklung der Dichtleistung des eingebrachten Dichtelementes ist zum aktuellen Zeitpunkt anhand der vorhandenen Messreihen noch nicht sicher abschätzbar.

Das Feld #7, mit einem TASI-konformen Aufbau, zeigt über den kompletten Versuchszeitraum nur sehr geringe Schwankungen im Dichtverhalten (s. Abb. 4). Es erreicht, unbeeinflusst von den hydrologischen Extremjahren 2002 (Nassjahr) und 2003 (Trockenjahr), durchweg sehr gute Dichtleistungen. Dieser Sachverhalt ist neben der 1 m mächtigen Rekultivierungsschicht und der damit verbundenen Wasserhaushalts-

funktion unter anderem auf die geringe Durchlässigkeit (k_f -Wert) des eingebauten Tons in der mineralischen Dichtschicht zurückzuführen.

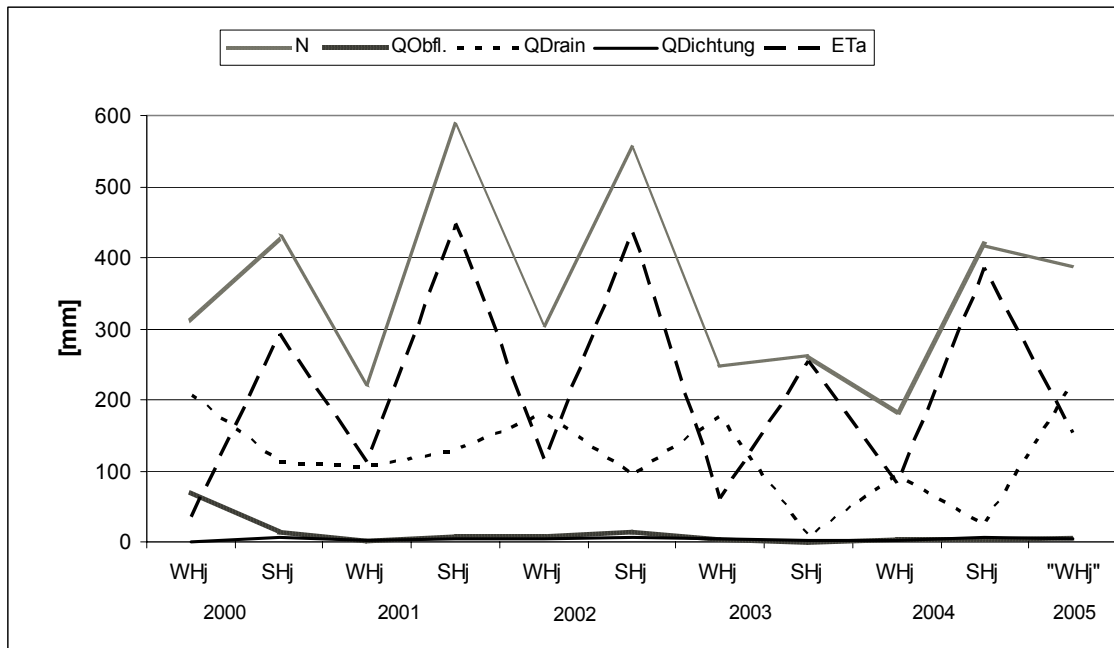


Abb. 4: Niederschlags- und Abflussverteilung am Testfeld #7 (TASi-Referenzfeld)

Zudem wird im Vergleich der Abb. 4 zu den Abb. 2 und 3 auch die bessere Drainleistung der 30 cm mächtigen Kiesdrainageschicht (Feld #7) gegenüber der in Feld #4 und #5 eingebauten Drainmatte deutlich. Eine mächtigere Rekultivierungsschicht bedingt unter anderem auch eine stärkere Vergleichmäßigung der infiltrierenden Niederschlagsmengen und damit der Belastungen für die Drainschicht.

Im Ergebnis der Testfelduntersuchungen können für das Vergleichsfeld (TASi-Regelsystem) und der anderen betrachteten Felder mit alternativen Dichtelementen und/oder -systemen konkrete realitätsnahe Aussagen zu deren zeitlichen Verhalten im 5-jährigen Versuchszeitraum, inkl. der Verhaltensweisen auf bestimmte Stressfaktoren, zur Umsetzung des Gleichwertigkeitsprinzips getroffen werden. Zudem sind aber nur unsichere Prognosen zum Langzeitverhalten möglich. Sichere Abschätzungen zum mittel- und langfristigen Verhalten von Oberflächendichtsystemen erscheinen aus heutiger Sicht nur über testfeldverifizierte Modellbetrachtungen möglich.

4 Wasserhaushaltliche Modellierung der Testfeldergebnisse

Die Wasserhaushaltsmodellierung, d. h. die prognostische wasserhaushaltliche Bilanzierung mittels numerischer Modelle, sollte der empfohlene Bestandteil der Planung von Deponieoberflächenabdichtungssystemen sein. Im Rahmen des Planungsverfahrens zum Nachweis einer langzeitbeständigen Gleichwertigkeit können somit das TASi-Abdichtungssystem (BERGS et al., 1997) und im Vergleich dazu auch andere standortbezogene alternative Abdichtsysteme modelliert werden. Somit wird für jedes alternative Abdichtungssystem die Wirksamkeit quantifizierbar und die Berechnung von diversen Prognosen möglich. Mit Hilfe der wasserhaushaltlichen Optimierung sowie durch den Vergleich der Simulationsergebnisse des alternativen und des TASi-Abdichtungssystems ergibt sich in der Planung die für einen speziellen Standort zielführende Abdichtvariante.

Im Rahmen eigener Untersuchungen in einem Forschungsprojekt wurde der Wasserhaushalt von Testfeldern auf der Deponie Bautzen/Nadelwitz simuliert. Die Ergebnisse von zwei ausgewählten Feldern werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert.

4.1 Grundlagen einer Wasserhaushaltsmodellierung

Abdichtsysteme bei Deponien und Altlasten sind künstlich aufgetragene Erdstoffhorizonte, die sich langfristig zu naturnahen Bodenprofilen entwickeln werden. Dies geht mit Veränderungen der bodenphysikalischen und geochemischen Zusammensetzung der Böden, welche entsprechend bei der Modellierung berücksichtigt werden müssen, einher (HÜBNER et al., 2005). Auch die technischen Einbauten wie Kunststoffdichtungsbahnen und Bentonitmatten unterliegen einem derartigen Verschleiß bzw. Alterungsprozess. Weit in die Zukunft reichende Prognoserechnungen sollten diese Alterungserscheinungen im Optimalfall ebenso berücksichtigen, wie z. B. eine sich sukzessiv verändernde Vegetation: Gras → Gebüsch → Wald, ggf. natürliche Sukzession (SCHNEIDER & SCHAFFRATH, 2004).

In den Untersuchungen zu den Modellbetrachtungen werden die Messdaten der Testfelder mit Simulationsergebnissen des Modells HELP 3.80D (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) verglichen. Die wasserhaushaltliche Simulation der Testfelder auf der Deponie Bautzen/Nadelwitz mittels HELP wird dabei entsprechend den GDA-Empfehlungen durchgeführt (WWW.GDAONLINE.DE, 2004). Das Simulationsmodell HELP ist ausführlich in der Literatur beschrieben (BEATTY, 1996; BERGER, 1998; BERGER & DUNGER, 2000).

Eine detaillierte Beschreibung der Simulationsergebnisse, eine ausführliche Dokumentation der einzelnen Simulationsläufe sowie ein Vergleich der mit HELP bzw. mit BOWAHALD gewonnenen Simulationsergebnisse findet sich im Zwischen- sowie Abschlussbericht des Forschungsprojektes (LIPPMANN-PIPKER & SCHNEIDER, 2005; SCHOENHERR et al., 2005).

4.2 Vorgehensweise bei der Modellierung

Im Zuge der Modellberechnungen der Abflüsse der Testfelder werden drei Zeitschnitte unterschieden, die jeweils gesondert simuliert werden:

- Beobachtungszeitraum (1999-2004, inklusive der Einbauphase, d. h. dem ersten Jahr der Beobachtungsphase)
- Prognose (2005-2009)
- Zukunft (2010-2100)

Das Abflussgeschehen in der Beobachtungsphase kann ausgehend von der Nullversion sowie mit verschiedenen anderen Modellläufen simuliert werden. Zunächst wird jedes Testfeld in der Nullversion modelliert, wobei die bodenphysikalischen Eingangsdaten prinzipiell den gemessenen Werten entsprechen und über die Dauer des Beobachtungszeitraumes als Konstanten zu behandeln sind. Die verwendete Klimadatenbasis der eigenen Klimastation Bautzen/Nadelwitz wurde zur Vervollständigung von Lücken mit Daten der DWD-Station Görlitz ergänzt. Im Allgemeinen reproduziert die Nullversion das gemessene Abflussgeschehen damit noch nicht zufriedenstellend. Daher werden in den Modellläufen die Bodenparameter der einzelnen Schichten so lange in sinnvollen Bandbreiten variiert, bis sich eine „best fit“-Variante herauskristallisiert hat. Diese „best fit“-Variante kann mit Hilfe eines Güte-Kriteriums

(„gewichtete prozentuale Abweichung vom mittleren Tageswert [%]“) objektiv identifiziert werden.

Oftmals lässt sich die Variation der Bodenparameter allein aus der Mess- bzw. Schätzungenauigkeit der Boden-Eingabeparameter begründen. In Einzelfällen ist festzustellen, dass der Einfluss der k_f -Werte der Dichtschichten deutlich unterschätzt wird. Außerdem hat es sich bei den Testfeldern #1, #5 und #6 als sinnvoll erwiesen die Bodenparameter während des Beobachtungszeitraumes, d. h. im Zeitverlauf von fünf Jahren nach dem Bau der Testfelder, zu variieren, um die gemessenen Abflusswerte bestmöglichst abzubilden und so eine zufriedenstellende Übereinstimmung zu erzeugen. Die Ursachen der Änderung der Bodenparameter in so kurzen Zeitspannen sind die vorgenannten bodenphysikalischen Einflüsse.

Bei den Prognoserechnungen wird der Bodenparametersatz der zuvor identifizierten „best fit“-Variante für die Berechnung der Abflüsse für weitere 5 Jahre verwendet (2005-2009). In den Fällen, in denen die „best fit“-Variante ein Simulationslauf ist, bei dem die Bodenkennwerte innerhalb des Beobachtungszeitraumes zeitlich variieren, soll für die Prognoserechnung der gemessene Bodenparametersatz des letzten Jahres (2004) zu Grunde gelegt werden. Für die Prognoserechnungen werden die Klimaeingabedaten der Jahre 1999-2004 verwendet, der Blattflächenindex auf 4 erhöht („sehr guter Grasbewuchs“) und für die Durchwurzelungstiefe die maximale Tiefe angesetzt. Die Prognoserechnung ist besonders interessant, wenn im Beobachtungszeitraum Erhöhungen der k_f -Werte der Dichtschicht festgestellt wurden (z. B. bei den Feldern #5 und #6). Die mittlere Wirksamkeit der Oberflächenabdichtung ist dann im Prognosezeitraum deutlich geringer als die über den Beobachtungszeitraum gemittelte (anfängliche) Wirksamkeit.

Bei den Zukunftsrechnungen (2010-2100) ist ein ähnliches Verfahren wie bei den Prognoserechnungen anzuwenden. Hier wird wiederum der letzte, im Beobachtungszeitraum validierte Bodenparametersatz verwendet. Ebenfalls finden die Klimadaten aus dem Beobachtungszeitraum Verwendung. Gegenüber der Prognoserechnung wird der Blattflächenindex auf 7 (LAI = 7 für Wald) sowie die Gesamtdauer der Modellrechnung auf 90 Jahre (2010-2100) gesetzt. Dieser Ansatz ist prinzipiell diskussionswürdig. Im Besonderen, da in Langzeituntersuchungen gewonnene bodenphysikalische Messwerte und längerfristige Klimadatenbasen einer standortnahen DWD-Wetterstation verwendet werden sollten. Diese stehen für den Standort Bautzen/Nadelwitz nicht zur Verfügung, was aber den generellen Zustand der Datenbasis auch an anderen Deponiestandorten widerspiegelt.

Die Übereinstimmung zwischen den modellierten kumulativen Abflüssen Oberflächenabfluss ($Q_{\text{Oberfl.}}$) → Runoff, Drainabfluss (Q_{Drain}) → Drain und Abfluss unter der Dichtung (Q_{Dichtung}) → Basisflow) und den gemessenen kumulativen Abflüssen des jeweiligen Testfeldes können wie folgt quantifiziert werden:

$$\Delta = \sum_{j=1}^3 a_j \cdot \frac{\text{mittlere tägliche Abweichung des Modellergebnisses vom Meßwert}(j)}{\text{mittlere tägliche Abflussmenge des Meßwertes}(j)}$$

Hierbei stellt Delta (Δ) die „gewichtete prozentuale Abweichung vom mittleren Tageswert [%]“ dar. Delta ist also in gewisser Weise ein Güte-Kriterium eines Simulationslaufes und muss folglich minimiert werden. Der Index j steht für Runoff

(wenn $j = 1$), Drain (wenn $j = 2$) und Basisflow (wenn $j = 3$). Der Parameter a ist ein Wichtungsfaktor mit $a_1 = 2/3$ sowie $a_2 \text{ und } a_3 = 1/6$ (mit $a_1 + a_2 + a_3 = 1$). Ist z. B. die mittlere Abweichung des Simulationsrechenergebnisses vom Messwert so groß wie die gemessene mittlere gesamte Abflussmenge, dann beträgt die prozentuale Abweichung 100%.

Die Wichtung ist notwendig, weil es Ziel der Wasserhaushaltsschicht ist, eine Reduzierung der Sickerwasserrate durch die Dichtschicht (Basisflow) zu bewirken. Die Festlegung des Betrages und der Relation der Wichtungsfaktoren a_1 , a_2 und a_3 kann damit begründet werden, dass der Basisflow der wichtigste wasserhaushaltliche Bilanzterm ist, aber Runoff und Drain ebenfalls, wenn auch mit geringerer Wichtung, zu berücksichtigen sind.

4.3 Ergebnisse ausgewählter Simulationsrechnungen

Die hier vorgestellte Auswahl an Modellrechnungen bezieht sich auf die HELP-Simulation des Testfeldes #5 und des Referenzfeldes #7 (TASi-Regelaufbau).

4.3.1 Beispielhafte Ergebnisse der Simulationsrechnungen am Testfeld #5

Die Abb. 5 zeigt für das Feld #5 die Modellierungsergebnisse der Beobachtungsphase mit Prognose- und Zukunftsrechnungen im Vergleich mit den Messwerten. Durch Variation der Bodenkennwerte kann für die Messwerte der Beobachtungsphase, unter Berücksichtigung des Gütekriteriums ein Bodenparametersatz ermittelt werden, der die gemessenen Werte deutlich besser widerspiegelt als in der Nullvariante (vgl. Abb. 6). Insgesamt wurde die mittlere gewichtete tägliche prozentuale Abweichung der Modellsimulationsergebnisse der Nullvariante zu den Messwerten mit 88,6% berechnet.

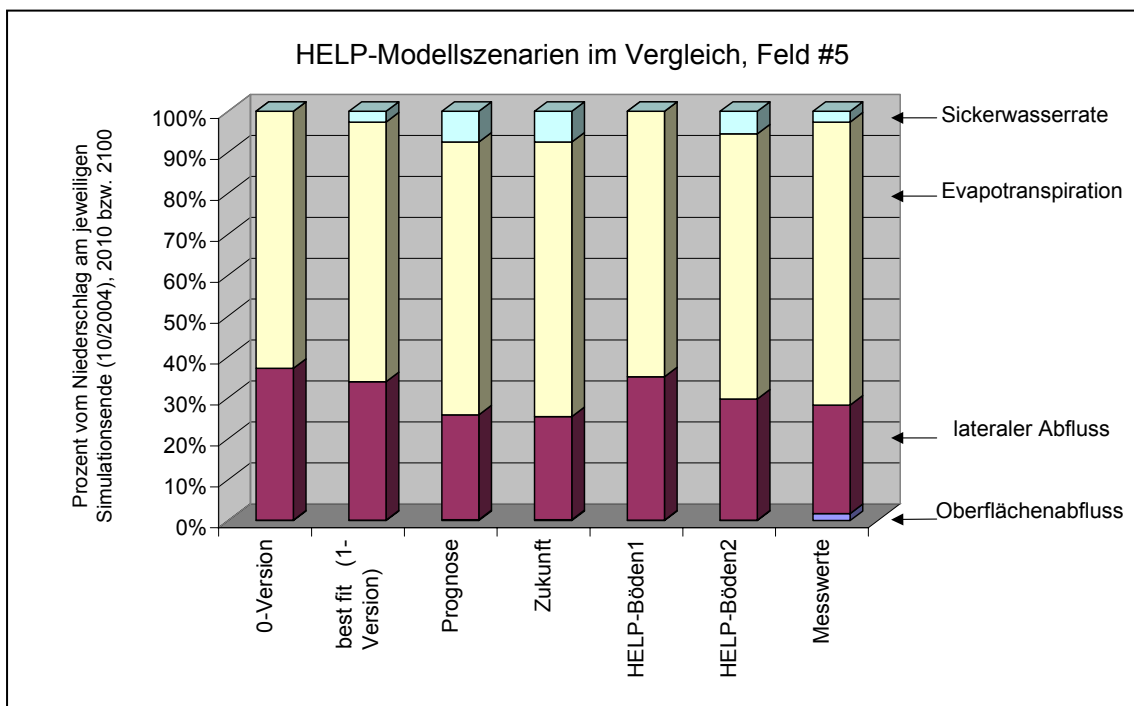


Abb. 5: Modellierungsergebnisse der Beobachtungsphase, der Prognose- und Zukunftsrechnungen im Vergleich mit den Messwerten von Feld #5

Durch Variationen der Bodenkennwerte konnte ein Bodenparametersatz gefunden werden, der die gemessenen Werte deutlich besser widerspiegelt, als dies in der Nullvariante der Fall ist. Insbesondere muss der k_f -Wert der Dichtschicht, die in diesem Testfeld aus einer Geomembran (Cu-Folie) und einer Bentonitmatten besteht, von $4,3 \cdot 10^{-11}$ m/s (Herstellerangaben) auf $1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s erhöht werden. Im diesem neuen Modellsimulationslauf verbessert sich die mittlere gewichtete tägliche prozentuale Abweichung der Modellsimulationsergebnisse der Messwerte auf 41,1%.

Abb. 6 zeigt die iterative Annäherung der modellierten Daten an die Messwerte. Der Basisflow am Testfeld #5 hat gemäß den Feld-Messwerten über die Jahre kontinuierlich zugenommen, wenn auch auf einem sehr niedrigen Niveau.

In einem Modelllauf mit zeitlich variierenden Bodenkennwerten ist der k_f -Wert der Dichtschicht schrittweise von $5,0 \cdot 10^{-9}$ m/s auf $8,0 \cdot 10^{-8}$ m/s erhöht und alle anderen Bodenparameter über den Beobachtungszeitraum konstant. Die mittlere gewichtete tägliche prozentuale Abweichung der Modellierungsergebnisse von den Messwerten beläuft sich somit auf 26,8%. Das Modellsimulationsergebnis zeigt, dass sich mit diesen variierenden Kennwerten die reale Situation besser abbilden lässt, als mit nicht-zeitlich variierenden Bodenkennwerten. Die größte Abweichung von Simulations- und Messergebnissen ist beim lateralen Abfluss oberhalb der Dichtung zu beobachten.

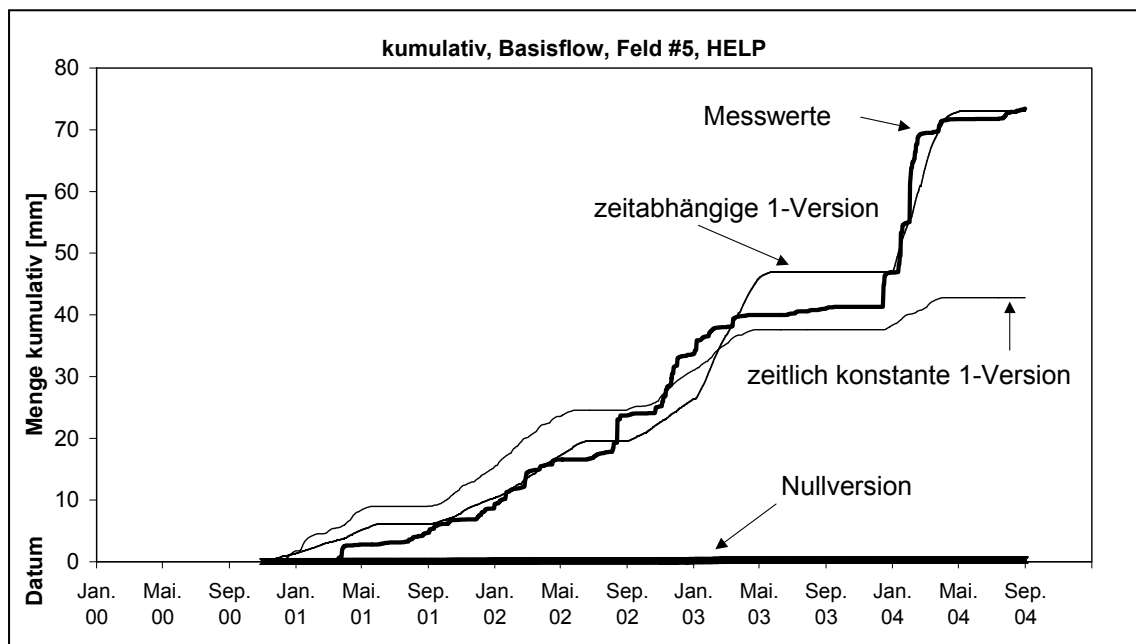


Abb. 6: Messwerte und Simulation der Beobachtungsphase am Feld #5

Mit den Bodenkennwerten des letzten Jahres, d. h. des „best fit“-Modelllaufes, werden die Prognoserechnungen (s. Abb. 7) durchgeführt. Die Erhöhung des Blattflächenindex auf 4 verursacht eine Erhöhung der realen Verdunstung auf 66,6% (2.834 mm absolut bzw. 472 mm/a) des Gesamtniederschlags des Vergleichszeitraumes (4.255 mm absolut bzw. 709 mm/a). Die Erhöhung der Verdunstung geht erwartungsgemäß mit einer Reduzierung des lateralen Abflusses (Drain) einher. Sie nimmt von 33,8% auf 25,6% ab (182 mm/a). Die simulierte mittlere Tiefenversickerung (Basisflow) in den modellierten 5 Jahren nach dem Beobachtungszeitraum 2005-2009 nimmt von ursprünglichen 2,6% (18 mm/a) auf 7,5% (53 mm/a) zu. Hier wirkte sich die Nutzung des zeitlich variierenden (d. h. zunehmenden) k_f -Wertes der Dichtschicht unmittelbar aus. Dies hat dementsprechend eine größere mittlere Tie-

fenversickerung (Basisflow) im Prognosezeitraum als im Beobachtungszeitraum zur Folge.

Die Zukunftsrechnung ist ebenfalls mit den Bodenkennwerten des letzten Jahres des Modellaufes mit zeitlich variablen Kennwerten durchgeführt worden. Die Erhöhung des Blattflächenindexes auf 7 (Wald) bewirkt eine weitere geringfügige Erhöhung der Verdunstung auf 67,1% (2.855 mm absolut bzw. 476 mm/a) des Gesamtniederschlags (4.255 mm absolut bzw. 709 mm/a) zu Ungunsten des lateralen Abflusses oberhalb der Dichtschicht (Drain, -0,4%, absolut auf 178 mm/a).

Ein wesentliches Ergebnis der (Prognose- und) Zukunftsrechnung ist somit, dass trotz deutlicher Erhöhung des Blattflächenindexes (von gutem über sehr guten Grasbewuchs hin zum Wald) die Wasserhaushaltsschicht des Testfeldes #5 nicht in der Lage ist, die Folge des sich mit der Zeit geringfügig erhöhenden k_f -Wertes der Bentonitmatte (Dichtschicht) zu kompensieren. Das heißt, dass das Verdunstungspotenzial einer geeigneten Wasserhaushaltsschicht, wegen der im Feld #5 vorliegenden zu geringen Mächtigkeit, nicht ausgenutzt werden kann.

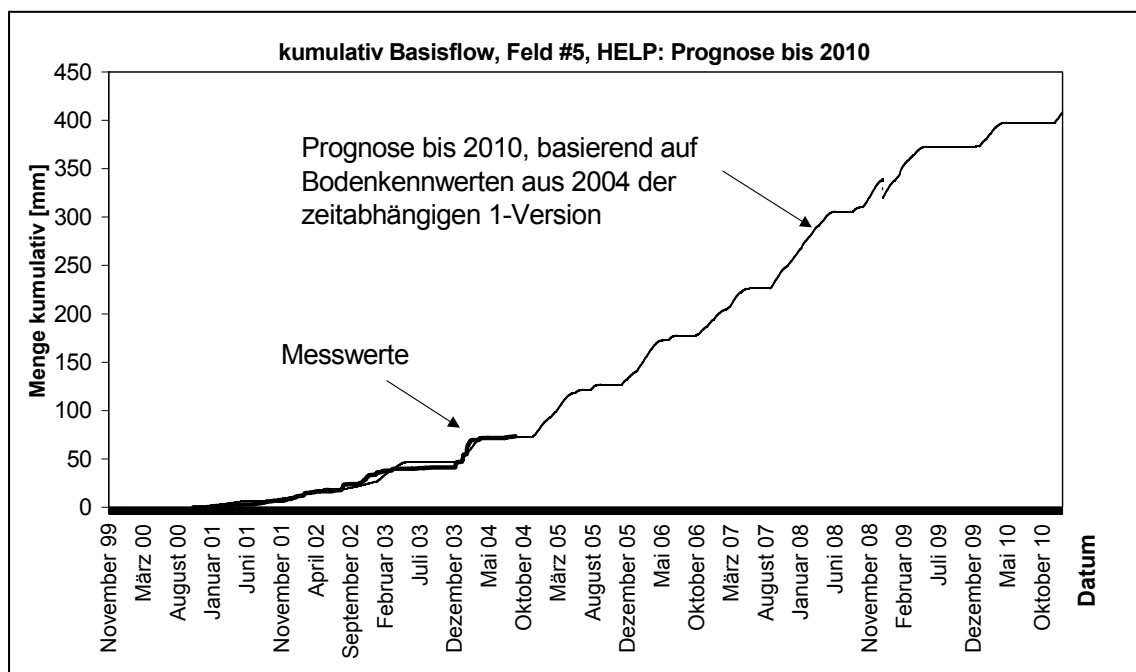


Abb. 7: Prognoserechnung am Feld #5

Mit den Bodenkennwerten des letzten Jahres, d. h. des „best fit“-Modellaufes, werden die Prognoserechnungen (s. Abb. 7) durchgeführt. Die Erhöhung des Blattflächenindexes auf 4 verursacht folglich eine Erhöhung der realen Verdunstung auf 66,6% (2.834 mm absolut bzw. 472 mm/a) des Gesamtniederschlags des Vergleichszeitraumes (4.255 mm absolut bzw. 709 mm/a). Die Erhöhung der Verdunstung geht erwartungsgemäß mit einer Reduzierung des lateralen Abflusses (Drain) einher. Diese reduziert sich von 33,8% auf 25,6% (182 mm/a). Die simulierte mittlere Tiefenversickerung (Basisflow) in den modellierten 5 Jahren nach dem Beobachtungszeitraum 2005-2009 dagegen nimmt von ursprünglichen 2,6% (18 mm/a) auf 7,5% (53 mm/a) zu. Hier wirkt sich die Nutzung des zeitlich variierenden, d. h. zunehmenden k_f -Wertes der Dichtschicht unmittelbar aus. Dies hat dementsprechend eine größere mittlere Tiefenversickerung (Basisflow) im Prognosezeitraum im Vergleich zum Beobachtungszeitraum zur Folge.

Die Zukunftsrechnung wird ebenfalls mit den Bodenkennwerten des letzten Jahres des Modelllaufes mit zeitlich variablen Kennwerten durchgeführt. Die Erhöhung des Blattflächenindexes auf 7 (Wald) bewirkt dabei eine weitere geringfügige Erhöhung der Verdunstung auf 67,1% (2.855 mm absolut bzw. 476 mm/a) des Gesamtniederschlags (4.255 mm absolut bzw. 709 mm/a) zu Ungunsten des lateralen Abflusses oberhalb der Dichtschicht (Drain, -0,4%, absolut auf 178 mm/a).

4.3.2 Ergebnisse der Simulationsrechnungen am TASI-Referenzfeld #7

Abb. 8 zeigt für das Feld #7 die Modellierungsergebnisse der Beobachtungsphase mit Prognose- und Zukunftsrechnungen im Vergleich mit den Messwerten.

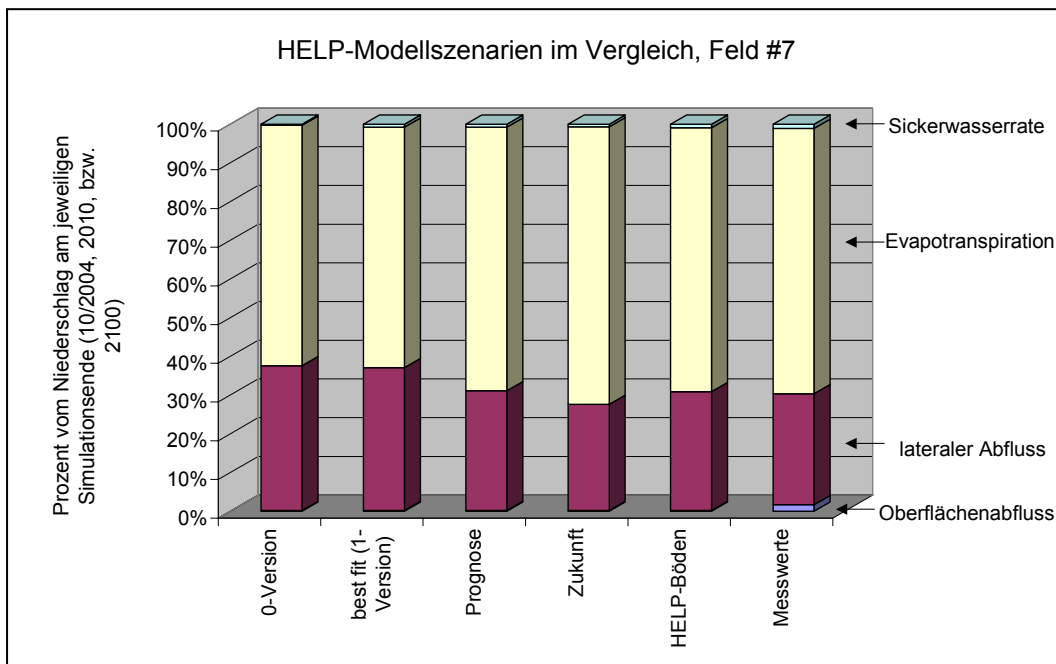


Abb. 8: Modellierungsergebnisse der Beobachtungsphase, der Prognose- und Zukunftsrechnungen im Vergleich mit den Messwerten von Feld #7

Wie aus Abb. 8 ersichtlich, ist in der Zukunftsphase sogar eine Reduzierung des zur erwartenden Basisflows möglich. Ursache hierfür sollte die zunehmende Verdunstungswirkung der Vegetation sein. Den Berechnungen liegt jedoch zu Grunde, dass das Dichtelement nach wie vor wirksam bleibt. Für den Prognosezeitraum bis 2010 ist dies auch wahrscheinlich. Die Wahrscheinlichkeit dieser Annahme in der Zukunftsphase bis 2100 kann nicht bewertet werden, da derartig langzeitliche Feld-Untersuchungen zur Wirksamkeit der Dichtelemente/-systeme nicht vorliegen.

Abb. 9 zeigt die iterative Annäherung der modellierten Daten an die Messwerte am Feld #7. Mit der Nullversion kann keine Annäherung an die gemessene Kurve erreicht werden. Die mittlere gewichtete tägliche prozentuale Abweichung der Modellsimulationsergebnisse dieses Modellierungslaufes zu den Messwerten kann mit 66,6% berechnet werden. Der simulierte Basisflow liegt für alle Varianten zwischen 0,3 und 1,4% des Niederschlags bei einem Messwert von 1,1%.

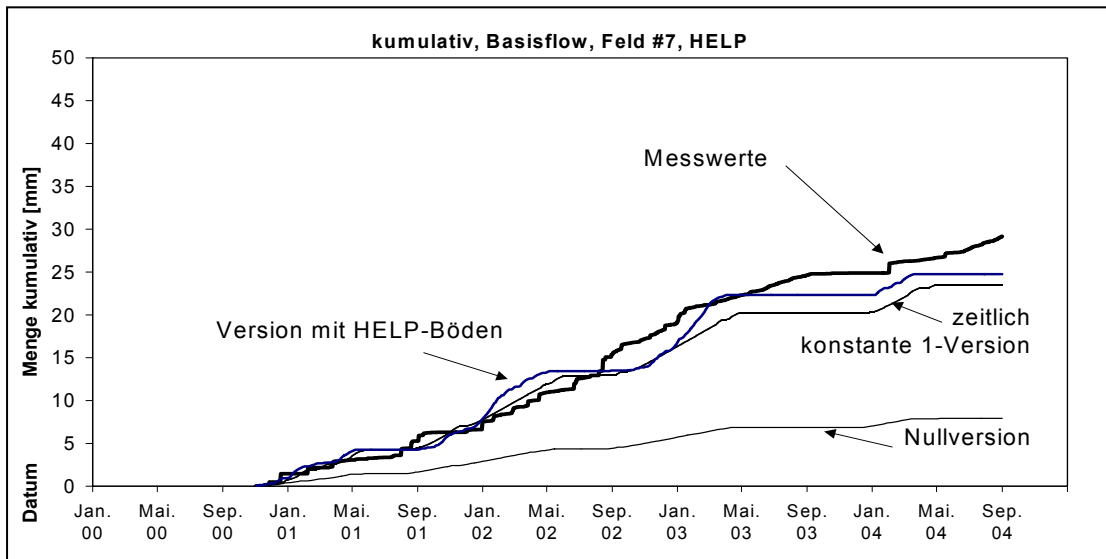


Abb. 9: Messwerte und Simulation der Beobachtungsphase am Feld #7 (TASi-Referenzfeld)

Im „best fit“-Modelllauf ist die Versickerung mit 0,8% des Niederschlages berechenbar. Die mittlere gewichtete tägliche prozentuale Abweichung der Modellierungsergebnisse von den Messwerten beläuft sich auf sehr gute 29,9%. Es ist festzustellen, dass die Sensitivität der modelltechnischen Variationen der Bodenkennwerte der Nullvariante im Vergleich zur Messungengenauigkeit der hydraulisch wirksamen Bodenkennwerte wesentlich geringer ist. Bei den Berechnungen mit zeitlich variierenden Bodenkennwerten ist der k_f -Wert der Dichtschicht schrittweise von $4,0 \cdot 10^{-10}$ m/s auf $7,0 \cdot 10^{-10}$ m/s erhöht worden. Das Berechnungsergebnis zeigt erwartungsgemäß, dass sich mit den variierenden Kennwerten die gemessene Situation besser abbilden lässt. Auch bei der Modellierung des Feldes #7 kann die größte Abweichung zwischen den Simulations- und Messergebnissen beim lateralen Abfluss oberhalb der Dichtung (Drain) beobachtet werden. Der modellierte laterale Abfluss von 36,9% des Niederschlages liegt etwa 8,2% über dem gemessenen lateralen Abfluss von 28,7%. Es gilt zu beachten, dass bei der Simulation die überschüssige Wassermenge der Verdunstung zugeschlagen wird.

Mit den Bodenkennwerten des letzten Jahres werden vereinbarungsgemäß auch hier die Prognoserechnung (bis 2010) durchgeführt. Die Erhöhung des Blattflächenindex auf 4 verursacht dabei keine bedeutende Veränderung der Wasserbilanz im Vergleich zur Beobachtungsphase. Entsprechend den Berechnungsergebnissen kann man auch im Prognosezeitraum bis 2010 mit der Stabilität des Dichtelementes rechnen. Es ist keine Zunahme der Versickerung zu erwarten. Hieran zeigt sich die dominierende Wirkung des Dichtelementes auch für den Prognosezeitraum.

Die Zukunftsrechnung bis 2100 ist ebenfalls mit den Bodenkennwerten des letzten Jahres des Modelllaufes mit zeitlich variablen Kennwerten durchgeführt worden. Die Erhöhung des Blattflächenindex auf 7 (Wald) verursacht dabei eine weitere geringfügige Erhöhung der Verdunstung auf 71,7% des Gesamtniederschlags - zu Ungunsten des lateralen Abflusses oberhalb der Dichtschicht (Drain). Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse wäre langfristig noch mit einer weiteren Abnahme der Sickerwasserrate (Basisflow) auf Grund der Zunahme der Verdunstung durch eine Verdichtung des Bestandes zu erwarten. Diese Zukunftsprognose ist allerdings nur zu-

treffend, wenn sich die Durchlässigkeit des Dichtelementes nicht signifikant verschlechtert.

4.3.3 Nutzung des HELP-Bodenparametersatzes

Für ausgewählte Testfelder ist anzunehmen, dass die realen, d. h. lokal (z. B. in Bautzen/Nadelwitz) erhobenen Boden-, Vegetations- und Klimadaten auch vollständig mit Bodenkennwerten aus der HELP-eigenen Datenbank (z. B. Bodenkennwerte, basierend auf der Bodenkundlichen Kartieranleitung) mit hinreichender Genauigkeit simuliert werden können. In speziellen Modellierungsläufen soll diese Hypothese für Dichtungssysteme mit einer Bentonitmatte, inklusive Geomembran, und mit natürlichen Bodensubstraten überprüft werden.

In einer Modellrechnung werden für die Bentonitmatte mit Geomembran (Feld #5) zunächst nur die vom Hersteller angegebenen Kennwerte angesetzt (quasi als Nullvergleichsversion). Im Weiteren wird der k_f -Wert der Dichtschicht derart erhöht, dass die simulierte Tiefenversickerung (Basisflow) in etwa der beobachteten Versickerung durch die Dichtschicht entspricht. Beide Modellrechnungen erfolgen ohne zeitliche Variation der Bodenparameter und werden mit den selben Blattflächenindizes bzw. Durchwurzelungstiefen durchgeführt. Im Ergebnis dieser Betrachtungen hat sich gezeigt, dass die erste Simulationsrechnung (k_f -Wert nach Angabe des Herstellers) ähnliche Ergebnisse liefern kann wie die unter 4.3.1 diskutierte Nullversion. Es ergibt sich aus den Modellberechnungen eine Sickertrate (Basisflow) von 0 mm/a (gemessen: 18 mm/a bzw. 2,6% des Jahresniederschlages). Ein Anheben des k_f -Wertes der Dichtschicht um mehr als zwei Größenordnungen, d. h. auf $8 \cdot 10^{-8}$ m/s, bewirkt eine simulierte Sickerwasserrate von 5,5% des Niederschlages, der vergleichsweise etwas höher als der tatsächliche Messwert liegt.

Anders verhält es sich bei der Simulation des Abflussgeschehens an den Testfeldern #1 und #7 (TASi-Referenzfeld) unter Nutzung des HELP-Bodenparametersatzes. Im Unterschied zu Testfeld #5 sind beim Bau dieser Felder natürliche Böden bzw. Bodensubstrate verwendet worden. Es können sehr gute Übereinstimmungen der Modellierungsergebnisse mit den gemessenen Daten festgestellt werden. Die Abweichungen sind jeweils deutlich kleiner als die der Nullversionen, sowie auch von einer Reihe von simulierten weiteren Versionen. Jedoch wird auch bei Feld #7 die Tiefenversickerung (Basisflow), wenn auch nur geringfügig, unterschätzt.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Zur Bewertung von Gleichwertigkeiten bei Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten sind aus heutiger Sicht Testfeldbetrachtungen aus Langzeituntersuchungen und der Vergleich mit einem nach TASi erstellten Regelabdichtsystem unbedingt notwendig.

Das nach einem 5-jährigen Versuchszeitraum kumulativ zu bewertende, nach TASi aufgebaute Oberflächenabdichtsystem, in der Versuchsanlage auf der Deponie Bautzen/Nadelwitz, weist eine sehr geringe Durchlässigkeit auf. Es können Dichtwirkungen von $\geq 95\%$ konstatiert werden. Der kumulative Abfluss unter der Dichtung beträgt nur etwa 1%.

Bei anderen alternativen Dichtsystemen, wie z. B. in Feld #5 (Bentonitmatte mit integrierter Cu-Folie) und #6 (vorbefeuchtet eingebaute Bentonitmatte) werden nach 5-

jähriger Betriebsdauer kumulativ minimal schlechtere Dichtleistungen von 90 bis 95% erreicht. In den ersten 2 bis 3 Jahren konnten an beiden Testfeldern (Feld #5 und #6) gleiche bzw. teilweise sehr geringere Durchlässigkeiten durch das Dichtelement (Basisflow) im Vergleich zum Regelsystem der TASI (Feld #7) nachgewiesen werden. Die Auswertungen der letzten beiden Untersuchungsjahre (2003 und 2004) zeigen jedoch deutliche Verschlechterungen des Dichteffektes. Eine Überdeckung von 50 cm kann somit definitiv als nicht ausreichend für die eingebrachten Dichtungselemente eingeschätzt werden. Zum Aufbau von gleichwertigen alternativen Oberflächenabdichtungen sind geeignete Systemkomponenten auszuwählen und diese an die konkreten Standort- und Klimabedingungen angepasst, miteinander zu kombinieren. Weiterführende prognostische Aussagen ohne eine gezielte empirische Untersetzung mit Langzeitfeldversuchen und/oder die Nutzung geeigneter wasserhaushaltlicher Bilanzierungsmodelle sind nicht oder nur mit geringer Reproduzierbarkeit möglich.

Simulationen des Wasserhaushalts von Dichtungssystemen (z. B. mit HELP) sind grundsätzlich als sehr gute Hilfsmittel bei der Konzeption von Oberflächenabdichtungen von Deponien einzuschätzen. Die Modellberechnungen von Abdichtungssystemen weisen eine besondere Realitätsnähe auf, insbesondere dann wenn die Abdichtelemente aus natürlichen Böden oder Bodenkomponenten bestehen (hier: Feld #1 und Feld #7). Bei der Modellierung von Abdichtungssystemen mit technischen Dichtelementen sind die Herstellerangaben, insbesondere die der k_f -Werte zu hinterfragen. Die Materialien sind besonderen Alterungsprozessen unterworfen, wodurch sich deren charakterisierende Werte bereits nach kurzen Zeiträumen unter Feldbedingungen deutlich ändern können. Dies sollte in verschiedenen Szenarien von Prognose- und Zukunftsrechnungen notwendigerweise Berücksichtigung finden. Zu deren Verifikation sollten oder müssen auch hier empirische Langzeitfeldbetrachtungen dienen.

Nur durch die Nutzung des speziellen „Güte-Kriteriums“ zur Identifizierung eines „best-fits“ unter den verschiedenen bodenphysikalischen und zeitabhängigen Variationen der Modellläufe, ist eine objektive Bewertung einzelner wasserhaushaltlicher Modellrechnungen möglich. Ausgehend von etwa 89% (s. Feld #5) und etwa 66% (s. Feld #7) der mittleren gewichteten täglichen prozentualen Abweichung der Modellsimulationsergebnisse der Nullvariante von den Messwerten, kann bei der zeitkonstanten Variation der bodenphysikalischen Messwerte im „best-fit“ mit den empirischen Messwerten eine Annäherung bis auf etwa 27% (s. Feld #5) und etwa 30% (s. Feld #7) erreicht werden.

Von grundlegender Bedeutung bei der wasserhaushaltlichen Modellierung von Abdichtungssystemen ist ferner auch eine umfassende und nachvollziehbare Dokumentation der Modellrechnungen, d. h. sowohl der Eingangsdaten als auch der Modellläufe und der jeweils ermittelten Ergebnisse. Als Kriterien für eine gute Modellierpraxis können somit angegeben werden:

- eine qualifizierte Systemanalyse,
- die Vorlage qualifizierter Daten,
- ein qualifiziertes mathematisches Modell (fallbezogen verifiziert, kalibriert und validiert) sowie
- ein qualifizierter und erfahrener Modellierer.

Unter Beachtung aller vorgenannten Kriterien können derartige Simulationsrechnungen, auf Basis wasserhaushaltlicher Modelle, sehr geeignet sein und als ein wesentlicher Bestandteil einer komplexen fach- und sachgerechten sowie wirtschaftlichen Bewertung und Optimierung eines jeweils standortbezogenen alternativen Abdichtungssystems von Deponien und Altlasten ausgewiesen werden. Voraussetzung ist eine

Verifikation an langfristig angelegten Testfelddatensätzen. Nur hieran sind weitere Optimierungen der Modelliergüte und damit sichere Simulationsergebnisse zur Bewertung von Oberflächendichtsystemen in langfristig orientierten Zukunftsphasen möglich.

6 Literaturverzeichnis

- BEATTY, F. (1996): Vergleich der Bodenwasserhaushaltsmodelle, BOWAHALD und U.S. EPA HELP. Bolton/Kanada
- BERGER, K. (1998): „Validierung und Anpassung des Simulationsmodells HELP zur Berechnung des Wasserhaushalts von Deponien für deutsche Verhältnisse“. Umweltbundesamt, Fachgebiet III 3.6, Berlin
- BERGER, K.; DUNGER, V. (2000): Vergleichende Simulationsrechnungen mittels der Deponie- und Haldenwasserhaushaltsmodelle HELP und BOWAHALD. Proceedings zum Weiterbildungsseminar des DGFZ e.V.: Simulation zum Halden-/Deponiewasserhaushalt, Dresden
- BERGS, C.-G.; DREYER, S.; RADDE, C.-A. (1997): TA Siedlungsabfall. 2. aktual. u. erw. Aufl., Erich Schmidt Verlag, Berlin
- DYCK, S.; PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. 3. Aufl., Verlag für Bauwesen, Berlin
- EGLOFFSTEIN, T.; BURKHARDT, G. (2001): Der Einfluss des Ionenaustausches auf die Dichtwirkung von Bentonitmatten in Oberflächenabdichtungen von Deponien. In: EGLOFFSTEIN, T.; BURKHARDT, G.; CZURDA, K.: Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2000. Band 119, Buchreihe Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- GARTUNG, E. (1997): Empfehlungen zum Qualitätsmanagement. In: DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK e. V. (Hrsg.): GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten. 3. Aufl., Ernst & Sohn Verlag für Architektur und techn. Wissenschaften, Berlin
- HÜBNER, J.-K.; SCHNEIDER, P. (2005): Practical Approach to the Alternative Evapotranspiration Landfill Cover. In: VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY (Hrsg.): Tagungsband der 6. Internationalen Konferenz "Environmental Engineering", Vilnius
- LIPPMANN-PIPKE, J.; SCHNEIDER P. (2005): Entwicklung eines methodischen Verfahrensansatzes zur Erstellung von Gleichwertigkeitsnachweisen für Deponieabdichtungen in Sachsen. Teilprojekt: Wasserhaushaltsmodellierung. Bericht zum BMBF-Forschungsprojekt: 01707003, in Vorbereitung.
- MÜLLER, M. (2001): Felduntersuchungen zur Gleichwertigkeit von Oberflächenabdichtungssystemen für Hausmülldeponien. Diplomarbeit, Hochschule Zittau/Görlitz, Zittau
- MÜLLER, M.; SCHOENHERR, J. I.; BAUMERT, R.; WERNER, H. (2004): Langzeitauswertung der in-situ-Testfelder auf der Deponie Bautzen/Nadelwitz. In: DRESDNER GRUNDWASSERFORSCHUNGSZENTRUM e. V. (Hrsg.): Altablagerungen und Deponiestilllegung. Tagungsband zum XV. Sächsischen Altlastenkolloquium, Dresden
- SCHOENHERR, J.I.; MÜLLER, M.; BAUMERT, R.; LIPPMANN-PIPKE, J.; SEIDLER, CHR.; SÄNGER, F.; DEUTSCH, K.; SCHNEIDER P.; BARTUSCH, K.; KOSTELETSKY, G.; WERNER, H. (2005): Entwicklung eines methodischen Verfahrensansatzes zur Erstellung von Gleichwertigkeitsnachweisen für Deponieabdichtungen in Sachsen. Bericht zum BMBF-Forschungsprojekt: 01707003, in Vorbereitung
- SCHNEIDER, P.; SCHAFFRATH, M. (2004): Oberflächensicherung für Bergbaualtlasten (Halden) und Deponien. In: DRESDNER GRUNDWASSERFORSCHUNGSZENTRUM e. V. (Hrsg.): Altablagerungen und Deponiestilllegung. Tagungsband zum XV. Sächsischen Altlastenkolloquium, Dresden

- SÄNGER, F. (1999): Prüfbericht – Aufgrabung der Versuchsfelder am Bauvorhaben Deponie Nadelwitz. Interner Bericht, DBI-EWI GmbH, Blankenburg
- SÄNGER, F. (2001): 2. Prüfbericht – Aufgrabung der Versuchsfelder am Bauvorhaben Deponie Nadelwitz. Interner Bericht, DBI-EWI GmbH, Blankenburg
- WERNER, H. (2003): Temporäre Abdeckung als Bestandteil und Voraussetzung für wirtschaftliche Endabdichtungen – Die Testfelder auf der Deponie Nadelwitz. In: EGLOFFSTEIN, T.; BURKHARDT, G.; CZURDA, K.: Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2003. Band 128, Buchreihe Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- WWW.GDAONLINE.DE (2004): <www.gdaonline.de/empfehlungen/e2-30.pdf>, recherchiert am 12.12.2004
- WWW.WISSENSCHAFT.DE (2004): <www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/geo/50>, recherchiert am 26.05.2004

Danksagung:

Dieser Fachbeitrag basiert auf einem in freundlicher Weise durch das BMBF geförderten FuE-Forschungsprojekt zur Thematik „Gleichwertigkeitsnachweis für Deponieoberflächenabdichtungen in Sachsen“. Die Forschungsgruppe dankt dem BMBF für seine Förderung und dem RAVON (Regionaler Abfallverband Oberlausitz-Niederschlesien e.V., Schöpstal) für die Bereitstellung der Testfeldaten im Zeitraum 1998 bis 2002 sowie für die Erlaubnis zur Nutzung der Versuchsanlage in Bautzen/Nadelwitz im Forschungszeitraum 2003 bis 2005.

Anschriften der Autoren:

Name: Prof. Dr.-Ing. Jürgen I. Schoenherr
Dipl.-Ing. (FH) Mario Müller
Dipl.-Ing. (BA) Renè Baumert

Firma: Hochschule Zittau/Görlitz; MVSR-Forschungslabor

Anschrift: Theodor-Körner-Allee 16; 02763 Zittau

Tel./Fax: 03583 61-1328 / 03583 61-1818

E-mail: j.schoenherr@hs-zigr.de; mmueller@hs-zigr.de, rbaumert@hs-zigr.de

Internet: www.hs-zigr.de

Name: Dr. rer. nat. Johanna Lippmann-Pipke

Firma: GeoForschungsZentrum Potsdam

Anschrift: Telegrafenberg B320, 14473 Potsdam

Tel.: 0331-2881429

E-mail : Lippmann@gfz-potsdam.de

Internet : www.gfz-potsdam.de

Name: Dipl.-Geol. Petra Schneider

Firma: C&E Consulting und Engineering GmbH

Anschrift: Jagdschänkenstr. 52, 09117 Chemnitz

Tel./Fax: Tel: 0371-8814310, Fax: 0371-8814312

E-mail: p.schneider@cue-chemnitz.de

Internet: www.cue-chemnitz.de