

Simulation von Wasserhaushalt und Stofftransport in Rekultivierungsschichten bei Oberflächenabdichtung von Deponien mittels SiWaPro DSS

Gräber, P.-W.¹; (Technische Universität Dresden)

Euler, B.², Kemmesies, O.³ (KP Ingenieures. für Wasser und Boden mbH)

Abstract: Die modellgestützte Optimierung von Deponieabdecksystemen ist zwischenzeitlich Stand der Technik. In der Regel werden dabei Wasserhaushaltsbetrachtungen durchgeführt, die im Wesentlichen auf bewährten empirischen Modellansätzen beruhen. Für Deutschland typische Programme sind hierbei HELP und BOWAHALD. Jedoch sind diese empirischen Modelle augenscheinlich mit Anwendungsgrenzen behaftet. Sie können zwar realitätsnahe Wasserbilanzierungen von regulären Oberflächenabdichtungen relativ gut berechnen, jedoch bei der Nachbildung der Strömungsprozesse im Inneren des Abdichtungssystems sowie im Inneren der Deponie erreichen sie ihre Anwendungsgrenzen. Diese Prozesse können aber mit einem deterministischen Ansatz auf der Basis der RICHARD'S-Gleichung beschrieben werden. Ein solcher Ansatz liegt dem Programm SiWaPro DSS, das im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunktes „Sickerwasserprognose“ entwickelt wurde, zugrunde. Mit dem kombinierten Einsatz solcher Modellwerkzeuge eröffnet sich nun die Möglichkeit, die bekannten Anwendungsgrenzen der Wasserhaushaltsmodelle zu überwinden und künftig so auch Kapillarsperren zu betrachten und somit in die Optimierung der Abdecksysteme einzubeziehen. Die Vorgehensweise wird an einem praktischen Beispiel einer Erdaushubdeponie in Norwegen demonstriert.

1 Einleitung

Die modellgestützte Optimierung von Deponieabdecksystemen ist zwischenzeitlich Stand der Technik. Damit lassen sich einfach und kostengünstig Wirksamkeitsanalysen zu verschiedenen Abdecksystemen sowie deren Optimierung durchführen. Die Modellierungsergebnisse dienen somit auch als Entscheidungshilfen bei der Ausführung. Der im Titel erwähnte Begriff „Rekultivierungsschichten“ wird hier im weiteren Sinne gebraucht. Im engeren Sinn besitzen Rekultivierungsschichten drei Funktionen:

1. sie dienen als Pflanzenstandort,
2. sie maximieren die Evapotranspiration,
3. sie verringern die Dränspende und
4. sie schützen die darunterliegenden Schichten des Oberflächenabdichtungssystems [6].

Hier wird der Begriff „Rekultivierungsschicht“ als Oberbegriff für alle Schichten eines Oberflächenabdichtungssystems (Rekultivierungsschicht, Entwässerungsschicht, Abdichtungsschicht und Ausgleichsschicht) gebraucht.

¹, Pratzschwitzer Str. 15, D-01796 Pirna, Tel: +49/(0)3501/530029, Peter-Wolfgang.Graeber@tu-dresden.de

², Bahnhofstr. 37, D-91710 Gunzenhausen, Tel +49/(0)9831 886011, Oliver.Kemmesies@ibwabo.de

³, Bahnhofstr. 37, D-91710 Gunzenhausen, Tel +49/(0)9831 886013, B.Euler@ibwabo.de

2 Klassische Wasserhaushaltsbilanzierung

Modellierung mit HELP 3.80 D und BOWAHALD

Im Allgemeinen werden Modelle, die auf empirischen Ansätzen beruhen zur Wasserhaushaltsbilanzierung von Deponien, eingesetzt. Die in Deutschland verbreitetsten Deponiewasserhaushaltsmodelle sind das auf deutsche Verhältnisse angepasste HELP 3.80 D aus der USA und BOWAHALD [3]. Das Programm HELP 3.80D wurde durch die U.S Environmental Protection Agency (EPA) unter Führung von P. SCHROEDER entwickelt. Es ist mit Abstand das am häufigsten eingesetzte Deponiewasserhaushaltsmodell in Deutschland und wurde für offene sowie geschlossene Deponien entwickelt [4]. HELP 3.80 D als auch BOWAHALD sind beide quasi zweidimensionale Schichten- oder Kaskadenmodelle. Sie dienen hauptsächlich der Modellierung des Wasserhaushalts von Oberflächenabdichtungssystemen und nicht den wasserhaushaltlichen Prozessen, die innerhalb einer Deponie ablaufen [3]. Bei BOWAHALD wird der gesamte Versickerungsvorgang innerhalb einer Deponie unabhängig von dem Schichttyp als gesättigte Pfropfenströmung angenähert dargestellt. Diese Pfropfenströmung wird mittels der Kontinuitätsgleichung und einem von Darcy abgeleiteten Algorithmus beschrieben. Bei einer betrachteten Deponieschicht mit einer Bodenfeuchte im Bereich der Feldkapazität ist die Größe der einsickernden Wassermenge der ausgehenden Wassermenge gleich [3]. Bei HELP 3.80 D erfolgt eine Ermittlung des Versickerungsvorgangs abhängig vom Schichttyp. Die Berechnung des Flusses in einer Dichtschicht erfolgt über das DARCY-Gesetz, unter der Annahme das stets wassergesättigte Bedingungen vorliegen. Die Berechnung des gesättigten Dränschichtabflusses basiert auf einer modifizierten Gleichung nach BOUSSINESQ [4]. Die ungesättigte Strömung in den restlichen Schichten wird über die DARCY-BUCKINGHAM-Gleichung in Kombination mit dem Kontinuitätsgesetz und dem BROOK-COREY-BURDINE-Modell beschrieben. Bei HELP 3.80 D sowie bei BOWAHALD wird der Oberflächenabfluss über das SCS-curve-number-Verfahren modelliert. Dieses Verfahren wurde durch den US Soil Conversation Service entwickelt und ist eine effiziente und einfache Methode. Es stützt sich auf die Parameter Infiltrationsrate, Landnutzung/Vegetation, Bodenfeuchte und Neigungseigenschaften der Oberfläche [3] (Tabelle 1).

Tabelle 1. Vergleich von BOWAHALD und HELP 3.80D [3]

Prozess	HELP 3.80 D	BOWAHALD
Interzeption	Interzeptions-Speichermodell unter Einbeziehung der Biomasse	Interzeptions-Speichermodell für verschiedene Arten von Bewuchs und Vegetationsbedeckungsgrade
Infiltration/ Oberflächenabfluss	curve-number-Verfahren	curve-number-Verfahren
Versickerung	DARCY-Gesetz für gesättigte/ ungesättigte Bedingungen	DARCY-Gesetz für gesättigte Bedingungen
Evapotranspiration	Potenzielle Verdunstung nach PENMAN Reale Verdunstung basierend auf Reduktionsfunktionen abhängig von der Bodenfeuchte und von dem Blattflächenindex	Potenzielle Verdunstung nach PENMAN, TURC, HAUDE, IVANOV Reale Verdunstung basierend auf Reduktionsfunktionen abhängig von der Bodenfeuchte und dem Vegetationsbedeckungsgrad

Beide Programme unterliegen jedoch folgenden Anwendungsgrenzen bzw. Beschränkungen [3]:

- Die ungesättigte Strömung wird bei HELP 3.80 D ausschließlich von der Gravitation angetrieben, Kapillarkräfte werden nicht berücksichtigt [4].
- Eine Betrachtung/Einschätzung/Bewertung von Kapillarsperren kann nicht erfolgen.
- Eine Bemessung bei Starkregenfall von Entwässerungseinrichtungen ist kaum möglich.
- Beide Modelle sind quasi zweidimensional und können somit einen heterogenen Deponieaufbau nur schlecht wiedergeben.
- Es wird nur Wasserströmung in der Matrix betrachtet, nicht aber die Strömung in Sekundärporen (Risse, Wurzelröhren etc.).
- Wasserströmungsprozesse im Inneren der Deponie können kaum oder gar nicht berücksichtigt werden [4].
- Beide Modelle sind nur bedingt geeignet für die Modellierung von Basisabdichtungssystemen bzw. Nichtoberflächenabdichtungssystemen [4].

3 Betrachtung der Strömungsprozesse zur Wasserhaushaltsbilanzierung

Grundlagen

Die deterministische Beschreibung der Strömungsprozesse in der gesättigten sowie ungesättigten Zone erfolgt auf der Grundlage der RICHARD's-Gleichung (Gl. 1a+b). Ihre Lösung erfolgt im verwendeten SiWaPro DSS unter Verwendung der Finite-Element-Methode [10]. Für die Erstellung des triangulären FE-Berechnungsnetzes wird ein Netzgenerator eingesetzt, der unstrukturierte Netze, flexible Diskretisierungsschrittweiten und unregelmäßige Netzränder berücksichtigen kann. Zukünftig soll optional eine adaptive Netzanpassung während eines Simulationslaufes erfolgen können [7]. Die RICHARD's-Gleichung stellt den Zusammenhang zwischen einem Wasserfluss, verursacht durch einen Potentialgradienten, und der Veränderung des Wassergehalts eines Bodenvolumens in der Zeiteinheit dar. Die abhängigen Variablen sind dabei die Druckhöhe h_p , der Wassergehalt θ und der Senkenterm w_0 .

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k(\theta) \cdot \left(\frac{\partial h_p}{\partial r} + 1 \right) \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} - w_0 \quad (1a)$$

und

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(h_c) \cdot \frac{\partial h_p}{\partial t} \quad (1b)$$

Die Zeit t und die räumlichen Koordinaten $r(x,y,z)$ stellen die unabhängigen Variablen dar. Die Funktion der Speicherkapazität $C(h_c)$ ist die erste Ableitung der hysteresen Retentionsfunktion $\theta_w=f(h_c)$. Die Funktion der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit $k(\theta_w)$ ist abhängig vom Wassergehalt θ_w des Bodens.

Parameter Funktionen

1.1.1 Retentionskurve

In der RICHARD's-Gleichung sind die Funktion der Speicherkapazität und die Funktion der hydraulischen Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt implementiert. Es handelt sich dabei um „VAN-GENUCHTEN-Parameter“- Funktionen, benannt nach dem zugrunde liegenden Modell. Im Programm liegen diese Parameterfunktionen modifiziert nach VAN GENUCHTEN [16] und LUCKNER et al. [11] vor. Sie berücksichtigen neben dem Lufteinschluss auch die Hysterese, d.h. die Richtungsabhängigkeit der Retentionsfunktion bei der Be- und Entwässerung des Bodens, die bei Bedarf in die Betrachtungen einbezogen werden kann. In der Retentionsfunktion ist die Saugspannung h_c dem jeweils dazu gehörigen Wassergehalt θ gegenüber gestellt (2a+b).

$$\theta_w = A + \frac{\phi - A - B}{\left[1 + (\alpha \cdot h_c)^n\right]^{\frac{1}{n}}} \quad h_c > 0 \quad (2a)$$

und

$$\theta_w = \phi - B \quad h_c \leq 0 \quad (2b)$$

Die Variablen der Gleichungen 2a und 2b sind die Porosität ϕ , der residuale Wassergehalt $\theta_{w,r}$, der residuale Luftgehalt $\theta_{A,r}$, der Skalierungsfaktor α und der Anstiegsparemeter n . Um verschiedene Kurven zu beschreiben, wurde die Variable A als Funktion des residualen Wassergehaltes $A=A(\theta_{w,r})$, die Variable B als Funktion des residualen Luftgehaltes $B = B(\theta_{A,r})$ und die Skalierungsfaktoren α^d und α^i für Drainage und Imbibition eingeführt. Wobei auf eine Berücksichtigung von α^d und α^i in der Gleichung 2 an dieser Stelle verzichtet wurde.

1.1.2 Relative hydraulische Durchlässigkeit

Die Funktion für die relative hydraulische Durchlässigkeit wurde von MUALEM [12] und LUCKNER et al. [11] mit folgenden Variablen ermittelt (Gl. 3): Die hydraulische Durchlässigkeit k_0 (θ_0) bei einem bestimmten Grad der Wassermobilität $\bar{S}_0 = (\theta_0 - \theta_{w,r0}) / (\phi - \theta_{w,r0})$, der Maßstabsfaktor λ und der Transformationsfaktor m .

$$k(\theta) = k_0 \cdot \left(\frac{\bar{S}}{\bar{S}_0}\right)^\lambda \cdot \left[\frac{1 - \left(1 - \bar{S}^{\frac{1}{m}}\right)^m}{1 - \left(1 - \bar{S}_0^{\frac{1}{m}}\right)^m} \right]^2 \quad (3)$$

4 Modellierungsbeispiel: Erdaushubdeponie in Norwegen

Zur Optimierung des Wasserhaushaltes von der Oberflächenabdeckung einer Deponie aus Kristiansand/Grimstad (Süd-Norwegen) wurden Modellierungen mit den Programmen BOWAHALD, HELP 3.80 D und SiWaPro DSS durchgeführt. Bei dem betrachteten Deponieablagerungen handelt es sich um Ausbruchmaterial von Straßenbauarbeiten. Das ausgebrochene Material setzt sich aus sulfidhaltigen Gestein zusammen und wurde direkt auf dem Festgestein (Gneis) in Tälern und Mooren abgelagert. Auf die Deponieablagerung mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von rund 10^{-3} m/s sollte eine Rekultivierungsschicht mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von ca. 10^{-4} m/s zur Verminderung der Infiltrationsrate des Regenwassers aufgebracht werden. Aus diesem Grund wurden verschiedene Schichtmächtigkeiten (10...30 cm) und Neigungswinkel (8...30°) der künftigen Deponieoberfläche simuliert, um die optimale Anordnung zu ermitteln. Im Folgenden soll gezeigt werden, zu welchen Aussagen und Ergebnissen die unterschiedlichen Modellansätze führen.

Modellierung mit HELP 3.80 D und BOWAHALD

Die Generierung der benötigten Zeitreihen für den Niederschlag und die Globalstrahlung erfolgte mit dem Wettergenerator aus dem Programm SiWaPro DSS [13]. Nach Eingabe der generierten Zeitreihen von Niederschlag, Globalstrahlung und Temperatur, sowie den Bodenparametern und den Eigenschaften des Deponieaufbaus wurden die in Tabelle. 2 aufgelisteten Werte für die Wasserhaushaltsgrößen durch HELP 3.80 D und BOWAHALD berechnet.

Tabelle. 2. Wasserhaushaltsgrößen nach HELP 3.80D und BOWAHALD

Modell	Niederschlag mm/a	Tatsächliche Evapotranspiration mm/a	Sickerwasser mm/a	Oberflächenabfluss mm/a
HELP 3.80 D	1366	292	1063	11
BOWAHALD	1365	303-339	1026-1062	0

Mit diesen Ergebnissen kann nur die Aussage getroffen werden, dass kaum Oberflächenabfluss entsteht. Der gesamte Niederschlag wird fast vollständig zu Sickerwasser, obgleich verschiedene Neigungswinkel und Schichtdicken untersucht wurden. Wie zu erwarten, besitzt die Rekultivierungsschicht im herkömmlichen Sinn keine abdichtende Funktion. Weitere Aussagen auf der Basis dieser Ergebnisse sind nicht möglich.

Modellierung mit SiWaPro DSS

Mit dem Programm SiWaPro DSS wurden neben der Ermittlung der Wasserhaushaltsgrößen, Stark-Regenereignisse simuliert und ein möglicher Kapillarsperren-Effekt untersucht. Das Auftreten des Kapillarsperren-Effektes ist prinzipiell durch die günstigen Eigenschaften der Deponie-Füllung und der Rekultivierungsschicht möglich (Abbildung 1).

Nimmt man eine Saugspannung von 2 m an, so ergibt sich für die Rekultivierungsschicht ein Wassergehalt von $\theta_w \approx 0,11$ und für die Deponie-Füllung (Deponiekörper, Ausbruchmaterial) von $\theta_w \approx 0,014$. Die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist hochgradig abhängig vom Wassergehalt der Schicht. Auf Grund des geringeren Wassergehalts der Deponie-Füllung sinkt die hydraulische Durchlässigkeit dieser Schicht unter den Wert der hydraulischen Durchlässigkeit der Rekultivierungsschicht. Es entsteht ein Kapillarschicht-Kapillarblock-System, wobei die Rekultivierungsschicht die feinere Kapillarschicht und die Deponie-Füllung den größeren Kapillarblock darstellt. Das infiltrierende Regenwasser fließt innerhalb der feinkörnigeren Rekultivierungsschicht unter ungesättigten Bedingungen parallel entlang der Schichtgrenze ab.

Mit SiWaPro DSS wurde zunächst ein Starkregenereignis simuliert, das in der 1. Simulation auf eine Rekultivierungsschicht mit einem Restwassergehalt und in der 2. Simulation auf eine Rekultivierungsschicht mit einer gewissen Vorfeuchte trifft (Tabelle 3). Die Vorfeuchte ist durch ein vorhergegangenes Regenereignis verursacht. Die dabei ermittelten Wasserhaushaltsgrößen, sind in Tabelle 4 dargestellt.

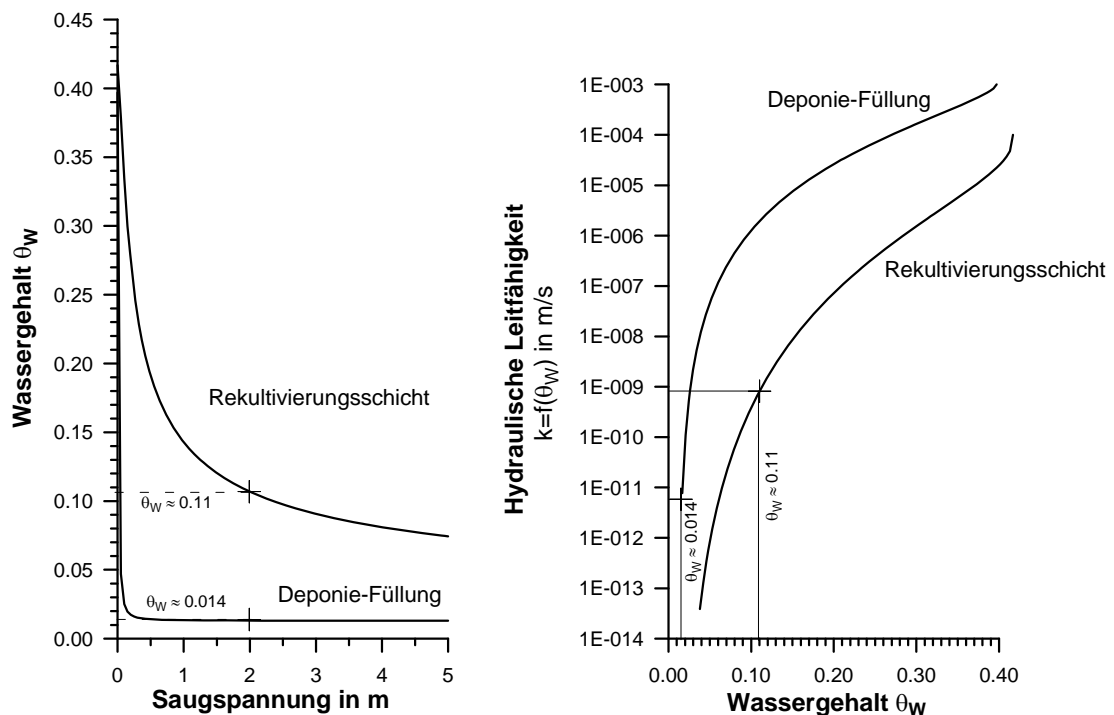


Abbildung 1. Hydraulische Funktionen der Abdeckschichten

Tabelle 3. Simulation eines Starkregenereignisses mit SiWaPro DSS

Simulation	Niederschlagsereignis	Berechnungszeit
		d
1(ohne Vorfeuchte)	Erster Tag: $h_N(24,100) = 127 \text{ mm/d}$	2
2(mit Vorfeuchte)	Erster Tag: $h_N(24,1) = 60 \text{ mm/d}$ Zweiter Tag: $h_N(24,100) = 127 \text{ mm/d}$	10

Tabelle 4. Berechnete Wasserhaushaltsgrößen während eines Starkregenereignisses mit SiWaPro DSS

Simulation	Niederschlag	Tatsächliche Evapotranspiration	Sickerwasser	Oberflächenabfluss
	mm/d	mm/d	mm/d	mm/d
1	127	1,34	1,07	0,0
2	127	1,34	1,73	0,2

Die Ergebnisse von SiWaPro DSS sind vergleichbar mit den Ergebnissen von HELP 3.80 D und BOWAHALD. Der Oberflächenabfluss der Deponie mit Rekultivierungsschicht ist vernachlässigend gering gegenüber der Sickerwassermenge. Mit SiWaPro DSS kann außerdem die Sickerwassermenge an der Basis abschnittsweise betrachtet werden. So konnte festgestellt werden, dass nach 2 Berechnungstagen ca. 95% des Sickerwasser an der Basis der Sohle auf den letzten ca.13 m der Deponie abströmen (Abbildung 2).

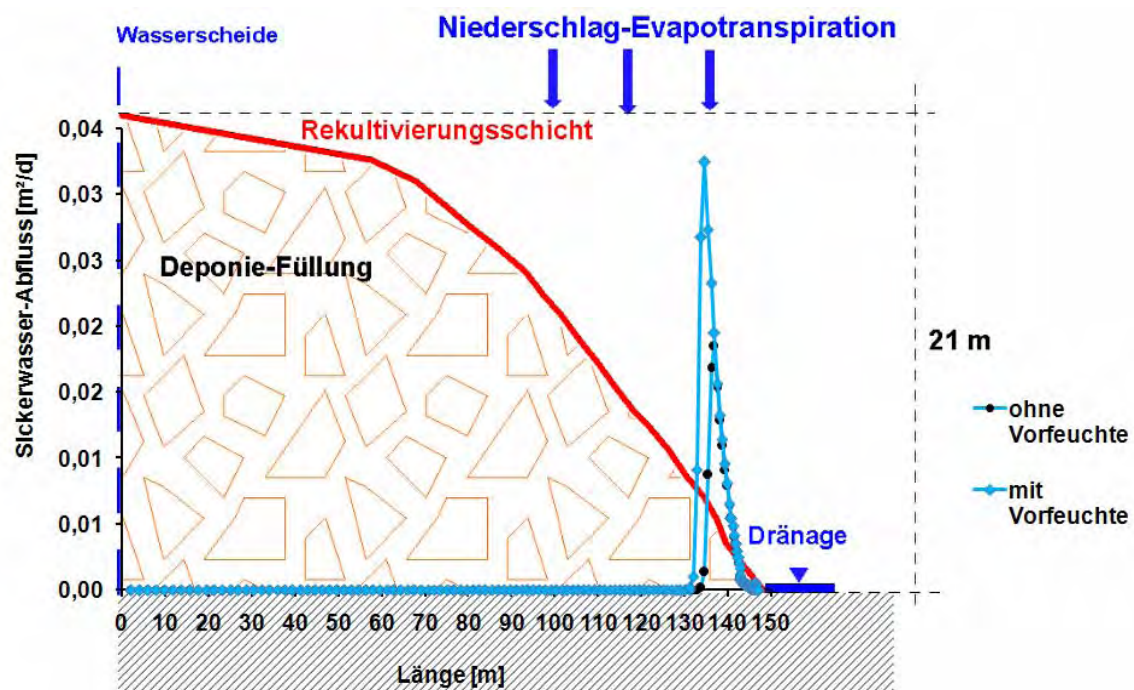


Abbildung 2. Sickerwasserverteilung an der Basis der Deponie

Zusätzlich wurde mit dem Programm die Simulation einer Stark-Niederschlagszeitreihe die zum HW_{100} führt, durchgeführt. Im Zeitraffer ist hierbei deutlich zu sehen, dass zunächst ein Kapillarsperreneffekt tatsächlich auftritt. Erst nach Überschreiten der lateralen Dränkapazität bricht das Wasser in den Kapillarblock ein (Abbildung 3). Die fingerartigen Wasserdurchbrüche durch die Rekultivierungsschicht deuten zudem auf einen deutlichen Einfluss der Geländeneigung hin.

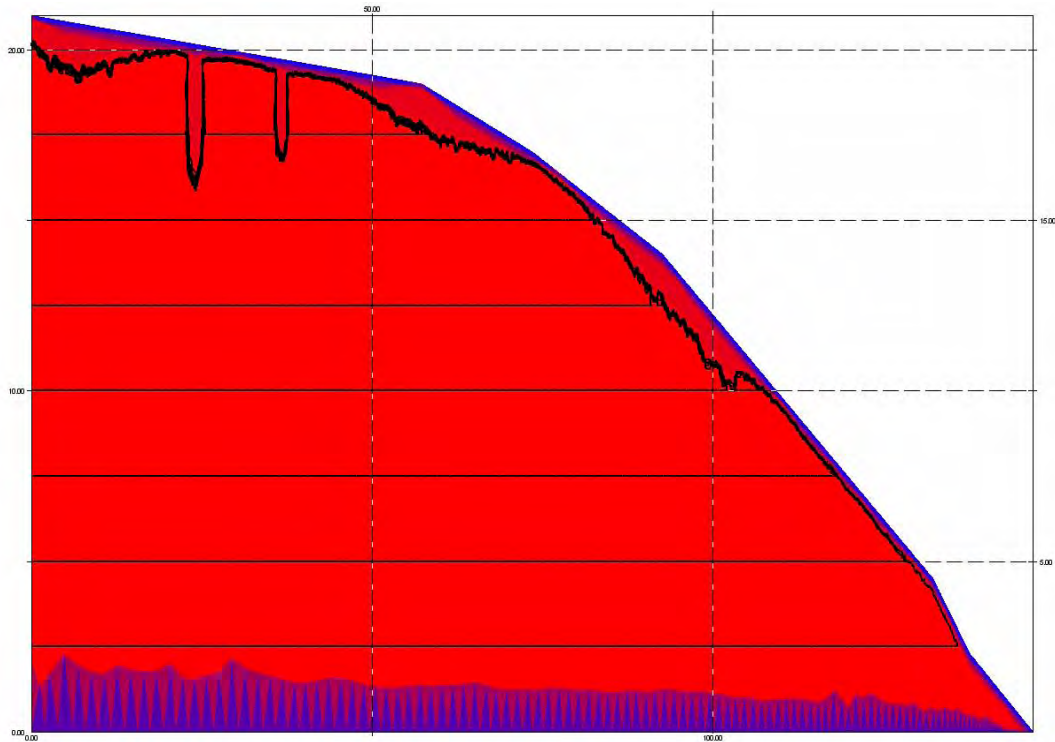


Abbildung 3. Simulation des Versagens der Kapillarschicht (Simulationszeitpunkt $t = 25$ d)

5 Modellierungsbeispiel: Kapillarsperre

Ausschlaggebend für die Genehmigung von Kapillarsperren als Abdeckungssystem von Deponien ist deren Wasserhaushalt bzw. deren max. vertikale Durchsickerung. Diese wird bestimmt durch die verwendeten Materialien, deren Einbauweise, der Neigung sowie der technischen Randbedingungen, wie z.B. die Lage der Dränagen etc. Deshalb muss im Vorfeld bzw. in der Planungsphase die Eignung der geplanten Kapillarsperre nachgewiesen werden. Dies erfolgt i.d.R. über Kipprinnenversuche und Testfelder (GDA Empfehlung 2-33).

Grundsätzlich besteht aber dabei das Problem, dass für die letztendlich zu errichtende Abdeckung eine Wasserhaushaltsbetrachtung durchzuführen ist. Die derzeit standardmäßig dazu eingesetzten Programme, wie z.B. HELP, BOWAHALD können aber nur Regelabdeckungen beschreiben, nicht aber Kapillarsperren. Dies liegt im empirischen Charakter der eingesetzten Wasserhaushaltsmodelle begründet (GDA Empfehlung 2-30). Um auch den Wasserhaushalt von Kapillarsperren betrachten optimieren zu können, bedarf es einer deterministischen Beschreibung der Strömungsprozesse in der ungesättigten Zone und somit auch der Ermittlung der bodenhydraulischen bzw. van-Genuchten-Parameter.

Während für normale Böden hierzu bereits gesicherte Angaben (z.B. in der DIN 4220) vorliegen, fehlen verlässliche Parameterschätzungen für die immer mehr zum Einsatz kommenden Ersatzbaustoffe in Deponieabdeckungen fast völlig. Diese lassen sich aber durch Inverse Modellierung von Kipprinnenversuchen, bei denen neben den Volumenströmen auch die Druckhöhe und der Wassergehalt in den beiden Schichten gemessen werden, ermitteln.

Ziele der vorliegenden Simulationsläufe mittels des Programms SiWaPro DSS waren:

- die Optimierung der Versuchsdurchführung durch eine Prognose der zu erwartenden max. Dränkapazität (Reduzierung der Zulaufstufen)

- Ermittlung der hydraulischen Parameter der eingesetzten Ersatzbaustoffe zum Aufbau einer Parameterdatenbank durch Inverse Modellierung (Parameteridentifikation)
- Optimierung des künftigen Versuchsfeldes und dessen Monitoringprogramms
- Prognose des Feldversuches

Modellierung des Kipprinnenversuch

Die Kipprinne hat eine Länge von 6 m und eine Neigung von etwa 16°. In der Kipprinne liegt Sand als Kapillarschichtmaterial und Kies als Kapillarblockmaterial. Der Sand hat eine Höhe von 35 cm und der Kies von 30 cm. 30 cm vor dem Ende der Rinne ist ein Prallblech eingebaut.

Der geometrische Aufbau des Modells richtete sich nach der Konstruktion der Kipprinne. Es wurden die Länge und Neigung der Kipprinne und die Schichthöhen der Materialien berücksichtigt. Der Zulauf wurde durch eine Randbedingung 2. Art (interne Nummer -4), d.h. eine vorgegeben Durchfluss und der Ablauf durch eine Randbedingung 1. Art mit der Nebenbedingung $h_p = \text{const} = -10 \text{ cm}$ (interne Nummer 7) nachgebildet.

Die hydraulische Leitfähigkeit in der ungesättigten Bodenzone ist abhängig vom Wassergehalt und wird im Programm SiWaPro DSS durch die Funktion von Luckner et al. (1989) basierend auf Mualem [12] und van Genuchten [16] berechnet (vgl. Gl. 2). In der Tabelle 5 sind die van Genuchten Parameter der ersten Modellrechnung dargestellt.

Tabelle 5: van Genuchten Parameter der ersten Modellrechnung

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Kapillarschicht	Kapillarblock
Porosität	ϕ		0,4	0,3
Restwassergehalt	θ		0,04	0,01
Masstabsfaktor	α	1/cm	0,03	1
Anstiegsfaktor	n		4	3
Transformationsparameter	$m=1-1/n$		0,75	0,667
Tortuositätsfaktor	λ		0,5	0,5
Durchlässigkeitsbeiwert	k_f	cm/h	38	6600

In Abbildung 4 sind die Retentionskurven und die Funktionen der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit dargestellt, die mit den in Tabelle angegebenen Parametern berechnet wurden. Die erste Zulaufstufe von 30 l/d entspricht der ersten Zulauftrate im Modell von $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$ bezogen auf die Breite der Kipprinne ($B = 60 \text{ cm}$) und die Länge der Zulaufschale ($L = 25 \text{ cm}$).

Mit der Tabelle 5 angegebenen ersten Parameterschätzung wurde die numerische Simulation des Experimentes durchgeführt. Die Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den berechneten Werten ist bereits erstaunlich gut und zeigt, dass die Parameterschätzung in weiten Teilen zutrifft.

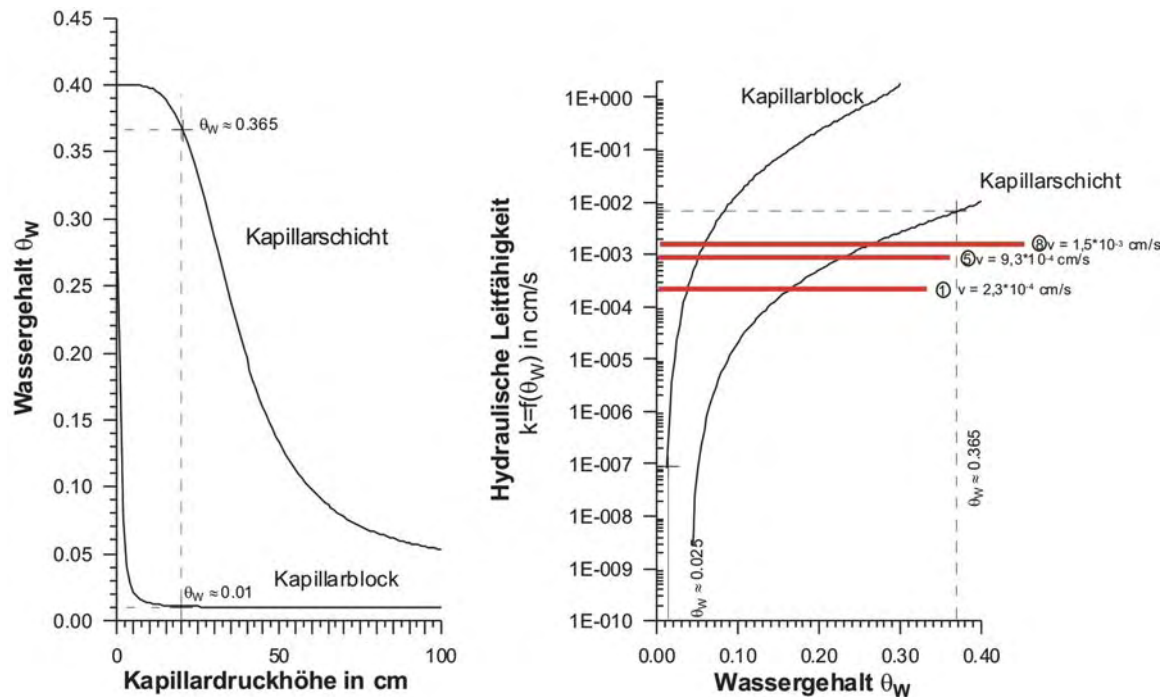


Abbildung 4: Retentionskurve und Funktion der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, berechnet mit den in Tabelle 5 angegebenen Parametern

Abbildung 5 zeigt die Verteilung des Wassergehaltes in der Kapillarsperre bzw. Kiprinne zum nach ca. 1 Monat. An der Grenze zum Kapillarblock ist der Wassergehalt in der Kapillarschicht sehr hoch. Der Wasserfluss erfolgt entlang der Grenzschicht mit dem Gefälle in die Richtung des Grobkieses.

Die Simulation des Kiprinnenversuches mit dem Programm SiWaPro DSS zeigt, dass eine Nachbildung des Versuches mit dem Programm möglich ist. Einen wesentlichen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben dabei die von Genuchten Parameter der verwendeten Bodenmaterialien. Diese können bereits nach wenige Stufen des Zuflusses an Hand der gemessenen Ausflüsse ermittelt werden. Dadurch kann der Zufluss bei dem Wasser in den Kapillarblock eindringt bereits vorher abgeschätzt werden und die Versuchszeit wesentlich verkürzt werden.

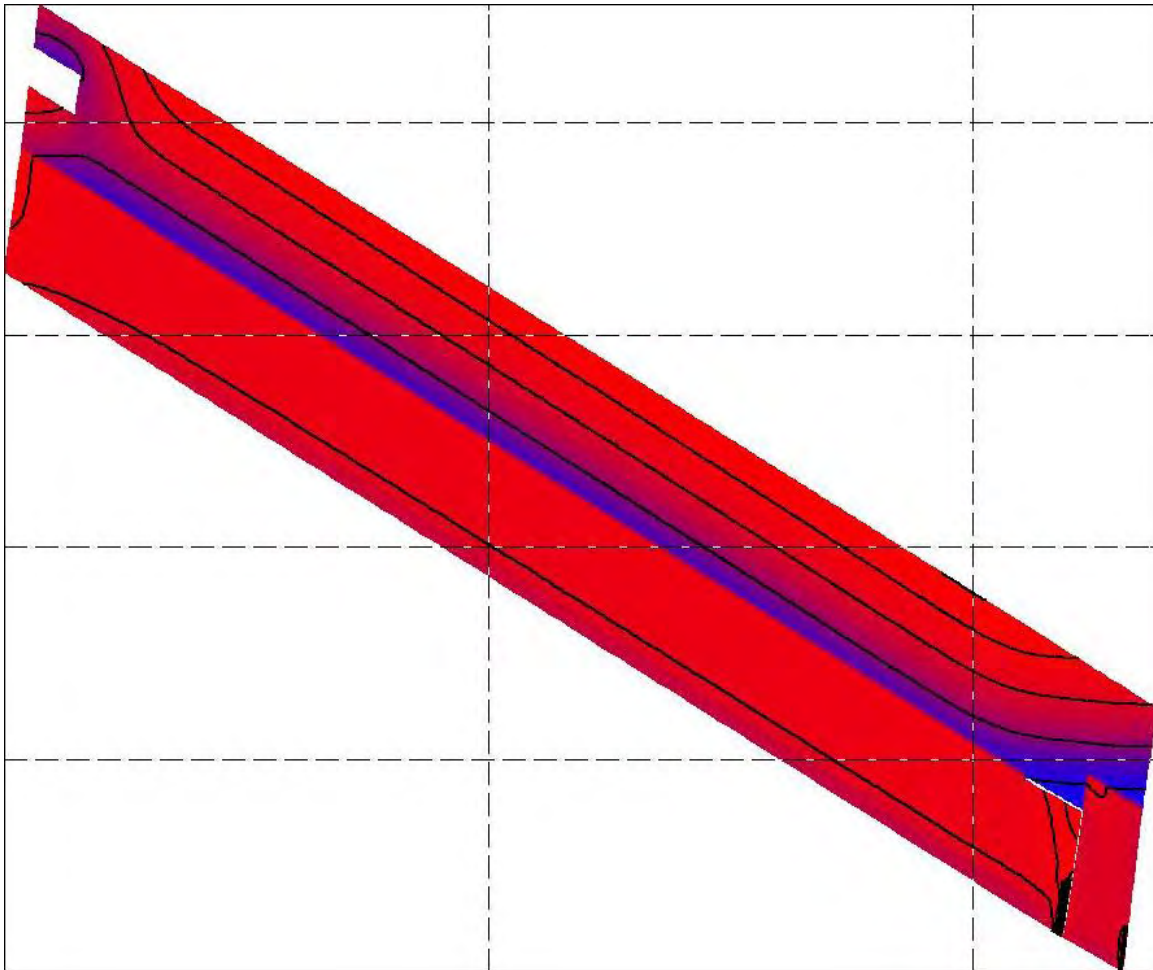


Abbildung 5: Graphische Ausgabe bei Modellrechnung (geringer Wassergehalt = rot und hohe Wassergehalte = blau)

6 Fazit und Empfehlungen

Die eingesetzten Programme HELP 3.80 D und BOWAHALD zur Modellierung des Wasserhaushaltes von Deponienabdeckungssystemen haben sich in der Vergangenheit bewährt und erzielen in den meisten Fällen solide, realitätsnahe Ergebnisse für reguläre und einfach strukturierte Oberflächenabdichtungssysteme. Bei der Modell-Anwendung auf Basisabdichtungen oder der Betrachtung der Strömungsprozesse im Inneren der Deponie oder der Deponieabdeckung, in Hinsicht z.B. auf eine Kapillarsperre, versagen sie. Hier ist der Einsatz eines deterministischen Modells, das die Strömungsprozesse in den ungesättigten Abdichtungsschichten und ggf. im Deponiekörper nachbilden kann, angezeigt. Das hierzu angewandte Programm SiWaPro DSS erzielt vergleichbare Modellierungsergebnisse wie BOWAHALD und HELP 3.80 D für reguläre Abdichtungssysteme und eröffnet aber darüber hinaus in der gekoppelten Anwendung nun die Möglichkeit auch nicht-reguläre Abdichtungssysteme, wie Kapillarsperren zu untersuchen und modellgestützt zu optimieren.

7 Literatur

- [1] BERGER, K. 2004: Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell. Technische Dokumentation zu HELP 3.80 D - Änderungen gegenüber HELP 3.07 -. Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg
- [2] BERGER, K., 1998: Das HELP-Modell. Auszug aus: Validierung und Anpassung des Simulationsmodells HELP zur Berechnung des Wasserhaushalts von Deponien für deutsche Verhältnisse. Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg / Umweltbundesamt, Berlin
- [3] DUNGER, V. (2006): Bowahald-Dokumentation. TU Bergakademie Freiberg, Freiberg
- [4] GDA-Empfehlung (Entwurf 2003): E 2-30- Modellierung des Wasserhaushaltes der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien.
- [5] GDA-Empfehlung (Entwurf 2000): E2-33-Kapillarsperren als Oberflächenabdichtungssystem
- [6] GDA-Empfehlung (Entwurf 2006): E2-31-Rekultivierungsschichten
- [7] GRÄBER, P.-W.; BLANKENBURG, R.; KEMMESIES, O.; KRUG, S.: „SiWaPro DSS – Beratungssystem zur Simulation von Prozessen der ungesättigten Zone“; in: Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften, Workshop Leipzig 2006; Shaker Verlag, Bereich Umweltinformatik
- [8] MÜLLER, A.; MEIER, B.; SCHULZE, C. (2002): Verstärkung der Interdisziplinarität des Bearbeitungs- und Forschungsansatzes durch bereichsübergreifende Projekte.- In: Zeitschr. Mineralische Rohstoffe, Jg. 17, S. 745-754
- [9] MILLER, R.; TAYLOR, S.; SMITH, A. (1990): Geochemistry of rocks and ores of the Inner African Copper Belt.- In: Journal Mining Economics and Environmental Protection, 10, pp. 234-238
- [10] KEMMESIES, O. (1995): Prozeßmodellierung und Parameteridentifikation von Mehrphasenströmungsprozessen in porösen Medien. Dissertation. Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der TU Bergakademie Freiberg. Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V.. Heft 7. Dresden. ISSN 1430-0176.
- [11] LUCKNER, L., M. Th. VAN GENUCHTEN and D. R. NIELSEN, (1989): A Consistent Set of Parametric Models for the Two-Phase Flow of Immiscible Fluids in the Subsurface. Water Resour. Res. 25(10): p. 2187-2193.
- [12] MUALEM, Y. (1976): A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. Water Resour. Res. 12: p. 513-522.
- [13] NITSCH, B., Gräber, P.- W., KEMMESIES, O.(2007): Anwendung synthetischer Niederschlagszeitreihen bei der Strömungssimulation in der ungesättigten Bodenzone. TU Dresden, Dresden, submitted in Workshop 2007-Simulationen in Umwelt- und Geowissenschaften, Shaker Verlag
- [14] SCHROEDER, P. R. & K. BERGER, 2004: Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell. Benutzerhandbuch für die deutsche Version 3. Unter Mitarbeit von N.M. Aziz, C.M. Lloyd, P.A. Zappi. 4., überarb. Aufl., Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg
- [15] ŠIMUNEK, J.T. VOGEL, M. Th. VAN GENUCHTEN. (1994): The SWMS_2D code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media, Version 1.1., Research Report No.132, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA.
- [16] VAN GENUCHTEN, M. Th. (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: p. 892-898.
- [17] YOUNG, E. L.; OLDMAN, S. A. (2005): Mine water in the Environment.- Springer, Berlin, 322 pp.