

## **Bemessung von mineralischen Dichtungsschichten aus hydromechanischer Sicht**

**Oliver Kemmesies und Wolfgang Behrens**

KP Ingenieurgesellschaft für Wasser und Boden mbH, Gunzenhausen

TD Umwelttechnik GmbH & Co. KG, Ballerstedt

**Design of mineral sealing layers based on hydromechanical aspects**

### **Abstract**

Mineral layers as a part of surface sealing systems in landfills must not dry out to prevent cracks. The design of such layers needs the accurate prediction of climatical impacts as boundary conditions as well as the prediction water pressure and water content inside the elements of such a sealing system. The simulation of the water flux in the unsaturated zone based on RICHARDS-equation is a convenient way to predict the occurrence of cracks in the layers. Measured water pressure, water content and also boundary fluxes are needed to calibrate such models and identify the underlying parameters. The application of such a procedure is shown the test site Rothenbach using the simulation model SiWAPRO DSS and a time series ranging from 2001 to 2005

### **Zusammenfassung**

Die Gewährleistung der Austrocknungssicherheit mineralischer Dichtungsschichten erfordert die Prognose extremer klimatischer Ereignisse als Randbedingungen sowie deren Auswirkungen im Dichtungselement. Der Sicherheitsgrad der Dimensionierung von Bauwerken steigt, je berechenbarer der verwendete Baustoff ist. Die gestellten Anforderungen an solche Dichtungssysteme können dabei oft nur durch Baustoffe mit festgelegter Rezeptur geleistet werden. Die Prognose des Eintretens von Trockenrissen wird dann möglich, wenn Wasserspannungsdaten aus Testfelduntersuchung mit den Wasserentzugsfunktionen der numerischen Simulationsprogramme des Wasserhaushaltes erfolgreich kalibriert werden können. Denn dann wird eine Berechnung der in der Dichtung vorhandenen Wassergehalte als Bemessungspotenzial möglich. Die dabei anzuwendende Vorgehensweise soll anhand der Daten des von 2001 bis 2005 betriebenen Testfeldes auf der Deponie Rothenbach (NRW) bei Verwendung des Dichtungsmaterials Trisoplast demonstriert werden. Mit dem Programm SiWAPRO DSS wurden dabei langjährige Wasserhaushaltsuntersuchungen mit einer Auflösung in Tagesschritten durchgeführt, die es gestatten kritische Zustände hinsichtlich Austrocknung und Rißverhalten zu identifizieren.

### **Keywords**

Deponieabdeckung, Wasserhaushalt, Austrocknung, Prognose, Rissverhalten, Trisoplast

landfill cover, water balance, drying behavior, crack prediction, Trisoplast

## 1 Einleitung

Auf der Deponie Rothenbach (NRW) wurde ein Testfeld zur Untersuchung einer mineralischen Dichtung aus Trisoplast aufgebaut. Im Zeitraum vom 09.08.2001 bis 18.10.2005 wurden u. a. zeitlich hochauflösend in einem Teilfeld die Wasserdruckhöhen ( $h_p$ ) in allen wasserhaushaltlich relevanten Schichten des Dichtungssystems gemessen.

Unter Verwendung der vorliegenden Messergebnisse soll das wasserhaushaltliche Verhalten des Oberflächensicherungssystems auf dem Testfeld Rothenbach modelliert werden, um Grundlagen für eine Berechnung der in der Dichtung vorhandenen Wassergehalte bzw. Wasserspannungen als prognostiziertes Bemessungspotenzial für beliebige weitere Standorte zu ermöglichen.

Da der Austrocknungsschutz einer mineralischen Dichtung vorrangig von der Wechselwirkung Rekultivierungsschicht/mineralische Dichtung gewährleistet wird (BEHRENS, 2006), muss die Rekultivierungsschicht einen hierfür gerade ausreichenden Bodenwasservorrat zur Verfügung stellen, um eine Überbeanspruchung infolge Austrocknung in der mineralischen Dichtung zu verhindern.

Der Arbeitskreis „Geotechnik der Deponiebauwerke“ der DGGT hat die Grundlagen zum Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungen in RAMKE et al. (2002) publiziert. Durch WITT und ZEH (2004) sowie ZEH und WITT (2006) erfolgte eine Zusammenfassung dieser Ergebnisse unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Möglichkeiten einer ingenieurmäßigen Bemessung von mineralischen Dichtungen. Mit Bezug auf diese Erkenntnisse, sowie auf SCHANZ et al. (2004) und BEHRENS und NEUMANN (2002) wird damit erstmalig für das Dichtungsmaterial Trisoplast die rechnerische Prognose des Rissverhaltens infolge Austrocknung ermöglicht.

## 2 Testfeld Rothenbach

### 2.1 Aufbau des Testfeldes

Das komplette Testfeld auf der Deponie Rothenbach hat eine Länge von 70 m und eine Breite von 40 m. Es fällt nach Süden hin ab und hat im Böschungsschulterbereich eine mittlere Neigung von 1:6,5, im mittleren Teil von 1:5 und im unteren Teil von 1:3,5.

Das Oberflächensicherungssystem ist wie folgt aufgebaut:

- 100 cm Rekultivierungsschicht
- 0,5 cm Drainmatte (Secudrän)
- 7 cm Trisoplast
- 50 cm Auflager aus Müllverbrennungssasche (MVA)

Im oberen Böschungsschulterbereich ist ein Teilfeld mit Tensiometern zur Aufnahme der Wasserdruckhöhen bestückt. In dem Teilfeld sind insgesamt 9 Tensiometer in drei verschiedenen Schichten eingebaut. Jeweils 3 Tensiometer sind in der Rekultivierungsschicht, in der Trisoplastdichtung und in der Auflagerschicht angeordnet.

## 2.2 Messwerte

Im Zeitraum vom 08.08.01 bis 20.12.04 und vom 18.01.05 bis 18.10.05 wurden:

- ✓ Wasser- bzw. Saugspannung (Auflagerschicht, Trisoplast, Rekultivierungsschicht)
- ✓ Windgeschwindigkeit und -richtung
- ✓ Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit, Niederschlag und Verdunstung nach HAUDE

gemessen.

Die Abbildung 1 zeigt die Messwerte des Niederschlags (oben) sowie die Mittelwerte der Kapillardruckhöhen aus den Tensiometern in der Rekultivierungsschicht, in Trisoplast und im Auflager. Die Mittelwerte wurden dabei aus den je 3 Messwerten der Tensiometer gebildet.

In der Rekultivierungsschicht (2. Grafik von oben in Abbildung 1) ist sägezahnförmig ein saisonal bedingter Anstieg der Kapillardruckhöhe zu erkennen. Dieser ist vermutlich auf die Austrocknung der Rekultivierungsschicht zurückzuführen. Dieser saisonale Einfluss ist allein im Verlauf der Niederschlagshöhen nicht wieder zu erkennen.

Die beiden unteren Grafiken in Abbildung 1 zeigen keine bzw. nur noch eine geringe Beeinflussung durch die z.T. starke Austrocknung der Rekultivierungsschicht. Lediglich zu Beginn der Aufzeichnungen sind ausgeprägte ungesättigte Verhältnisse anzutreffen. Diese resultieren vermutlich aus dem Einbau. Danach steigen die Kapillardruckhöhen in Trisoplast und im Auflager an, bis nahezu gesättigte Verhältnisse erreicht werden.

Die Strömungsverhältnisse im Bereich des Auflagers (unterste/4. Grafik von oben in Abbildung 1) verbleiben dagegen stets im ungesättigten Bereich. Es ist dabei a priori

davon auszugehen, dass das Wasser, das die Rekultivierungsschicht durchströmt hat, auf Trisoplast lateral abströmt.

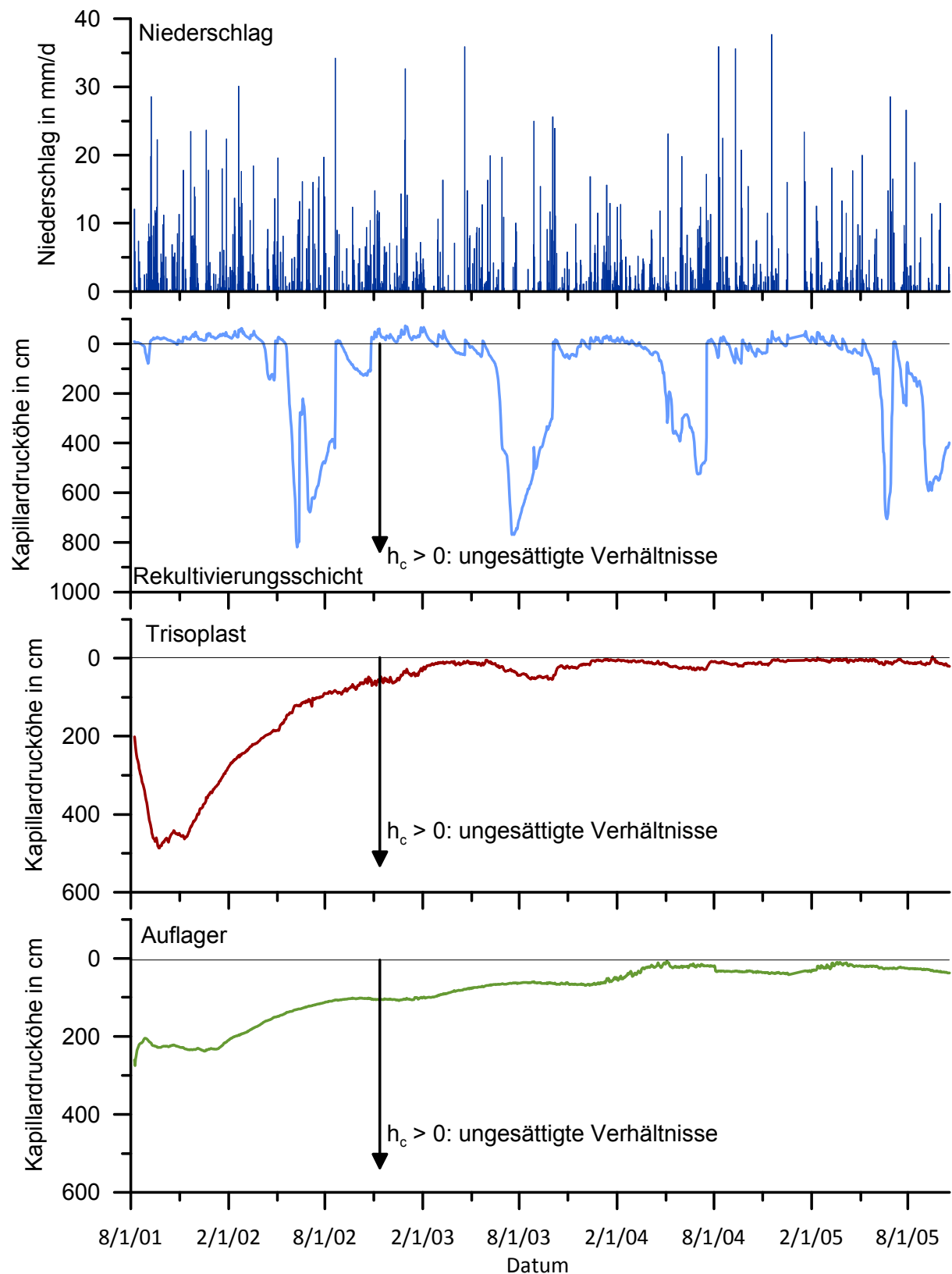


Abbildung 1 Gemessener Niederschlag und Mittelwerte der gemessenen Kapillardruckhöhen im Testfeld der Deponie Rothenbach

### **3 Modellierung**

#### **3.1 Programmsystem**

Die numerischen Modellbetrachtungen werden mit Hilfe des Programms SiWAPRO DSS (KEMMESIES et al., 2007) durchgeführt. Die Nachbildung der Strömungsprozesse erfolgt im Programm auf der Grundlage der RICHARDS-Gleichung, die der Stofftransportprozesse auf der Grundlage der Advektions-Dispersions-Gleichung.

Parameterfunktionen der RICHARDS-Gleichung sind die hysteresis Retentionsfunktion  $\theta(h_c)$  sowie die Funktion der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit  $k(\theta)$ .

#### **3.2 Modellaufbau der Deponieabdichtung**

##### **3.2.1 Geometrie**

Der geometrische Aufbau des Modells richtet sich nach den geometrischen Daten des Testfeldes. Die Schichthöhe der Dränmatte beträgt im Feld 0,5 cm. Diese Schichthöhe wurde im Modell auf 5 cm überhöht, da eine Modellschicht von nur 0,5 cm Höhe zu einer feineren Diskretisierung des Strömungsfeldes in diesem Bereich und damit zu einer deutlich höheren Anzahl an Berechnungsknoten zwingen würde. Die Erhöhung der Schichtmächtigkeit wurde durch eine Verringerung des Durchlässigkeitsbeiwertes dieser Schicht kompensiert.

##### **3.2.2 Zulauf zum Teilfeld**

Das Test- und auch das Teilfeld befinden sich an der Böschungsschulter der Deponie. Dadurch ist sichergestellt, dass es keine seitlichen Zuflüsse zum Teilfeld gibt. Ein Zufluss erfolgt nur durch versickerndes Regenwasser. Im Modell wird der Zufluss über eine atmosphärische Randbedingung berücksichtigt.

Als atmosphärische Randbedingung wird in SiWAPRO DSS der effektive Niederschlag, die potentielle Bodenevaporation und die potentielle Transpiration verwendet. Der gemessene Niederschlag wurde mit einem Faktor von 10% messfehlerkorrigiert. Die potentielle Bodenevaporation und die potentielle Transpiration wurden auf der Basis der gemessenen Temperatur und Luftfeuchtigkeit mit einem an der TU Dresden entwickelten Wettergenerator (NITSCH et al., 2007) berechnet (vgl. Abbildung 2). Die dafür fehlenden Werte zur Globalstrahlung wurden mit Werten der ca. 50 km östlich gelegenen Station Düsseldorf berechnet.

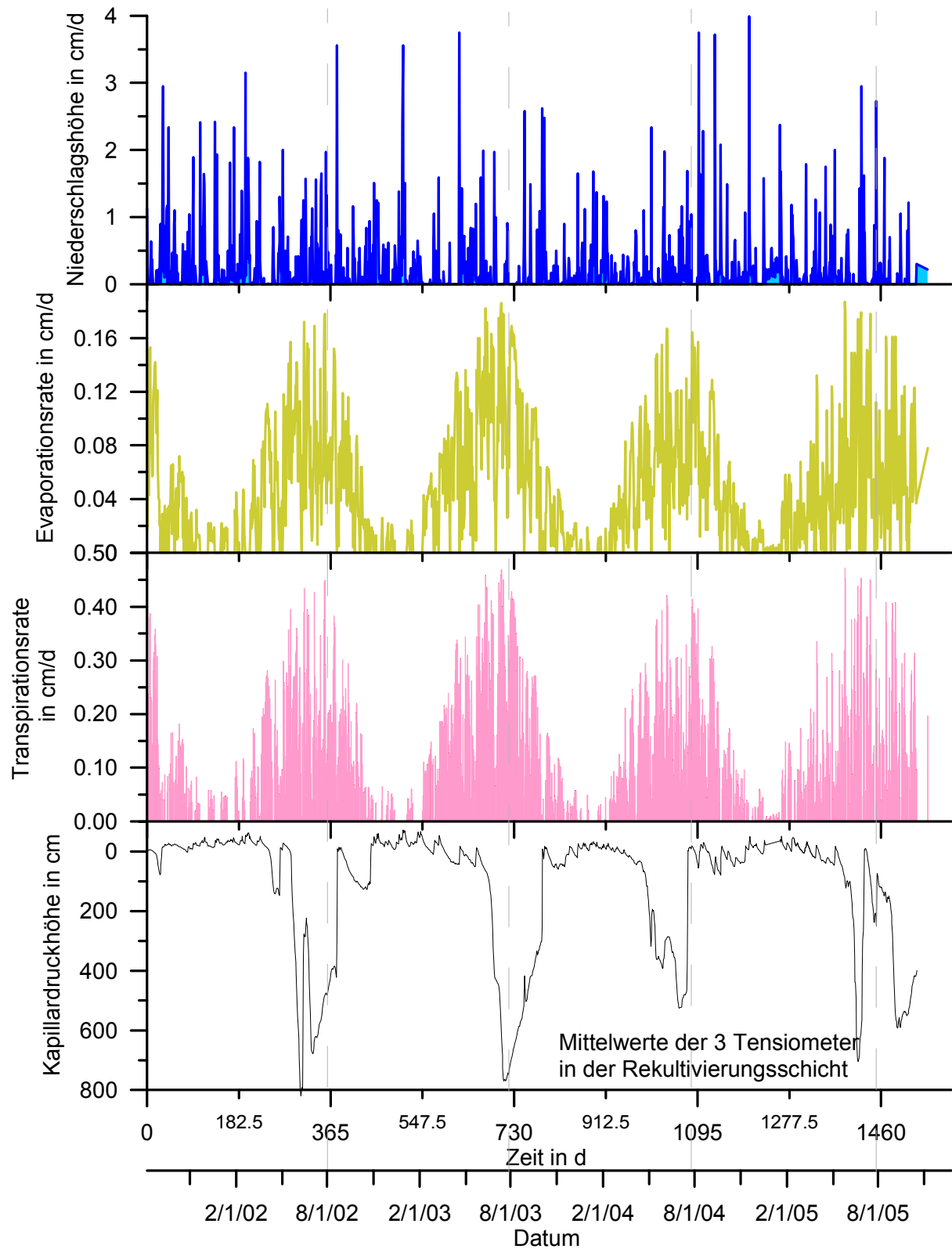


Abbildung 2: Zeitreihen der berechneten Wasserhaushaltsgrößen

In der Abbildung 2 sind die Stressperioden mit hoher potenzieller Verdunstung (Evaporation) und Pflanzenwurzeltzug (Transpiration) deutlich zu erkennen. Der Pflanzen-

wurzelentzug tritt unabhängig auf, solange wie der permanente Welkepunkt des Bewuchses nicht erreicht ist.

Ist die potenzielle Verdunstung größer als der Niederschlag findet Bodenverdunstung statt. Diese könnte zumindest theoretisch so groß werden, bis die gesamte potenzielle Verdunstung erreicht wird. Damit ist immer ein entsprechender Abfall der Druckhöhe (=Saugspannung) verbunden. Um hier den auftretenden Volumenstrom begrenzen zu können, wurde eine entsprechend begrenzende Steuergröße gesetzt.

### 3.2.3 Transpiration

Die aktuelle Transpiration wird im Programm SiWAPRO DSS wie folgt berechnet:

$$T_{\text{akt}} = \alpha \cdot \beta \cdot L_t \cdot T_{\text{pot}} \quad (1)$$

Dabei ist  $\alpha$  eine Skalierungsfunktion,  $\beta$  die Verteilungsfunktion der Wasseraufnahme der Wurzeln i.W. über die Wurzeltiefe,  $L_t$  die Breite der Verdunstungsoberfläche und  $T_{\text{pot}}$  die potentielle Transpirationsrate. Die Werte für  $T_{\text{pot}}$  wurden mit dem Wettergenerator ermittelt. Der Parameter  $\beta$  soll die mögliche örtliche Verteilung des Pflanzenwurzelentzuges berücksichtigen. Der Parameter wird im Netzgenerator des Programm SiWAPRO DSS vorgegeben. Bei dieser Berechnung wurden alle am Pflanzenwurzelentzug beteiligten Knoten mit dem maximalen Wert  $\beta = 1$  belegt. Der Parameter  $L_t$  wurde mit 1 cm belegt. Die dimensionslose Funktion  $\alpha$  skaliert den Pflanzenwurzelentzug  $T_{\text{akt}}$  in Abhängigkeit der Druckhöhe.

### 3.2.4 Ablauf

In das Profil eingedrungenes Niederschlagswasser strömt – solange das Dichtelement wirksam ist – auf der Dränmatte seitlich ab. Um diesen Sachverhalt auch im Modell abbilden zu können, wurde am rechten Rand eine Randbedingung 1. Art mit  $h_p=0$  cm angelegt. Um dabei einen modellbedingten Zustrom auszuschließen, wurde die Nebenbedingung  $q>0$  formuliert.

### 3.2.5 Hydraulische Parameter

Vorgegeben wurden die bodenhydraulischen und van Genuchten Parameter so wie sie im Labor bzw. später dann nach dem Aufgraben bestimmt worden waren.

## 3.3 Modellkalibrierung

Im Verlauf der Kalibrierung sind die Bodenparameter nun so anzupassen, dass die Messwerte zufriedenstellend nachvollzogen werden können. Dies erfolgt im Programm SiWAPRO DSS weitgehend automatisiert. Dazu sind die gemessenen Druckhöhen, Wassergehalte und Volumenströme an beliebigen Orten und zu beliebigen Zeiten vorzugeben. Die inverse Modellierung zur Ermittlung der Parameterwerte sowie deren Schwankungsbreiten erfolgt auf der Grundlage des Levenberg-Marquardt-Verfahrens (KEMMESIES, 1995).

**Tabelle 1** Ermittelte Boden- und van-Genuchten-Parameter

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Rekultivierungsschicht	Dränmatte	Trisoplast	Auflager
Massstabsfaktor	$\alpha$	1/cm	0,1	0,1	0,00125	0,1
Anstiegsfaktor	n		1,3	2	1,5	1,5
ungesättigte Leitfähigkeit	$k_0$	m/s	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-11}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
bei einer Sättigung von	$S_0$		0,71	1	1	1

Tabelle 1 enthält die bei der Kalibrierung ermittelten Parameterwerte zur Übersicht. In der Abbildung 3 ist der mit diesem Parametersatz simulierte Verlauf der Druckhöhen in den 3 relevanten Schichten gegenüber den gemittelten Messwerten aufgetragen. Beim Vergleich der gemessenen und simulierten Kapillardruckhöhen fällt auf, dass die Kurven in den 3 Grafiken aus Abbildung 3 unterschiedliche Ausgangsdruckhöhen bei  $t=0$  aufweisen. Ursache ist die fehlerbehaftete Vorgabe der Anfangsbedingungen im Simulationsprogramm.

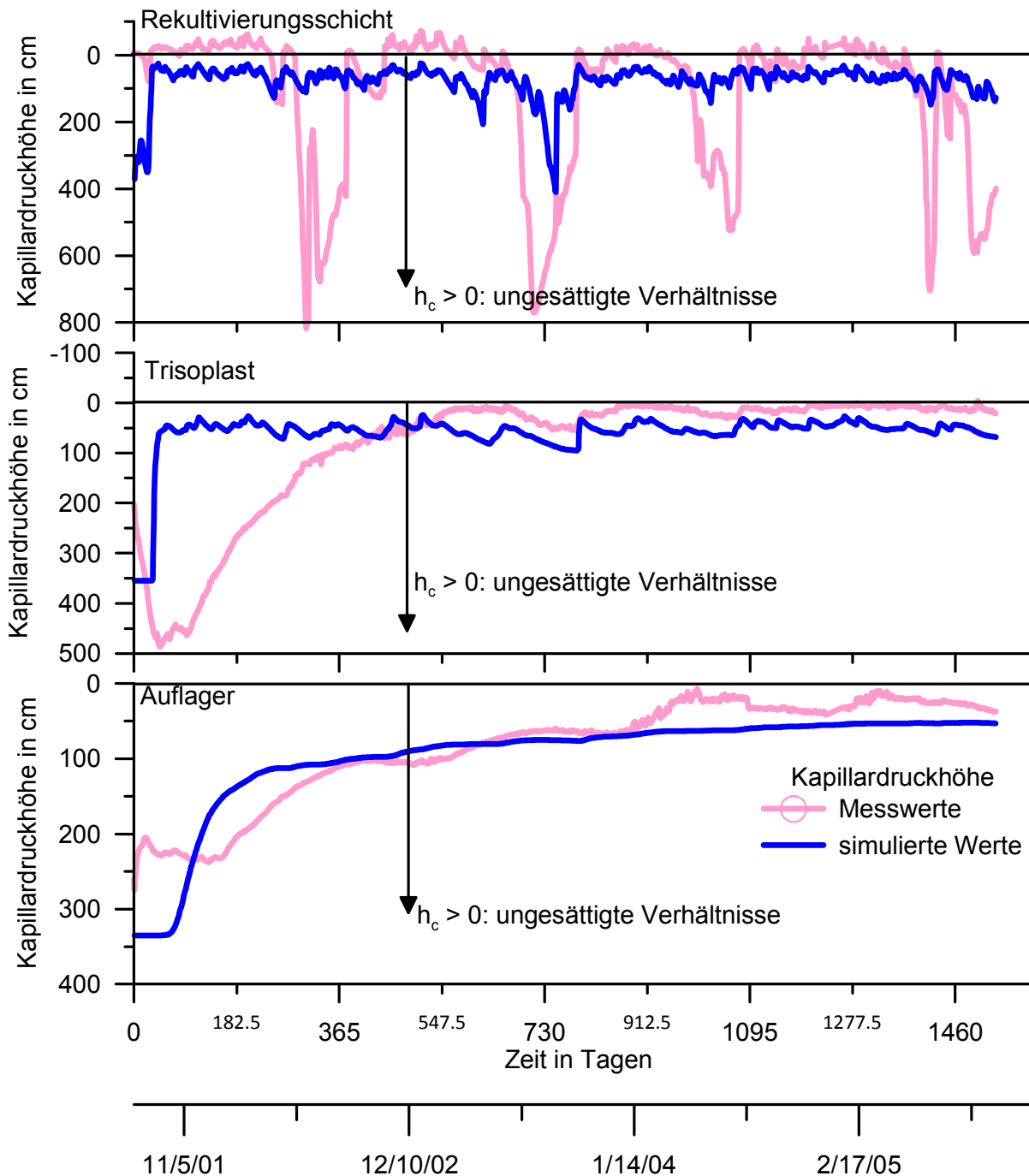
Danach fällt der Wasserdruck in Trisoplast bis auf  $h_p \approx -500$  cm ab. Dies ist vermutlich einbaubedingt und kann mit den gewählten Anfangs- und Randbedingungen so nicht nachvollzogen werden.

Der gemessene Wasserdruck strebt in allen drei Messebenen mit der Zeit  $h_p=0$ , d.h. gesättigten Bedingungen entgegen. Dies und auch die Reaktion der oberen drei Schichten (Rekultivierungsschicht, Dränmatte und Trisoplast) auf Wasserdefizite können mit der Simulation gut nachvollzogen werden.

Die gemessene Druckhöhe in der Rekultivierungsschicht (vgl. oberste Grafik in Abbildung 3) ist z.T. positiv. Dies deutet auf einen Einstau oberhalb Trisoplast und einen Abfluss entlang der Schichtgrenze zu Trisoplast hin. Diese teilgesättigten Verhältnisse lassen sich noch nicht zufriedenstellend nachvollziehen. Mit dem vorliegenden Modell werden leicht ungesättigte Verhältnisse berechnet. Wenn Messfehler ausgeschlossen



werden könnten, dann liegt dies vermutlich nur in der Wahl der Randbedingungen am rechten Rand begründet. Dort ist die Druckhöhe mit  $h_p=0$  vorgegeben. Dies trifft in der Realität nicht zu.



**Abbildung 3** Vergleich der gemessenen und simulierten Kapillardruckhöhen

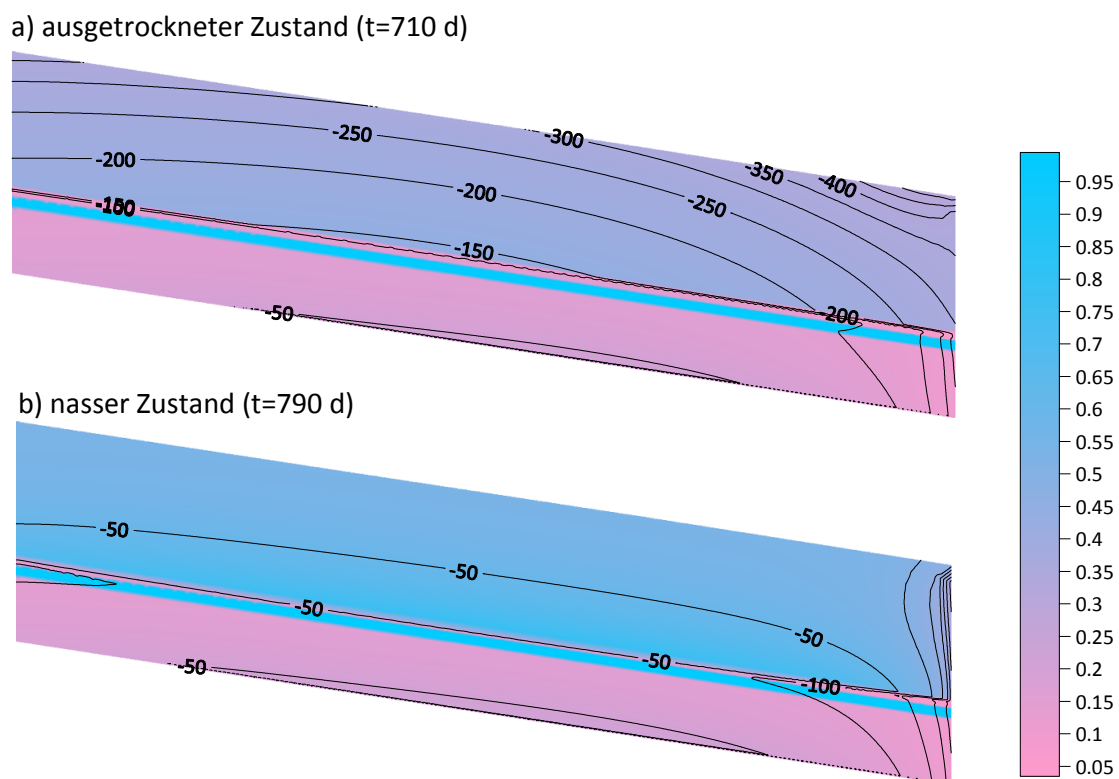
Die gemessene wie auch berechnete Druckhöhe in der Rekultivierungsschicht reagiert auf die ausgeprägten Stressperioden entsprechend. Die Maxima können mit den derzeitigen Annahmen noch nicht in ihrer Größenordnung nachvollzogen werden. Hierzu bedarf es noch einer detaillierteren Betrachtung und Parametrisierung des Pflanzen-

wurzelentzugs (vgl. Abschn. 3.2.3). Dieser ist bislang recht pauschal im Modell mit einer uniformen Verteilung bis in eine Tiefe von 30 cm berücksichtigt.

## 4 Auswertung

Nach der erfolgreichen Simulation mit dem kalibrierten Modell steht eine Zeitreihe von 1.553 Tagen zu den Größen Druckhöhe, Potenzialhöhe, Wassergehalt, Sättigung und ggf. auch Konzentration, falls Stofftransport zu berücksichtigen ist, zur Verfügung.

Exemplarisch sind in der Abbildung 4 die Druckhöhen und Sättigung im Profil für eine der Stressperioden bei  $t=710$  d und die Wiederaufsättigung bis  $t=790$  d dargestellt.



**Abbildung 4** Berechnete Druckhöhen- und Sättigungsverteilung ( $h_p$  - Linien, S - Einfärbung) zu zwei verschiedenen Zeiten

Mit diesen konkreten Angaben zu den Sättigungsverhältnissen lassen sich im nächsten Schritt Angaben zur Trocknungsrisssgefährdung sowie Angaben zur Änderung der Gas- und Wasserdurchlässigkeit des verwendeten Dichtungsmaterials Trisoplast ableiten.

Es ist vorgesehen, die erforderlichen bodenmechanischen Zusammenhänge und Parameter in das Programm SiWAPRO DSS (KEMMESIES et al., 2007) zu integrieren, um bei Kenntnis der erforderlichen Materialparameter für beliebige Dichtungsmaterialien und beliebige Standorte derartige Berechnungen für jede Stelle einer zu planenden minera-

lichen Dichtung ausführen zu können. Damit ist durch Integration diesbezüglicher verallgemeinerter Zusammenhänge somit eine hydromechanische Bemessung von mineralischen Dichtungen im Deponiebau in greifbare Nähe gerückt.

## 5 Literatur

- |   |      |   |
|---|------|---|
| Behrens, W., Dunger, V.,<br>Kemmesies, O.   | 2008 | Austrocknung verhindern - Hydromechanische Bemessungen von mineralischen Dichtungsschichten, Wasser/Luft/Boden 9/2008   |
| Behrens, W.                                 | 2006 | Trisoplast - Darstellung aktueller Entwicklungen und Rahmenbedingungen zum Austrocknungsverhalten, DEPONIEWORKSHOP ZITTAU/LIEBEREC 11/2006, TAGUNGSBAND   |
| Behrens, W., Neumann,<br>M.                 | 2002 | Untersuchungsergebnisse zu einigen mechanischen Eigenschaften von Trisoplast, Müll & Abfall, Nr.2, S. 86 - 100, 2002  |
| 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.  |
| Kemmesies, O. et al.                        | 2007 | BMBF-Förderschwerpunkt "Sickerwasserprognose", SIWAPRO DSS-Entwicklung eines computergestützten Beratungssystems zur Sickerwasserprognose, FKZ: 02WP 242/243/502/503, KP Ingenieurgesellschaft für Wasser und Boden mbH, Gunzenhausen, November 2007<br><br>Link: <a href="http://www.ibwabo.de/pdf/BMBF.pdf">http://www.ibwabo.de/pdf/BMBF.pdf</a> |
| Melchior, S. und W. Wittpohl                | 2004 | Deponie Rothenbach, Testfeld Oberflächenabdichtung, Aufgrabung Trisoplast-Dichtung am 11.12.2003. Bericht vom 18.03.2004  |
| Nitsch, B.; Gräber, P.-W.;<br>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   |
| Ramke, H.-G., Gartung,E.,                   | 2002 | Tagungsband - Austrocknungsverhalten mineralischer  |

- |   |      |  |
|---|------|--|
| Heibrock, G., Lückewille, W., Melchior, S., Vielhaber, B., Bohne, K., Maier-Harth, U., Witt, K.J. |      | Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen, Status-Workshop, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Heft 03                      |
| Schanz, T., Agus, S., Tscheschlok, G.   | 2004 | Hydraulisch-mechanische Eigenschaften einer polymerverbesserten Sand - Bentonit - Mischung beim Einsatz im Deponiebau, Geotechnik 27 (2004) Nr.4                       |
| Witt, K.J. u. Zeh, R.M.   | 2004 | Maßnahmen gegen Trockenrisse in mineralischen Abdichtungen, Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, März 2004, Band 81, S. 83                                       |
| Zeh, R.M. u. Witt, K.J.   | 2006 | Tensile Strength of Compacted Clays as Part of the Crack Prediction of Clay Liner in Landfills. 5th Int. Congress on Environmental Geotechnics, Cardiff, UK, June 2006 |

**Anschrift der Verfasser(innen):**

Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Oliver Kemmesies  
KP Ingenieurgesellschaft für Wasser und Boden mbH  
Bahnhofstraße 37  
D-91710 Gunzenhausen  
Telefon +49 9831 8860-0  
Email: oliver.kemmesies @ibwabo.de  
Website: www.ibwabo.de

Dipl.-Ing. Wolfgang Behrens  
TD Umwelttechnik GmbH & Co. KG  
Kirchstraße 9  
D-39606 Ballerstedt  
Telefon +49 9831 8860-0  
Email: w.behrens @trisoplast.de  
Website: www.trisoplast.de