

## **E 2-30 Modellierung des Wasserhaushaltes der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien**

Stand: September 2003

### **1 Allgemeines**

Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien bestehen aus den Elementen Abdichtungsschicht, Entwässerungsschicht, Rekultivierungsschicht und Bewuchs.

Nach der GDA-Empfehlung E 2-4, 1997 ist die Eignung der einzelnen Komponenten nachzuweisen. Dies gilt insbesondere in Hinblick auf den Wasserhaushalt des Oberflächenabdichtungssystems, der maßgeblich durch die hydrologischen Prozesse an der Oberfläche und in der Rekultivierungsschicht beeinflusst wird. Es ist anzustreben, dass der Anteil des Niederschlagswassers, der durch die Rekultivierungsschicht hindurchsickert und in der Entwässerungsschicht abfließt oder in den Abfallkörper infiltriert, minimiert wird. Dabei kommt der Auslegung der Rekultivierungsschicht und der Auswahl des Bewuchses eine besondere Bedeutung zu.

Ferner ist der Wasserhaushalt von Oberflächenabdichtungssystemen während der Betriebs- und Nachsorgephase von Deponien im Rahmen der Eigenüberwachung des Deponiebetreibers zu bilanzieren (TA Abfall, 1991, TA Siedlungsabfall, 1993).

Ziel dieser Empfehlung ist es, allgemein anerkannte Verfahren zur Wasserhaushaltsbetrachtung bei Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien zusammenzustellen. Hierzu sind insbesondere Wasserhaushaltsmodelle geeignet, die prinzipiell für folgende Aufgaben genutzt werden können:

- Planungsphase:
  - Vergleich der hydrologischen Wirksamkeit unterschiedlich aufgebauter Abdichtungssysteme
  - Abschätzung der langfristigen hydrologischen Wirksamkeit von Abdichtungssystemen
  - Optimierung einzelner Schichten von Abdichtungssystemen
- Risikoanalysen:
  - Abschätzung spezifischer Risiken z.B. älterer Abdichtungssysteme im Rahmen von Gefährdungsabschätzungen
- Nachsorgephase:
  - Abschätzung von Komponenten des Wasserhaushalts im Rahmen der von TA Abfall/TA Siedlungsabfall geforderten Nachsorge.

Nach einem Überblick über die wesentlichen Prozesse des Wasserhaushaltes von Oberflächenabdichtungssystemen und Hinweisen auf die Verfahren zur Abschätzung der Einzelkomponenten werden die Anforderungen an Wasserhaushaltsmodelle beschrieben, mit denen eine präzisere Bestimmung der Einzelkomponenten und deren Bilanzierung möglich ist. Einen Schwerpunkt nehmen dann die Darstellung eines mittlerweile auch in Deutschland eingeführten Wasserhaushaltsmodells (HELP) und Empfehlungen für dessen Anwendung ein.

## 2 Komponenten des Wasserhaushalts und deren Bestimmung

### 2.1 Übersicht über die wesentlichen Elemente des Wasserhaushalts

Der Wasserhaushalt von Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen wird durch die folgende Wasserhaushaltsgleichung beschrieben:

$$N = ET_a + A_O + A_I + A_D + A_{SW} + (R - B) \quad (1)$$

Sie gibt die Massenerhaltung der in das System ein- und ausgehenden Flüsse sowie der Wasservorratsänderung im System in einem definierten Zeitraum wieder. Die Größen werden in der Regel als Höhe einer Wasserschicht (in mm) über einer horizontalen Fläche, also als Volumen je Flächeneinheit, ausgedrückt.

Das Bild 2-30.1 zeigt einen exemplarisch schematischen Schnitt durch ein mineralisches Oberflächenabdichtungssystem mit den genannten hydrologischen Größen.

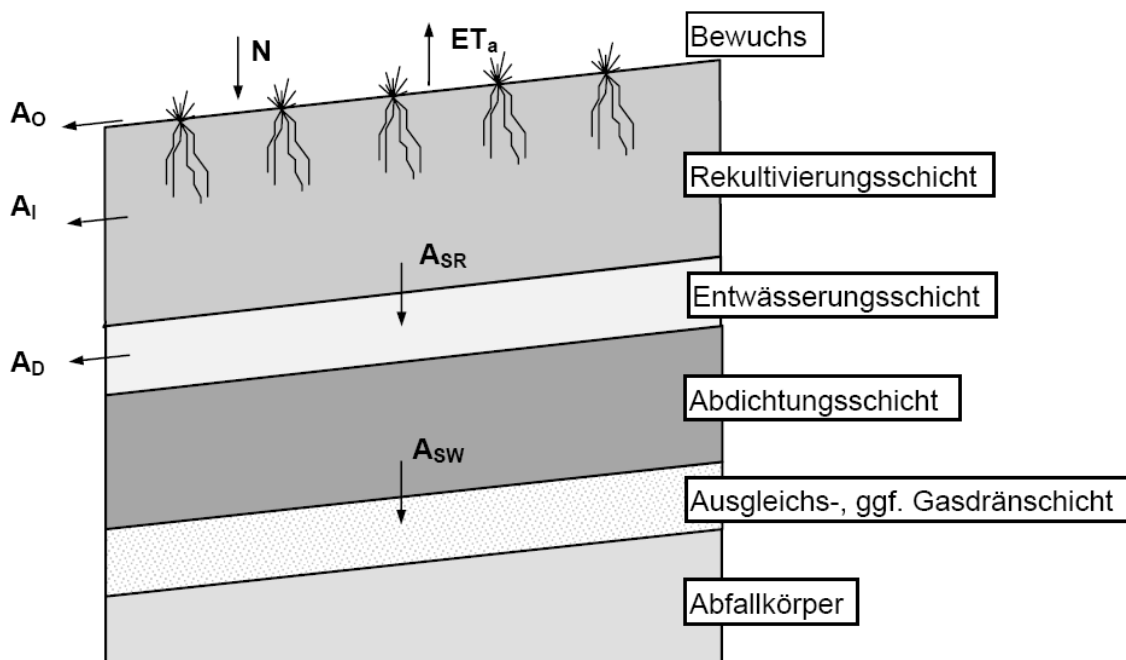


Bild 2-30.1: Exemplarischer Aufbau eines Deponie-Oberflächenabdichtungssystems

Für die einzelnen Größen der Wasserbilanz gilt:

- **Niederschlag N**

Der Niederschlag ist die maßgebliche Eingangsgröße des Wasserhaushalts. Die räumliche und zeitliche Verteilung des Niederschlags kann erheblichen Schwankungen unterliegen, deshalb ist die Kenntnis der Niederschläge, gewöhnlich als Tagessummenreihe, für den Standort der Deponie unabdingbar.

- **tatsächliche Verdunstung  $ET_a$**

Die Verdunstung ET (Evapotranspiration) setzt sich aus den Komponenten Evaporation E und Transpiration T zusammen. Die Evaporation beinhaltet die Verdunstung von der unbewachsenen Erdoberfläche (Bodenverdunstung) und von auf Pflanzenoberflächen zurückgehaltenem Niederschlag (Interzeptionsverdunstung, abiotisch). Als Transpiration wird die Verdunstung von Pflanzenoberflächen aufgrund biotischer Prozesse bezeichnet.

Es wird zwischen der potentiellen Evapotranspiration  $ET_p$  (maximal mögliche Verdunstung bei gegebenen meteorologischen Bedingungen und unbegrenzt verfügbarem Wasser) und der tatsächlichen Evapotranspiration  $ET_a$  (tatsächliche Verdunstung bei gegebenen meteorologischen Bedingungen und begrenztem Wassernachschub) unterschieden.

- **Oberflächenabfluss  $A_0$**

Unter dem Oberflächenabfluss  $A_0$  wird der Anteil des Niederschlags verstanden, der den Boden erreicht, jedoch nicht infiltriert, sondern in Gefällrichtung auf der Bodenoberfläche abfließt.

- **Zwischenabfluss (Interflow)  $A_i$**

Der Zwischenabfluss fließt lateral in der Rekultivierungsschicht ab, ohne die Entwässerungsschicht zu erreichen.

- **Durchsickerung der Rekultivierungsschicht  $A_{SR}$  und Dränabfluss  $A_D$**

Der Dränabfluss ist derjenige Anteil an der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht ( $A_{SR}$ ), der in der Entwässerungsschicht abfließt und aus dem System entfernt wird.

Bei der Bilanzierung des Wasserhaushalts des gesamten Oberflächenabdichtungssystems wird die Durchsickerung der Rekultivierungsschicht  $A_{SR}$  als interne Größe nicht berücksichtigt (siehe Gleichung (1)).

- **Sickerwasserbildung  $A_{sw}$  (Durchsickerung der mineral. Abdichtung)**

Das durch die Abdichtungsschicht hindurchsickernde Wasser tritt in den Abfallkörper ein und wird schließlich zu Deponiesickerwasser.

- **Vorratsänderung (R - B)**

Die Vorratsänderung beschreibt die Veränderung des Wassergehaltes der Schichten des Oberflächenabdichtungssystems während des Betrachtungszeitraumes (R = Rücklage, B = Aufbrauch).

Detaillierte Definitionen und Erläuterungen finden sich in der DIN 4049-3, 1994 und dem DVWK-Merkblatt 238, 1996.

## **2.2 Bestimmung der Komponenten**

### **2.2.1 Verdunstung**

Das DVWK-Merkblatt 238, 1996 (Ermittlung der Verdunstung) stellt den aktuellen Kenntnisstand zur Berechnung der verschiedenen Verdunstungsgrößen ausführlich dar. Auf die Anwendung dieses Merkblattes sei ausdrücklich verwiesen, außerdem auf DIN 19685.

### **Potentielle Evapotranspiration**

Die potentielle Evapotranspiration kann mit verschiedenen Verfahren, z.B. nach PENMAN, TURC oder HAUDE (besonders häufig in Deutschland benutzt) berechnet werden. Die Verfahren erfordern unterschiedliche meteorologische Eingangsdaten, die nicht alle in gleichem Maß zur Verfügung stehen. Die physikalischen Grundlagen, Berechnungsverfahren und Ergebnisunterschiede an gleichen Standorten werden detailliert im o.g. DVWK-Merkblatt dargestellt.

### **Tatsächliche Evapotranspiration:**

Ausgehend von der potentiellen Evapotranspiration wird die tatsächliche Evapotranspiration (bewachsene Flächen) bzw. tatsächliche Evaporation (unbewachsene Flächen) in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte im verdunstungsbeeinflussten Bodenbereich berechnet.

Bei bewachsenen Böden kennzeichnet die Tiefe der verdunstungsbeeinflussten Bodenzone den Bereich des Bodens, aus dem das Wasser maximal durch Transpiration und Bodenevaporation entzogen werden kann. Sie entspricht der effektiven Durchwurzelungstiefe (s. AG BODEN, 1994).

Bei Wasserhaushaltsmodellen für Rekultivierungsschichten spielt deshalb die Kopplung von Verdunstungsprozessen und Bodenwasserhaushalt die entscheidende Rolle für die Güte des Modells.

Für eine erste Abschätzung der Jahreshöhe der tatsächlichen Verdunstung von rekultivierten Deponieabschnitten mit wenigen, leicht bestimmbar Kenngrößen kann das Verfahren von RENGER/WESSOLEK empfohlen werden. Das Verfahren, das auch der DIN 19687, 1998 zugrunde liegt, wird im DVWK-Merkblatt 238, 1996 erläutert (siehe auch BERGER/ SOKOLLEK, 1997).

Eine nachträgliche Überprüfung der Evapotranspiration kann über die Bilanzierung des Wasserhaushalts erfolgen, wenn über dessen sonstige Glieder gesicherte Daten vorliegen.

### **Verdunstung geneigter Flächen**

Als Folge der geänderten Einstrahlungsverhältnisse unterscheidet sich die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration für geneigte Flächen von der für horizontale Flächen. In Abhängigkeit von der Neigung und Orientierung einer Fläche (Deponiehangbereich) ergeben sich insbesondere an strahlungsintensiven Tagen z.T. deutliche Veränderungen in der potentiellen Evapotranspiration.

Für die differenzierte Verdunstungsberechnung von einzelnen Deponiehangbereichen müssen die Komponenten der Globalstrahlung auf Schrägempfang umgerechnet werden (MARKWARDT, 1990; DVWK-Merkblatt 238, 1996; BERGER, 1998; WESSOLEK et al., 2002).

Für die überschlägige Wasserhaushaltsbilanzierung eines gesamten Deponieoberflächenabdichtungssystems ist dies allerdings in der Regel nicht notwendig, da sich die Unterschiede in der Gesamteinstrahlung/Verdunstung der verschiedenen exponierten Flächen häufig ausgleichen; z.B. korrespondiert der Zuwachs der Gesamteinstrahlung / Verdunstung von südorientierten Flächen bei Haldendeponien mit der Abnahme der Verdunstung von nordorientierten Flächen.

#### **2.2.2 Oberflächenabfluss**

Der Oberflächenabfluss hängt neben den meteorologischen Bedingungen (Höhe und Intensität des Niederschlags) wesentlich von der Bodenart des Oberbodens, dem Bodenzustand (Lagerungsdichte, Verschlammung, Bodenfeuchte, Bodenfrost), dem Bewuchs sowie dem Gefälle ab.

Der jährliche Oberflächenabfluss von rekultivierten, gut bewachsenen Deponien ist meistens gering. Ohne detaillierte Berechnungen ist der Anteil des Oberflächenabflusses an der jährlichen Wasserbilanz nur empirisch, gestützt auf Erfahrungswerte, abzuschätzen. Anhaltswerte werden zum Beispiel bei SOKOLLEK/ WEIGELT-McGLONE, 1997 gegeben.

Für einzelne Regenereignisse kann der Anteil des Oberflächenabflusses am Niederschlag z.B. durch das Curve-Number-Verfahren des U.S. Soil Conservation Service (SCS) bestimmt werden (siehe DVWK-Regeln 113, 1984).

Für die Bemessung der Fassungselemente der Oberflächenentwässerung ist die Ermittlung des maßgeblichen Abflusses infolge von Starkregenereignissen erforderlich. Ansätze und Berechnungshinweise (z.B. der Stadthydrologie) finden sich in:

- ATV-Arbeitsblatt A 118, 1977  
(Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen)
- ATV-Arbeitsberichte der Arbeitsgruppe 1.2.6, 1986, 1987  
(Hydrologie der Stadtentwässerung, Teil 1: Abflussbildung, Teil 2: Abflusskonzentration)
- ATV-Merkblatt M 165, 1994  
(Anforderungen an Niederschlag-Abfluss-Berechnungen in der Stadtentwässerung)
- DVWK-Regeln 112, 1982 und 113, 1984  
(Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil I: Analyse, Teil II: Synthese)

Von RAMKE, 2002a wird ein Ansatz zur Ermittlung des maßgeblichen Abflusses beschrieben, der auf der Langzeitsimulation des Wasserhaushalts der Rekultivierungsschicht mit dem HELP-Modell beruht. Darauf aufbauend wird für maßgebliche Bodenfeuchtezustände der Oberflächenabfluss für relevante Starkregenereignisse mit einer Kurzzeitsimulation unter Nutzung des Curve-Number-Verfahrens ermittelt.

Die Kombination ungünstiger Faktoren (wie z.B. gesättigte Rekultivierungsschicht bei geringer Vegetationsbedeckung oder Regen und Schneeschmelze bei gefrorenem Boden) ist zu berücksichtigen. Ferner sollten die lokalen Erfahrungen mit der Bildung von Oberflächenabfluss einbezogen werden.

### 2.2.3 Dränabfluss

Im Rahmen von überschlägigen Wasserhaushaltsbilanzen kann der Dränabfluss gleich der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht, vermindert um die Durchsickerung der Abdichtungsschicht, gesetzt werden.

Der Dränabfluss in der Entwässerungsschicht kann als eindimensionale Filterströmung auf geneigter Sohle beschrieben werden.

Das Vorgehen für den hydraulischen Nachweis der Entwässerungsschicht ist in der GDA-Empfehlung E 2-20, 1997 und bei RAMKE, 2002a dargestellt.

### 2.2.4 Durchsickerung der Abdichtungsschicht

Die Höhe der jährlichen Durchsickerung einer mineralischen Abdichtungsschicht (aus bindigen Materialien) kann unter den folgenden Prämissen einfach abgeschätzt werden:

- flächige, einwandfrei funktionierende Entwässerungsschicht über der Abdichtung
- kein nennenswerter Wasseraufstau über der Abdichtungsschicht im Verhältnis zur Schichtmächtigkeit
- ganzjähriges Wasserdargebot

Dann gilt nach dem Gesetz DARCY:

$$v_f = k_f \cdot i \quad (2)$$

mit  $v_f$  = Filtergeschwindigkeit [m/s]  
 $k_f$  = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]  
 $i$  = hydraulisches Gefälle [-]

Unter den oben genannten Voraussetzungen wird das hydraulische Gefälle näherungsweise zu 1, da die Abdichtungsschicht senkrecht durchströmt wird und ein Aufstau oberhalb der Abdichtung nicht angesetzt wird. Die Filtergeschwindigkeit ergibt sich damit unmittelbar aus dem Durchlässigkeitsbeiwert, die Höhe der Durchsickerung folgt als Produkt aus Filtergeschwindigkeit und Dauer. Die Schichtdicke der mineralischen Abdichtungsschicht hat keinen Einfluss auf die Höhe der Durchsickerung, sondern nur auf die Durchströmzeit.

Bei der Abschätzung der Durchsickerung ist zu berücksichtigen, dass die Durchlässigkeit von mineralischen Abdichtungen (ohne Risse und örtliche Fehlstellen) um ein bis zwei Zehnerpotenzen schwanken kann und dass das Langzeitverhalten mineralischer Abdichtungen durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird, die sich auf das Durchlässigkeitsverhalten auswirken, sich jedoch einer Quantifizierung entziehen. Die wesentlichen dieser Faktoren sind:

- Rissbildung durch Austrocknung
- Rissbildung infolge ungleichförmiger Setzung des Müllkörpers
- Durchwurzlung der Abdichtungsschicht

In RAMKE et al., 2002 ist der Stand des Wissens in Deutschland als Ergebnis eines Status-Workshops zu diesem Themenbereich zusammengefasst.

### **3 Übersicht über Wasserhaushaltsmodelle**

#### **3.1 Einführung**

Wasserhaushaltsmodelle verknüpfen die einzelnen Prozesse des Wasserhaushalts zu einem Gesamtsystem und bilanzieren innerhalb dieses zeitlich und räumlich abgegrenzten Systems alle ein- und ausgehenden Wasserflüsse und die Änderung des Wasservorrats.

Wesentliche Vorteile der Anwendung von Modellen gegenüber empirischen Untersuchungen sind die einfache, kostengünstige Bearbeitung komplexer Systeme, die Standardisierung der Bearbeitung und damit die einfache Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Wasserhaushaltsmodelle lassen sich nach unterschiedlichen Kriterien klassifizieren:

- nach dem Lösungsansatz in deterministische und stochastische Modelle
- nach der Anzahl der Raumdimensionen in ein- bis dreidimensionale Modelle
- nach der räumlichen Auflösung in Schicht- oder Kompartimentmodelle und in raumkontinuierliche Modelle
- nach der zeitlichen Auflösung in zeit-diskrete (häufig mit festem Zeitschritt) und zeit-kontinuierliche Modelle

Raum- und zeitkontinuierliche Modelle beschreiben Prozesse im allg. mittels partieller Differentialgleichungen, die numerisch über Finite-Differenzen- oder (für die Raumdimensionen) Finite-Elemente-Methoden gelöst werden. Zur Formulierung eines Anwendungsfalls muss der Anwender eine räumliche und zeitliche Diskretisierung vorgeben.

Wasserhaushaltsmodelle sind insbesondere zur Modellierung der komplexen Wechselwirkung von Bewuchs, potentieller Evapotranspiration, Bodenwasser und tatsächlicher Evapotranspiration geeignet, da durch eine Modellierung eine wesentlich verbesserte Abschätzung der Durchsickerung der Rekultivierungsschicht möglich wird.

#### **3.2 Beispiele in Deutschland eingesetzter Modelle**

Wasserhaushaltsmodelle werden mit unterschiedlichen Modellierungsschwerpunkten u.a. von der Agrarmeteorologie, der Bodenkunde, der Hydrologie und von Ingenieurwissenschaften entwickelt.

In der Literatur wird eine Vielzahl von Modellen des Wasserhaushalts oder seiner Teilprozesse beschrieben. Die meisten sind in Forschungsprojekten entstanden, nicht für die Anwendung von Dritten entwickelt und nicht frei verfügbar.

Frei verfügbare bodenphysikalische Modelle, die den gesättigt-ungesättigten Wasserfluss im Boden und die Verdunstung erfassen, sind u.a.:

- SWAP (VAN DAM et al., 1997)  
1-dimensional, deterministisch, raumkontinuierlich, Finite-Differenzen-Modell
- SWSM\_2D (SIMUNEK et al., 1994)  
2-dimensional, deterministisch, raumkontinuierlich, Finite-Elemente-Modell;  
auch mit Modellierungsumgebung als HYDRUS\_2D und für 3 Dimensionen  
als SWMS\_3D erhältlich
- HILLFLOW (BRONSTERT, 1994)  
1-3-dimensional, deterministisch, raumkontinuierlich, Finite-Elemente-Modell

Für den Wasserhaushalt von Bergehalden (einschließlich Oberflächen- und Basissicherungssystemen) wurde das Modell BOWAHALD (DUNGER, 2001, 2002) entwickelt. Dieses Modell ist ein quasi-zweidimensionales, deterministisch, und konzeptionelles Boxmodell.

Speziell für die Simulation des Wasserhaushalts von Abdichtungssystemen für Deponien und Altlasten wurde unter Federführung von Paul Schroeder im Auftrag der Umweltbehörde der USA das HELP-Modell entwickelt, (SCHROEDER et al., 1994a,b), das in einer umfangreichen Validierungsstudie unter deutschen Klimaverhältnissen untersucht (BERGER, 1998) und für die Anwendung in Deutschland angepasst und weiterentwickelt wurde (BERGER, 2002b; SCHROEDER/ BERGER, 2002).

### 3.3 Kriterien zur Auswahl eines Modells

Bei der Auswahl eines Modells sollten folgende Kriterien herangezogen werden:

- Berücksichtigung der maßgeblichen Prozesse des Wasserhaushalts
- Validierungsstand des Modells hinsichtlich der berücksichtigten Prozesse, des Systemaufbaus und des Klimas am Standort
- Verfügbarkeit der jeweils benötigten Daten (Wetter, Boden, Vegetation; zeitliche Auflösung und Mess- / Berechnungsverfahren beachten)
- Zugänglichkeit bzw. Verfügbarkeit des Modells
- Kosten-Nutzen-Aspekte (u.a. Benutzerfreundlichkeit der Modellanwendung).

Für die Modellierung des Wasserhaushalts von Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien wird aus nachfolgenden Gründen das HELP-Modell vorgestellt:

- das HELP-Modell berücksichtigt die maßgeblichen Wasserhaushaltsprozesse
- es wird in den USA von der US EPA zur Anwendung empfohlen und wird bereits seit einigen Jahren in Deutschland eingesetzt
- es wurden umfangreiche Validierungsstudien durchgeführt
- die notwendigen Eingangsdaten sind in der Regel verfügbar
- es ist frei zugänglich und die Benutzerfreundlichkeit ist zufriedenstellend

HELP repräsentiert damit einen akzeptablen Stand der Modellierung des Wasserhaushalts von Oberflächenabdichtungssystemen.

## **4 Empfehlungen zur Anwendung des HELP-Modells**

### **4.1 Kurzbeschreibung des HELP-Modells**

Das HELP-Modell (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) ist ein quasi-zweidimensionales, deterministisches, mit einem eintägigen Zeitschritt arbeitendes Schichtmodell für den Wasserhaushalt und die Wasserflüsse in Deponieprofilen, das mittlerweile auch in einer deutschen Weiterentwicklung vorliegt.

Die Originalversion HELP 3 wird durch SCHROEDER et al., 1994a,b ausführlich dokumentiert, die deutsche Weiterentwicklung durch BERGER, 2002b und SCHROEDER / BERGER, 2002. Darüber hinaus steht mit Visual HELP von Waterloo Hydrogeologic Inc. eine Benutzeroberfläche unter Windows zur Verfügung, die mit dem Simulationsmodul der Originalversion ausgeliefert wird. Die mit Stand Juli 2002 aktuellen Versionen sind die Originalversion HELP 3.07 und die deutsche Weiterentwicklung HELP 3.55 D; Bezugsquellen sind am Ende dieser Empfehlung aufgeführt.

Ziel des HELP-Modells ist es, ein System zur Abschätzung von Wasserhaushaltsgrößen für einen großen Bereich möglicher Deponieaufbauten und klimatischer Verhältnisse zur Verfügung zu stellen, um den Entwurf und die Überprüfung von Abdichtungssystemen von Deponien in der Planungs- und Genehmigungsphase zu unterstützen. Mit HELP können prinzipiell offene, teilweise oder vollständig geschlossene Deponien und Abdichtungssysteme allein simuliert werden.

HELP hat für die berücksichtigten hydrologischen Prozesse eine Reihe existierender Modellierungsansätze übernommen. Tabelle 1 zeigt die von HELP modellierten hydrologischen Prozesse. Auf Einzelheiten der Modellansätze wird in Abschnitt 4.6 eingegangen.

Tabelle 2-30.1: Übersicht über die maßgeblichen Prozesse des HELP-Modells

<b>Systemkomponente</b>	<b>Berücksichtigte Prozesse</b>
<b>Rekultivierungsschichten</b>	Niederschlag Schneedeckenaufbau und Schneeschmelze Oberflächenabfluss Frieren und Tauen des Bodens Infiltration ungesättigter/ gesättigter vertikaler Fluss Pflanzenwachstum Potentielle u. tatsächliche Evapotranspiration Speichervorgänge im Boden
<b>Entwässerungsschichten</b>	Lateraler Abfluss auf geneigter Sohle
<b>Mineralische Abdichtungsschichten</b>	Durchsickerung nach DARCY
<b>Kunststoffdichtungsbahnen</b>	Durchsickerung durch Fehlstellen Wasserdampfdiffusion

Das Modell ist quasi-zweidimensional, weil verschiedene eindimensionale Prozesse in der Vertikalen (v.a. Versickerung und Verdunstung) und der Horizontalen (Oberflächen- und Dränschichtabfluss) miteinander gekoppelt sind.

Die von HELP benötigten meteorologischen Eingangsdaten, Vegetations-, Boden- und Materialparameter sowie die Angaben zur Systemgeometrie werden in Abschnitt 5 behandelt. Der mögliche Simulationszeitraum beträgt ein bis einhundert Kalenderjahre.

HELP stellt vier Arten von Systemkomponenten (Schichttypen) zur Verfügung, die sich darin unterscheiden, welche Prozesse in ihnen berücksichtigt werden und wie dies geschieht:

1. Perkolationschichten, in denen Wasser versickern und ggf. verdunsten kann; sie dienen der Modellierung von Rekultivierungs-, Gasdrän- und Abfallschichten sowie Abfallschichten
2. Dränschichten, in denen Wasser lateral zu einem Drän abfließen kann (gesättigter Fluss); ansonsten werden Dränschichten wie Perkolationschichten behandelt; Dränschichten können aus mineralischem Material bestehen oder geosynthetische Dränmatten sein.

3. mineralische Abdichtungsschichten, in denen Wasser ausschließlich gesättigt versickern kann (bindige mineralische Abdichtungsschichten [unvergütete, vergütete sowie technisch hergestellte] und Bentonitmatten)
4. Kunststoffdichtungsbahnen

Die Abfolge der Schichttypen in einem Profil ist durch eine Reihe von Regeln eingeschränkt. Ein Deponieprofil kann aus maximal 20 Schichten bestehen. Die sachgerechte Auswahl des Schichttyps ist entscheidend für die Güte der Simulation.

#### **4.2 Anwendungsmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen**

Prinzipiell mit HELP 3 simulierbar sind Deponieprofile, die sich sinnvoll auf eine zulässige Abfolge der vier genannten Schichttypen abbilden lassen. Hierzu gehören die Regelabdichtungssysteme, einfache Abdeckungen und Systeme mit Doppel- oder Mehrfachabdichtungen.

Prinzipiell nicht simulierbar sind Kapillarsperren, weil kapillares Halten von Wasser an Schichtgrenzen und ungesättigter lateraler Fluss nicht modelliert werden. Bestimmte Systeme – z.B. die direkte Aufeinanderfolge mineralischer Abdichtungsschichten – sind nur indirekt simulierbar. In diesem Fall muss entweder eine einzelne zusammengefasste Abdichtungsschicht ausgewiesen werden (siehe SCHROEDER/ BERGER, 2002), oder eine bzw. mehrere Abdichtungsschichten sind als Perkolationschichten zu deklarieren.

Eine Simulation des Wasserhaushalts des Deponiekörpers sowie der Deponiebasis ist zwar grundsätzlich mit HELP möglich, wird jedoch nicht empfohlen. Die Abflussprozesse in einem üblichen inhomogenen Abfallkörper mit bevorzugten Sickerwegen können mit HELP nicht nachgebildet werden, und die Dimensionierung von Elementen des Basisabdichtungssystems ist mit anderen Verfahren einfacher und leichter nachvollziehbar möglich (siehe z.B. die GDA-Empfehlung E 2-14, 1997 für das Basisentwässerungssystem).

HELP ist, wie jedes Modell, mit einer Reihe von Annahmen und Beschränkungen behaftet, von denen einige unumgebar sind, während andere in mehreren Simulationsläufen durch vom Benutzer sinnvoll geänderte Parameter überwunden werden können (z.B. die Anpassung der Parameter an das Alterungsverhalten).

Im folgenden sind die wesentlichsten Annahmen und Beschränkungen aufgeführt:

- HELP ist ein Wasserhaushaltsmodell. Bodenmechanische Aspekte (z.B. Störungen infolge von Setzungen; Erosion) oder chemische Aspekte (wie Pflanzenernährung, chemische Reaktionen zwischen Stoffen des Abdichtungssystems und der Sickerflüssigkeit) werden nicht berücksichtigt.

- HELP ist ein Standortmodell und betrachtet ein quasi-zweidimensionales Deponieprofil. Der weitergehende räumliche Aufbau der Deponie wird nicht berücksichtigt.
- Der Profilaufbau ist in einem Simulationslauf konstant. Eine Alterung wird nicht modelliert. Daraus ergeben sich die folgenden Konsequenzen:
  - keine Modellierung der Vegetationsentwicklung über Jahre hinweg (Sukzession)
  - bei allen mineralischen Schichttypen keine zeitliche Veränderung des Porenraumes oder der gesättigten Wasserleitfähigkeit (z.B. aufgrund von Durchwurzelung, Durchwühlung, Austrocknung, Gefügebildung, Setzungen, Inkrustationen)
  - insbesondere keine Austrocknung von mineralischen Abdichtungsschichten (vgl. Abschnitt 2.2.4) und damit einhergehender Ausbildung von Haar- und Schrumpfrissen, die als bevorzugte Fließwege die Systemdurchlässigkeit deutlich erhöhen
  - analog keine Schrumpfung von Bentonitmatten durch Austrocknung
  - keine Alterung von Geomembranen
- Schichten werden als homogen angenommen und die Porengrößenverteilung als "unimodal" (d.h. sie hat ein Maximum, dessen Lage und Ausprägung von der Bodenart abhängig ist). Wasserfluss durch bevorzugte Fließwege (ausgeprägte Interaggregatporen, Risse, Wurzel- und Tierkanäle, bevorzugte Sickerbahnen im Abfallkörper) wird nicht berücksichtigt.
- Ungesättigter Fluss wird ausschließlich von der Gravitation, nicht von Kapillarkräften angetrieben (also von Gradienten des Gravitationspotentials, nicht von hydraulischen Gradienten). Kapillarer Aufstieg wird daher nicht betrachtet, jedoch implizit innerhalb der Verdunstungszone erfasst; die Evaporation des Bodens wird als Extraktion modelliert.
- Als Vegetation wird Grünlandvegetation (oder unbewachsener Boden) vorausgesetzt. Die Berechnung der Verdunstung bezieht sich auf eine Grasdecke. Sie kann bei Wald (dessen Modellierung nicht vorgesehen ist) wesentlich höhere Werte annehmen. Insbesondere wird bei dicht stehendem, immergrünem Nadelwald die Interzeptionsverdunstung bis HELP 3.07 deutlich unterschätzt. Mit HELP 3.50 D wurde die Berechnung erheblich verbessert.
- Zwischenabfluss wird nicht modelliert.
- Die Modellierung des Frostzustands des Bodens wird in HELP 3 mit einem sehr einfachen Ansatz gelöst. Insbesondere ist die von HELP bis Version 3.07 berechnete Auftauphase eines gefrorenen Bodens deutlich zu lang. Der

Frostzustand des Bodens beeinflusst eine Vielzahl anderer Prozesse, bei denen Folgefehler auftreten können. Davon betroffen ist im wesentlichen der Oberflächenabfluss, daneben auch der Dränabfluss. In HELP 3.50 D wurde das Bodenfrostmodell verbessert und die Folgefehler dadurch weitgehend behoben.

Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung des HELP-Modells für Oberflächenabdichtungssysteme an Hand von praktischen Beispielen werden ausführlich in RAMKE ET AL., 2000 und BERGER, 2002a dargestellt.

Für die Nutzung des HELP-Modells zur Dimensionierung von Komponenten des Oberflächenabdichtungssystems, zur Beurteilung ihrer hydrologischen Wirksamkeit und zur Abschätzung des Austrocknungsrisikos mineralischer Abdichtungsschichten stehen folgende Erfahrungen zur Verfügung:

- Oberflächenwasserfassung und Entwässerungsschichten:  
RAMKE, 2000, 2002a
- Dimensionierung von Kapillarsperren: VON DER HUDE, 2000
- Austrocknung mineralischer Abdichtungsschichten:  
HEIBROCK, 2000, 2002; RAMKE, 2002b
- Austrocknung und Wiedervernässung von Bentonitmatten:  
MARKWARDT, 2000; BLÜMEL ET AL., 2002

### **4.3 HELP-Validierungsstudie**

In einem vom BMBF geförderten Vorhaben wurde eine Validierungsstudie und eine Anpassung der Version 3.06/ 3.07 des HELP-Modells am Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg durchgeführt (BERGER, 1998). Die Validierungsstudie umfasst:

- die Diskussion der Methodik der Validierung
- die Validierung des Modellierungsansatzes (des konzeptionellen Modells) von HELP durch einen Vergleich mit dem Stand der Wissenschaft
- eine Sensitivitätsanalyse für Rekultivierungsschichten und zu einigen Aspekten der Verdunstung sowie eine Sensitivitätsanalyse zu Dränschichten
- die operationale Validierung anhand von Messdaten der Testfelder auf der Deponie Hamburg-Georgswerder (Beschreibung der Testfelder siehe MELCHIOR, 1993) für die Jahre 1988 bis 1995.

Nachfolgend werden hier die wesentlichen Ergebnisse der Validierungsstudie dargestellt. Der Schwerpunkt liegt auf der Zusammenfassung der Resultate der Validierung anhand von Messdaten.

Die Schichtabfolge der fünf betrachteten Testfelder auf der Deponie entspricht im wesentlichen der der Regelabdichtungssysteme nach TA Siedlungsabfall, allerdings mit zum Teil abweichenden Schichteigenschaften. Die Testfelder tragen eine Grünlandvegetation. Die durchschnittliche Jahreshöhe des Niederschlags in Hamburg liegt in der Größenordnung der durchschnittlichen Jahreshöhe des

Niederschlags von Deutschland.

Der Jahresniederschlag nach DWD-Messverfahren betrug über die 8 Jahre rund 745 mm bei zwei extremen Nassjahren und nur einem relativ trockenen Jahr. Fast alle Winter waren mild und schneearm. Mengenmäßig die Hauptausgabegrößen des Wasserhaushalts waren die reale Verdunstung mit knapp 57 % des DWD-Niederschlags und der Abfluss unter der Rekultivierungsschicht mit knapp 43 % (bei den Feldern mit Kombinationsdichtung fast ausschließlich Dränschichtabfluss, bei den Feldern mit mineralischer Abdichtung mit der Zeit stark zunehmend auch Dichtungsdurchsickerung).

Der Dränschichtabfluss bzw. bei den Testfeldern mit einfacher mineralischer Abdichtung die Summe aus Dränschichtabfluss und Dichtschichtdurchsickerung zeigte eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und von HELP berechneten Werten sowohl über den Gesamtzeitraum als auch überschlägig im Jahresverlauf. Gleiches gilt auch für die reale Verdunstung, die bei den Testfeldermessungen indirekt als Restgröße der Wasserhaushaltsgleichung bestimmt wird und die von allen Ausgabegrößen des Wasserhaushalts mit den höchsten absoluten Unsicherheiten behaftet ist. Damit konnte gezeigt werden, dass das HELP-Modell die maßgeblichen Prozesse des Wasserhaushalts von typischen Oberflächenabdichtungssystemen (Verdunstung, Versickerung, Speichervorgänge im Boden) unter den untersuchten Bedingungen gut nachbildet.

Die aufgrund austrocknungsbedingter Schrumpfung stark zunehmende Durchsickerung von mineralischen Abichtungen wird von HELP nicht erfasst.

Der Oberflächenabfluss und der Zwischenabfluss spielten mit maximal 1 % keine wesentliche Rolle im Wasserhaushalt. Probleme der Modellierung des Oberflächenabflusses und weitere Aspekte der Validierung des Modellierungsansatzes sind in Abschnitt 4.6 dargestellt.

#### **4.4 Weiterentwickelte deutsche HELP-Version**

Auf Basis der Ergebnisse der Validierungsstudie und weiterer Erkenntnisse wurde das HELP-Modell weiterentwickelt. Die deutsche Weiterentwicklung HELP 3.55 D (Stand: Juli 2002; BERGER 2002b; SCHROEDER/BERGER 2002) weist gegenüber der Originalversion HELP 3.07 folgende wesentliche Änderungen auf:

Simulationsmodell:

- Die Simulationsroutinen wurden grundlegend softwaretechnisch überarbeitet.
- Im Teilmodell für den ungesättigten vertikalen Fluss wurden zwei Fehler behoben.

- Ein Fehler, der bei bestimmten Aufbauten mit Dränmatten zu einer erheblichen Unterschätzung der tatsächlichen Evapotranspiration führt, wurde behoben.
- Das Teilmodell für gefrorenen Boden wurde pragmatisch weiterentwickelt.
- Die Modelle für die tatsächliche Evapotranspiration und das Wachstum und die Zersetzung der Vegetation wurden um Fehler bereinigt, sowie ergänzt und weiterentwickelt. So wurde das Modell der Interzeptionsverdunstung durch ein auf VON HOYNINGEN-HUENE, 1983 aufbauendes Modell ersetzt.

#### Benutzeroberfläche:

- Die Benutzeroberfläche wurde bei weitgehend unverändertem Aussehen neu programmiert, in der Funktionalität erweitert (u. a. um eine Projektverwaltung zu ermöglichen) und in der Handhabung verbessert.
- Die Datenbanken mit Wetterdaten, Parametern für den synthetischen Wettergenerator und Daten zur Verdunstungsberechnung für US-amerikanische Standorte wurden gegen Datenbanken für einige deutsche Standorte ausgetauscht.
- Die Einleseroutinen für tägliche Wetterdaten nordamerikanischer Anbieter wurden durch Einleseroutinen für Daten, wie sie vom Deutschen Wetterdienst auf Datenträger oder per E-Mail bereitgestellt werden, ausgetauscht.
- Eine Datenbank mit Bodendaten für deutsche Bodenarten wurde ergänzt.
- Das US-amerikanische Benutzerhandbuch (SCHROEDER et al., 1994a) wurde ins Deutsche übersetzt und vollständig überarbeitet (SCHROEDER/BERGER, 2002)
- Die englischen Online-Hilfetexte wurden gegen die entsprechenden deutschen Texte ausgetauscht; die Benutzeroberfläche selbst ist nach wie vor in Englisch.

#### **4.5 Generelle Anwendungsempfehlungen**

Bei der Anwendung von HELP (wie auch von anderen Wasserhaushaltsmodellen) sind folgende allgemeine Empfehlungen zu beachten:

- Der Modellanwender soll über hinreichendes Fachwissen im Anwendungsgebiet verfügen.
- Der Modellanwender soll den Modellierungsansatz sowie seine Möglichkeiten und Grenzen genau kennen. Die Modellanwendung soll nur nach einem genauen Studium der Handbücher und der einschlägigen Literatur zum Validierungsstand des Modells erfolgen.
- Alle durchgeführten Simulationsläufe müssen nachvollziehbar und prüfbar

sein. Sie müssen dazu hinreichend dokumentiert werden. Die Dokumentation soll das Simulationskonzept, die Simulationsdurchführung (Angabe der benutzten Version und der Datenquellen) und die Simulationsergebnisse (Anlage aller Ein- und Ausgabedateien, ggf. auch auf Datenträger) umfassen.

- Die Parameterwerte zum Profilaufbau unterliegen Unsicherheiten, die auf verschiedene Ursachen zurückzuführen sein können (z.B. räumliche Variabilität, unterschiedliche Materialchargen, unterschiedlicher Einbau, fehlende Messwerte). Diese Unsicherheiten sind je nach Aufgabenstellung in entsprechenden Simulationsläufen zu berücksichtigen, z.B. indem ein wahrscheinlichster Fall sowie ein ungünstigster und ein günstigster Fall simuliert werden. Die Wahl der Parameterwerte ist dabei zu dokumentieren und zu begründen.
- Bei Aufgaben, die sich nicht auf spezifische Zeiträume (z.B. bestimmte Jahre) beziehen, sind die zeitliche Variabilität und zeitliche Trends der Witterung am jeweiligen Standort zu berücksichtigen. Es soll ein längerer Zeitraum (10, besser 20 oder 30 Jahre), der klimatisch für den Standort hinreichend repräsentativ und aktuell ist, simuliert werden. Der Zeitraum ist klimatisch einzuordnen. Je nach Aufgabenstellung sollen außerdem einzelne Extremjahre des Niederschlags in die Simulation einbezogen werden, z. B. ein extrem trockenes und/oder ein extrem feuchtes Jahr.
- Die Grenzen des Modellierungsansatzes sind zu beachten. Sofern erforderlich und möglich sind sie durch geeignete Parameterwahl in mehreren Simulationsläufen zu berücksichtigen. Die Parameterwahl ist zu begründen. Alle gemachten Annahmen und die Modellbeschränkungen, die nicht umgangen werden, sind explizit zu dokumentieren.
- Bei den Eingabegrößen des Modells sind Begriffsbestimmungen sowie Mess-, Bestimmungs- und Berechnungsverfahren der Größen zu beachten. Gegebenenfalls müssen Daten für die Eingabegrößen umgerechnet werden.
- Die Ergebnisse der Simulationsläufe sind anhand des Standes der Wissenschaft auf Plausibilität zu prüfen.

## **4.6 Spezifische Anwendungsempfehlungen**

### **4.6.1 Vorbemerkung**

Detaillierte Anwendungsempfehlungen für einzelne Prozesse in bzw. Komponenten von Oberflächenabdichtungssystemen geben RAMKE et al., 2000 und BERGER 2002a.

#### 4.6.2 Berechnung der Verdunstung

Das in HELP implementierte Verdunstungsmodell und die berücksichtigten Teilprozesse entsprechen dem Stand der Technik und liefern – unter Berücksichtigung der Beschränkung auf gut zugängliche Eingangsdaten – zufriedenstellend zuverlässige Ergebnisse.

##### **Berechnung der potentiellen Evapotranspiration**

Die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration im HELP-Modell (Version 3) erfolgt in einem täglichen Zeitintervall nach einem vereinfachten PENMAN-Verfahren. Als meteorologische Eingangsparameter werden die Tageswerte der Lufttemperatur und der Globalstrahlung sowie die Quartalsmittelwerte der relativen Luftfeuchte und der Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit verwendet. Die Berechnung kann für die Erstellung von Monats- und Jahresbilanzen als hinreichend genau betrachtet werden.

Die meteorologischen Eingangsdaten Temperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit liegen für eine große Anzahl von Messstationen des DWD vor oder werden z.T. direkt auf Deponiestandorten gemessen. Die Globalstrahlung wird an einer deutlich geringeren Anzahl von Stationen erfasst, unterliegt jedoch auch einer wesentlich geringeren räumlichen Variabilität.

Einschränkend ist festzuhalten, dass die Verdunstung für horizontale und in der Regel grasbewachsene (d.h. geringe Bewuchshöhe) Standorte berechnet wird. Für höhere Bewuchsformen (z.B. Wald) haben insbesondere Interzeptionsvorgänge eine deutlich größere Bedeutung, die bis HELP 3.07 nicht adäquat modelliert, ab HELP 3.50 D jedoch erheblich besser erfasst werden.

##### **Berechnung der tatsächlichen Evapotranspiration**

Ausgehend von der potentiellen Evapotranspiration wird die tatsächliche Evapotranspiration (bewachsene Flächen) bzw. tatsächliche Evaporation (unbewachsene Flächen) in Abhängigkeit von der simulierten Bodenfeuchte im verdunstungsbeeinflussten Bodenbereich berechnet.

Die Validierungsstudie zeigte, dass diese für den Wasserhaushalt entscheidenden Prozesse in der Rekultivierungsschicht durch das Modell gut nachgebildet werden. Hinweise für die Eingangsdaten und das Vorgehen bei unbewachsenem Boden werden in Abschnitt 5.4 gegeben.

##### **Verdunstungsberechnung geneigter Flächen**

Mit dem HELP-Modell können die Unterschiede in der Verdunstungsberechnung von unterschiedlich geneigten Hangbereichen nur durch die Umrechnung der Globalstrahlung auf Schrägempfang nachvollzogen werden. Für die differenzierte Verdunstungsberechnung von einzelnen Deponiehangbereichen sei auf die in Abschnitt 2.2.1 genannten Quellen verwiesen.

#### 4.6.3 Berechnung des Oberflächenabflusses

Die Berechnung des Oberflächenabflusses erfolgt im HELP-Modell nach der SCS Curve-Number-Method auf Tagesbasis. Die zeitliche Verteilung des Niederschlags und die Niederschlagsintensität werden nicht berücksichtigt. Erosion wird nicht betrachtet.

Beim Oberflächenabfluss treten Fehleinschätzungen von HELP vor allem als Folgefehler der Fehleinschätzung des Frostzustandes des Bodens (bis HELP 3.07, ab HELP 3.50 D behoben) und bei ergiebigen Niederschlägen geringer Intensität auf. In beiden Fällen wird der Oberflächenabfluss überschätzt.

Der von HELP anhand der US-Bodenart und der Vegetation bestimmte Parameter zur Berechnung des Oberflächenabflusses bei nicht gefrorenem Boden (die SCS Kurvenzahl) und damit der Oberflächenabfluss sind tendenziell zu niedrig. Die von HELP berechnete Kurvenzahl sollte daher im allgemeinen um 5 – 10 erhöht werden.

Die Berechnung ist bei entsprechender Korrektur der Kurvenzahl hinreichend genau für die Erstellung einer Jahreswasserbilanz. Das HELP-Modell erlaubt jedoch keine Dimensionierung der Fassungselemente der Oberflächenentwässerung (Bermen- und Randgräben, Absturzbauwerke etc.), da die zeitliche Verteilung der Niederschläge und die Niederschlagsintensität nicht berücksichtigt werden. Für Dimensionierungszwecke ist auf die in Abschnitt 2.2.2 erwähnten Verfahren zurückzugreifen.

#### 4.6.4 Berechnung des Dränabflusses

Der Abfluss in der Entwässerungsschicht (Dränabfluss) wird im HELP-Modell durch eine an Deponieverhältnisse angepasste BOUSSINESQ-Gleichung (geneigte, geringdurchlässige Sohle) modelliert. Instationäre Verhältnisse werden als zeitliche Abfolge stationärer Zustände dargestellt. Die Neigung der Sohle der Dränschicht ist über die Länge konstant und sollte 50 % nicht überschreiten.

Die Validierungsstudie zeigte, dass es beim Dränabfluss bei hoher zeitlicher Auflösung (Tageswerte) einige charakteristische Abweichungen zwischen den gemessenen und von HELP berechneten Verläufen gibt. Als Folgefehler des sehr elementaren Modellierungsansatzes des Frostzustandes des Bodens treten bis HELP 3.07 beim Auftauen des Bodens sehr hohe Spitzen im Dränabfluss auf, die sich in den Messwerten nicht wiederfinden. Dieser Fehler wurde ab HELP 3.50 D im wesentlichen behoben.

Ferner ist die Berechnung des Dränabflusses und des Wasseraufstaus innerhalb der Entwässerungsschicht im HELP-Modell nur innerhalb eines beschränkten Parameterspektrums möglich. Stationäre Betrachtungen (mit Vorgabe einer konstanten Dränspende) zeigen u.U. ein instabiles Lösungsverhalten. Reaktionen auf

Zusickerungsereignisse in eine Dränschicht werden durch den quasi-instationären Ansatz gedämpft modelliert (langsames Ansteigen und Abklingen der Abflüsse) und können gleichfalls instabil sein. Die Bestimmung des maximalen Aufstaus des infiltrierten Niederschlagswassers innerhalb der Entwässerungsschicht ist mit dem HELP-Modell deshalb nur eingeschränkt zuverlässig.

Die hydraulische Bemessung der Entwässerungsschicht ist aus diesen Gründen ergänzend mit den in Abschnitt 2.2.3 empfohlenen Verfahren durchzuführen. Die maßgebliche Dränspanne ergibt sich aus den Berechnungen mit dem HELP-Modell.

#### 4.6.5 Berechnung der Durchsickerung von Abdichtungen

##### **Mineralische Abdichtungsschichten**

Die Berechnung der Durchsickerung mineralischer Abdichtungsschichten erfolgt im HELP-Modell nach dem Gesetz von DARCY unter der Voraussetzung, dass die mineralische Abdichtungsschicht stets wassergesättigt bleibt. Der hydraulische Gradient wird als Quotient aus mittlerer Aufstauhöhe über der Abdichtungsschicht + Schichtdicke dividiert durch die Schichtdicke der mineralischen Abdichtung bestimmt. Wenn die mittlere Aufstauhöhe über der Abdichtung zu Null wird, d.h. bei einem Gradienten von 1, wird die Durchsickerung der mineralischen Abdichtungsschicht zu Null angenommen.

Die Validierungsstudie (BERGER, 1998) zeigte, dass bei der Berechnung der Durchsickerung mineralischer Abdichtungen HELP die Durchsickerungsrate erheblich unterschätzt wird, da die Entstehung von Schrumpfrissen und die damit verbundene drastische Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit nicht berücksichtigt werden.

##### **Kunststoffdichtungsbahnen**

Die Modellierung der Durchsickerung von Kunststoffdichtungsbahnen erfolgt in HELP sowohl durch den Ansatz von konvektivem Transport durch Fehlstellen als auch von Diffusionsprozessen. Die Validierungsstudie zeigte, dass diese theoretischen Annahmen bei heute üblichen Kombinationsabdichtungen zu einer Durchsickerungsrate in der Größenordnung von Bruchteilen eines Millimeters pro Jahr führen. Die gemessenen Abflüsse unter der Kombinationsdichtung lagen dagegen in der Größenordnung von wenigen Millimetern pro Jahr, traten vor allem im Sommer auf und beruhten im wesentlichen auf einem Wasserverlust der mineralischen Abdichtungsschicht durch thermische Gradienten (nicht auf einer Durchsickerung), ein Prozess, der von HELP nicht nachgebildet wird.

## **5 Empfehlungen zur Beschaffung der Eingangsparameter**

### **5.1 Vorbemerkungen**

Begriffsbestimmungen für die Eingangsgrößen, Hinweise zur Bestimmung bzw. zur Umrechnung der Größen, Hinweise auf Datenquellen und Tabellen mit Orientierungswerten werden in SCHROEDER/BERGER, 2002 gegeben (s. auch BERGER, 1998). Für die Rekultivierungsschicht und die Vegetation sollten auch die GDA-Empfehlungen E 2-31, 2000 und E 2-32, 2000 herangezogen werden.

### **5.2 Meteorologische Eingangsdaten**

Bei der Bestimmung des Wasserhaushalts von Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien ist die Kenntnis der lokalen meteorologischen Bedingungen, insbesondere der Niederschläge, unabdingbar.

Für Planungszwecke ist auf die Daten der nächstgelegenen Wetterstation mit ähnlichen klimatischen Verhältnissen (unter Berücksichtigung von Höhenlage, Lee- oder Luvlage bei Gebirgen etc.) zurückzugreifen, wenn am Deponiestandort keine Messwerte zur Verfügung stehen. In der Betriebs- und Nachsorgephase sind die für die Erstellung der Wasserhaushaltsbilanz erforderlichen Messungen am Deponiestandort durchzuführen.

In der Bundesrepublik unterhält der Deutsche Wetterdienst ein engmaschiges Netz von Messstationen, deren Ergebnisse auszugsweise in meteorologischen Jahrbüchern und im Internet ([www.dwd.de](http://www.dwd.de)) veröffentlicht werden und die auf Datenträger gegen Entgelt beim DWD erhältlich sind. Die von HELP benötigten Größen können für alle Stationen Deutschlands bei folgenden Stellen bezogen werden:

- Tagesdaten des Niederschlags und der mittleren Lufttemperatur, Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit und der relativen Luftfeuchte:

Deutscher Wetterdienst, Geschäftsfeld Klima- und Umweltberatung  
Postfach 10 04 65, 63004 Offenbach; Tel.: 069/8062-2990

- Tagesdaten der Globalstrahlung:

Deutscher Wetterdienst, Klima- und Umweltberatung  
Postfach 65 01 50, 22361 Hamburg; Tel.: 040/60173-240

Die für das HELP-Modell erforderlichen Quartalsmittelwerte der relativen Luftfeuchte und der Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit sind aus den Tages- oder Monatsmittelwerten zu berechnen.

Im Standardformat des DWD vorliegende Tagesdaten können von der deutschen Anpassung des HELP-Modells eingelesen und in das benötigte Format konvertiert werden.

### 5.3 Bodenkennwerte

Benötigt werden Daten zur Wasserspeicherung und zum Porenvolumen (Gesamtporenvolumen, Feldkapazität und permanenter Welkepunkt [Vol./Vol.]) und die gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$  [cm/s]).

Mit Feldkapazität wird der Wassergehalt bezeichnet, den ein Boden unter Ausschluss der Verdunstung längerfristig gegen die Schwerkraft halten kann. Aus Gründen der einfachen Messbarkeit wird unter Feldkapazität konventionell im HELP-Modell, wie in den USA üblich, der Wassergehalt bei einer Wasserspannung von 330 hPa (pF 2,5) verstanden, in Deutschland dagegen der Wassergehalt bei 60 hPa (pF 1,8). Die Unterschiede zwischen beiden Werten liegen je nach Bodenart und Lagerungsdichte zwischen 2 Vol. % (Ton, mittlere Lagerungsdichte) und 8 Vol. % (Sand, geringe Lagerungsdichte), Werte zwischen 4 und 7 Vol. % kommen häufig vor. Der permanente Welkepunkt entspricht konventionell in den USA wie in Deutschland dem Wassergehalt bei 15.000 hPa (15 bar, pF 4,2).

Die Bodenkennwerte sind durch Eignungsprüfungen nach folgenden Verfahren zu bestimmen (siehe auch HARTGE/HORN, 1989):

- Wasserdurchlässigkeitsbeiwert: nach DIN 18130, Teil 1
- Porenanteil (Gesamtporenvolumen): rechnerische Ermittlung aus Trocken- und Korndichte nach DIN 18125, Teil 1 und DIN 18124
- Feldkapazität (bei 330 hPa) u. permanenter Welkepunkt: DIN 19683, Teil 5

Die deutsche Weiterentwicklung des HELP-Modells enthält zur Orientierung eine Datenbank mit typischen Kennwerten natürlicher Böden für die deutsche Bodenartenklassifikation (SCHROEDER/BERGER, 2002), die vorwiegend aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN, 1994) zusammengestellt wurden.

### 5.4 Pflanzenspezifische Parameter

In die Berechnung der tatsächlichen Evapotranspiration gehen zwei pflanzenspezifische Parameter ein: die Tiefe der Verdunstungszone und der maximale Blattflächenindex.

Die Tiefe der Verdunstungszone kennzeichnet den Bereich des Bodens, aus dem das Wasser durch Pflanzentranspiration und Bodenevaporation entzogen werden kann. Bei bewachsenen Flächen entspricht die Tiefe der Verdunstungszone der effektiven Durchwurzelungstiefe. Anhaltswerte für die effektive Durchwurzelungstiefe können der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN, 1994) entnommen werden.

Zur Berechnung der tatsächlichen Evaporation unbewachsener Flächen werden in der HELP-Dokumentation für die Tiefe der Verdunstungszone Anhaltswerte für unterschiedliche Böden gegeben.

Der maximale Blattflächenindex kennzeichnet et das Verhältnis von Blattflächen zur Bodenoberfläche und variiert in HELP von 0 (unbewachsene Fläche) bis 5,0 (ausgezeichneter Grasbewuchs), höhere Werte sind möglich. Anhaltswerte werden durch das Programm gegeben.

## **6 Mess- und Kontrollprogramm**

Eigenkontrollen des Deponiebetreibers sind während der Betriebsphase und in der Nachsorgephase der Deponie entsprechend den Anforderungen der TA Siedlungsabfall, 1993, sowie des Anhangs G der TA Abfall, 1991, durchzuführen. Der Wasserhaushalt des Oberflächenabdichtungssystems ist mit den Messwerten zu bilanzieren.

Bei der Verwendung des HELP-Modells zur Bilanzierung sind neben den Tageswerten für Niederschlag und Temperatur auch die Tagessummenwerte der Globalstrahlung zu bestimmen. Die mittlere relative Luftfeuchte in den vier Quartalen und die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe sind aus den täglichen Messungen zu berechnen.

Die Bodenkennwerte und pflanzenspezifischen Parameter sind an den Entwicklungsstand des Oberflächenabdichtungssystems anzupassen.

Die Ergebnisse der Wasserbilanzberechnungen sind unter den folgenden Aspekten auszuwerten (Monats- und Jahressummen, Tagesspitzenwerte, ausgeprägte Trocken- und Feuchtperioden):

- Vergleich der gemessenen/berechneten Werte des Oberflächenabflusses
- Vergleich der gemessenen/berechneten Werte des Dränabflusses (sofern möglich)
- Vergleich der berechneten und der aus Messdaten bestimmten Verdunstung
- Vergleich des prognostizierten (geplanten) und des tatsächlichen Wasserhaushalts
- Fortschreibung der Entwicklung des Wasserhaushalts

Die Resultate der Auswertung sind in Hinblick auf die Funktionsfähigkeit des Oberflächenabdichtungssystems (Wirkung der Rekultivierungsschicht, Sickerwasserbildung) zu interpretieren.

**Literatur zu E 2-30:**

- AG BODEN, 1994: Bodenkundliche Kartieranleitung, 4., verb. u. erw. Aufl., Hannover. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart
- BERGER, K., 1998: Validierung und Anpassung des Simulationsmodells HELP zur Berechnung des Wasserhaushalts von Deponien für deutsche Verhältnisse Schlussbericht, Umweltbundesamt, Fachgebiet III 3.6, Berlin
- BERGER, K., 2002a: Anwendung des HELP-Modells für die Simulation des Wasserhaushalts von Oberflächenabdichtungssystemen. In: Handbuch der Altlastensanierung, Kennzahl 5588, 30. Erg.-Lfg. 2. Aufl., August 2002
- BERGER, K., 2002b: Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell. Deutsche Version HELP 3.55 D. CD mit Programm und drei elektronischen Dokumentationen, Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg
- BERGER, K.; SOKOLLEK, V., 1997: Sind qualifizierte Abdeckungen von Altdeponien unter den gegebenen klimatischen Voraussetzungen der BRD sinnvoll bzw.möglich? In: EGLOFFSTEIN, TH.; BURKHARDT, G., (Hrsg.): Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 103, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- BLÜMEL, W.; MÜLLER-KIRCHENBAUER, A.; MARKWARDt, N., 2002: Lysimeteruntersuchungen zu Wasserdurchlässigkeit und –haushalt an Deponieabdichtungssystemen mit Bentonitmatten Geotechnik 25, Nr. 4
- BRONSTERT, A., 1994: Modellierung der Abflussbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Karlsruhe Schriftenreihe des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Heft 46, Universität Karlsruhe

- DUNGER, V., 2001: Modellierung des Wasserhaushaltes von Systemen zur Oberflächensicherung von Deponien mit dem Deponie- und Haldenwasserhaushaltsmodell BOWAHALD. In: EGLOFFSTEIN, T.; BURKHARDT, G.; CZURDA, K. (Hrsg.): Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2001. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 122, Erich Schmidt Verlag, Berlin, S. 179-211
- DUNGER, V., 2002: Dokumentation des Modells BOWAHALD zur Simulation des Wasserhaushaltes von wasserungesättigten Deponien/Halden und deren Sicherungssystemen. Institut für Geologie, TU Bergakademie Freiberg
- HARTGE, K.H.; HORN, R., 1989: Die physikalische Untersuchung von Böden. 2. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- HEIBROCK, G., 2000: Anwendung von Wasserhaushaltsmodellen bei dem Entwurf mineralischer Oberflächenabdichtungssysteme in: RAMKE, H.-G.; BERGER, K.; STIEF, K. (HRSG.), 2000: Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien und Altlasten – Anwendung des HELP-Modells und Gestaltung der Rekultivierungsschicht Fachtagung, Hamburg, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 47 Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg
- HEIBROCK, G., 2002: Modellierung des Austrocknungsverhaltens mineralischer Abdichtungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen mit dem Modell SUMMIT in: RAMKE, H.-G. ET AL. (HRSG.), 2002: Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 3 Fachhochschule Lippe und Höxter, Abteilung Höxter
- HOYNINGEN-HUENE, J. V., 1983: Die Interzeption des Niederschlags in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen in: DVWK, Schriften 57: Einfluss der Landnutzung auf den Gebietswasserhaushalt Paul Parey, Hamburg, Berlin

- HUDE, N. V. D., 2000: Anwendung des HELP-Modells bei der Dimensionierung von Kapillarsperren in: RAMKE, H.-G.; BERGER, K.; STIEF, K. (HRSG.), 2000: Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien und Altlasten – Anwendung des HELP-Modells und Gestaltung der Rekultivierungsschicht Fachtagung, Hamburg, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 47 Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg
- MARKWARDT, N., 1990: Der Bodenwasserhaushalt in Deponieabdeckschichten. Dissertation, Technische Universität Berlin
- MARKWART, N., 2000: Modellierung des Durchlässigkeitsverhaltens von bentonitmatten unter Berücksichtigung von Austrocknung und Wiedervernässung am Beispiel eines niederschlagsreichen Standorts in: RAMKE, H.-G.; BERGER, K.; STIEF, K. (HRSG.), 2000: Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien und Altlasten – Anwendung des HELP-Modells und Gestaltung der Rekultivierungsschicht Fachtagung, Hamburg, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 47 Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg
- MELCHIOR, S., 1993: Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdeckungssysteme für Deponien und Altlasten. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten 22, Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg
- RAMKE, H.-G., 2000: Anwendung des HELP-Modells bei der Dimensionierung von Einrichtungen zur Oberflächenwasserfassung und der Entwässerungsschicht in: RAMKE, H.-G.; BERGER, K.; STIEF, K. (HRSG.), 2000: Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien und Altlasten – Anwendung des HELP-Modells und Gestaltung der Rekultivierungsschicht Fachtagung, Hamburg, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, Band 47 Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg
- RAMKE, H.-G., 2002a: Oberflächenwassersammlung und –ableitung in: Handbuch der Müll- und Abfallbeseitigung, Kennziffer 4542 Erich Schmidt Verlag, Berlin

- RAMKE, H.-G., 2002b: Modellierung des Austrocknungsverhaltens mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen mit dem Modell HYDRUS-1D in: RAMKE, H.-G. ET AL. (HRSG.), 2002: Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 3 Fachhochschule Lippe und Höxter, Abteilung Höxter
- RAMKE, H.-G.; BERGER, K.; STIEF, K., (Hrsg.), 2000: Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien und Altlasten. Anwendung des HELP-Modells und Gestaltung der Rekultivierungsschicht Fachtagung, Hamburg, Hamburger Bodenkundliche Arbeiten 47 Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg
- RAMKE, H.-G.; GARTUNG, E.; HEIBROCK, G.; LÜKEWILLE, W.; MELCHIOR, S.; VIELHABER, B.; BOHNE, K.; MAIER-HARTH, U.; WITT, K. J., (HRSG.) 2002: Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen, Status-Workshop, Höxter Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 3 Fachhochschule Lippe und Höxter, Abteilung Höxter
- SCHROEDER, P.R.; AZIZ, N.M.; LLOYD, C.M.; ZAPPI, P.A., 1994a: The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: User's Guide for Version 3 EPA/600/R-94/168a, US EPA, Cincinnati, Ohio
- SCHROEDER, P.R.; DOZIER, T.S.; ZAPPI, P.A.; MCENROE, B.M.; SJOSTROM J.W.; PEYTON, R.L., 1994b: The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3 EPA/600/R-94/168b, US EPA, Cincinnati, Ohio
- SCHROEDER, P.R.; BERGER, K., 2002: Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell: Benutzerhandbuch für die deutsche Version 3. Unter Mitarbeit von AZIZ, N.M.; LLOYD, C.M.; ZAPPI, P.A. 3., vollst. überarb. Aufl. zur deutschen HELP-Version ab 3.55. Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg

- SIMUNEK, J.; VOGEL, T.; VAN GENUCHTEN, M.TH., 1994: The SWMS\_2D Code for Simulating Water Flow and Solute Transport in Two-Dimensional Variably Saturated Media, Version 1.2. Research Report 132, U.S. Salinity Laboratory, ARS, USDA, Riverside, California
- SOKOLLEK, V.; WEIGELT-MCGLONE, M., 1997: Der Wasserhaushalt eines großflächigen Oberflächenabdecksystems – Fallbeispiel Deponie Georgswerder (Hamburg). In: Handbuch der Altlastensanierung, Kennzahl 5584, 6. Ergänzungslieferung, 2. Auflage
- VAN DAM, J.C., J. HUYGEN, J.G. WESSELING, R.A. FEDDES, P. KABAT, P.E.V. VAN WALSUM, P. GROENENDIJK, C.A. VAN DIEPEN, 1997. SWAP version 2.0. Theory. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water- Air-Plant environment. Technical Document 45, DLO Winand Staring Centre, Wageningen. Report 71, Department Water Resources, Wageningen Agricultural University
- WESSOLEK, G.; KÖNIG, R.; STOFFREGEN, H., 2002: Einfluss von Exposition und Inklination auf die reale Evapotranspiration und Tiefenversickerung aus Deponie-Rekultivierungsschichten. in: RAMKE, H.-G. ET AL. (HRSG.), 2002: Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Band 3 Fachhochschule Lippe und Höxter, Abteilung Höxter

### Regelwerke:

- ATV-ARBEITSBERICHT DER ARBEITSGRUPPE 1.2.6 (HYDROLOGIE DER STADTENTWÄSSERUNG), 1986: Die Berechnung des Oberflächenabflusses in Kanalnetzmodellen, Teil 1: Abflussbildung, Korrespondenz Abwasser, 33. Jahrgang
- ATV-ARBEITSBERICHT DER ARBEITSGRUPPE 1.2.6 (HYDROLOGIE DER STADTENTWÄSSERUNG), 1987: Die Berechnung des Oberflächenabflusses in Kanalnetzmodellen, Teil 2: Abflusskonzentration, Korrespondenz Abwasser, 34. Jahrgang

- ATV-ARBEITSBLATT A 118, 1998: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen Abwassertechnische Vereinigung (ATV), St. Augustin
- ATV-MERKBLATT M 165, 1994: Anforderungen an Niederschlag-Abfluss-Berechnungen in der Stadtentwässerung Abwassertechnische Vereinigung (ATV), St. Augustin
- DIN 4049-3, 1994: Hydrologie - Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie
- DIN 18124, 1997: Baugrund; Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korndichte - Kapillarpyknometer, Weithalspyknometer
- DIN 18125-1, 1986: Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung der Dichte des Bodens - Teil 1: Laborversuche
- DIN 18130-1, 1989: Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte - Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes - Teil 1: Laborversuche
- DIN 19683-5, 1973: Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau; Physikalische Laboruntersuchungen - Teil 5: Bestimmung der Saugspannung des Bodenwassers
- DIN 19685, 1997: Klimatologische Standortuntersuchung. Ermittlung der meteorologischen Größen
- DIN 19687, 1998: Berechnung der Sickerwasserrate aus dem Boden
- DVWK-MERKBLATT 238, 1996: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Bonn
- DVWK-REGELN ZUR WASSERWIRTSCHAFT 112, 1982: Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil I: Analyse. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Bonn

- DVWK-REGELN ZUR WASSERWIRTSCHAFT 113, 1984: Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil II: Synthese. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Bonn
- GDA-EMPFEHLUNG E 2-4, 1997: Kombiniertes Oberflächenabdichtungssystem, GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage. Deutsche Geotechnische Gesellschaft e.V. (DGGT), Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- GDA-EMPFEHLUNG E 2-14, 1997: Basis-Entwässerung von Siedlungsabfalldeponien, GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage Deutsche Geotechnische Gesellschaft e.V. (DGGT), Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- GDA-EMPFEHLUNG E 2-20, 1997: Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen, GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage Deutsche Geotechnische Gesellschaft e.V. (DGGT), Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- GDA-EMPFEHLUNG E 2-31, 2000: Rekultivierungsschichten. Bautechnik 77 (2000), Heft 9, S. 617-626
- GDA-EMPFEHLUNG E 2-32, 2000: Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien. Bautechnik 77 (2000), H. 9, S. 627-629
- TA ABFALL, 1991: Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen, 12. März 1991 (GMBI. S. 139, ber. S. 469).
- TA SIEDLUNGSABFALL, 1993: Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Vermeidung, Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen, 14. Mai 1993 (BAnz. Nr. 99a).

**Bezugsquellen:** (Internet-Adressen, Stand: Juli 2002)

HELP: Originalversion:

<http://www.wes.army.mil/el/elmodels/index.html#landfill>

HELP: Deutsche Weiterentwicklung:

<http://www.geowiss.uni-hamburg.de/i-boden/fsimhelp.htm>

Visual HELP:

<http://www.flowpath.com/software/visualhelp/visualhelp.html>

BOWAHALD:

<http://www.geo.tu-freiberg.de/~dungerv/software/bowahald.html>

ECOBAS: Modelldatenbank (REM) der Universität Kassel und der GSF:

<http://dino.wiz.uni-kassel.de/ecobas.html>