

# Gekoppelte mechanische, hydraulische und biochemische Modellierung von Siedlungsabfalldeponien

S. Bente, V. Krase, U. Kowalsky, D. Dinkler

Institut für Statik, Technische Universität Braunschweig

## Coupled mechanical, hydraulic and biochemical modelling of landfills

### Abstract

The description of the behaviour of municipal solid waste by numerical models is of avail for long term prognosis of landfills. At the Institute for Structural Analysis models for both time dependent stress-deformation behaviour and reactive transport processes in landfills have been developed. The related project is part of the collaborative research center *Life Cycle Assessment of Structures via Innovative Monitoring* that runs at the Technical University of Braunschweig since 1998. Ongoing research aims at solving the coupled problem of stress-deformation behaviour and reactive transport. Main objective is the analysis of the effect of biodegradation on settlements and of the influence of deformation on hydraulic properties. A fully coupled model is accomplished stepwise. The current version considers the influence of deformation on different hydraulic properties as well as the concept of effective stress. The self weight of the waste is related to the waste density, which changes with ongoing degradation. Current work concentrates on the implementation of degradation dependent settlements.

### Zusammenfassung

Am Institut für Statik der Technischen Universität Braunschweig werden innerhalb des Sonderforschungsbereiches SFB 477 „*Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung*“ numerische Modelle zur Analyse der Prozesse in Siedlungsabfalldeponien entwickelt. Ziel ist es, mit Hilfe dieser Modelle einen Beitrag zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von Deponien leisten zu können. Modelle für die Untersuchung von gekoppeltem, mechanischem und hydraulischem Verhalten sowie für die Beschreibung von gekoppelten Transport- und Reaktionsprozessen liegen bereits vor. Gegenstand aktueller Forschung ist die Entwicklung eines voll gekoppelten Modells, dass alle wesentlichen Einflüsse zwischen mechanischen, hydraulischen und biochemischen Prozessen berücksichtigt. Beispiele hierfür sind die Veränderung der hydraulischen Eigenschaften des Abfalls infolge von Verformungen und die Auswirkungen des Abbaus organischer Substanz auf Setzungen. Das voll gekoppelte Modell wird schrittweise realisiert. Für die numerische Umsetzung wird eine Kombination aus der Finite-Elemente-Methode und einem Finite-Volumen-Verfahren verwendet. Die aktuelle Version berücksichtigt verschiedene Einflüsse von Deformation auf hydraulische Eigenschaften sowie das Konzept der effektiven Spannungen. Die Bestimmung des Eigengewichts des Abfalls erfolgt mit Hilfe der Dichten, die infolge von Abbauprozessen zeitlich veränderlich sind. Die aktuelle Arbeit konzentriert sich im Wesentlichen auf die Erfassung abbaubedingter Setzungen.

### Keywords

Modellierung, Setzungen, Abbau, Transport, Finite Elemente, modelling, settlements, biodegradation, transport, finite elements

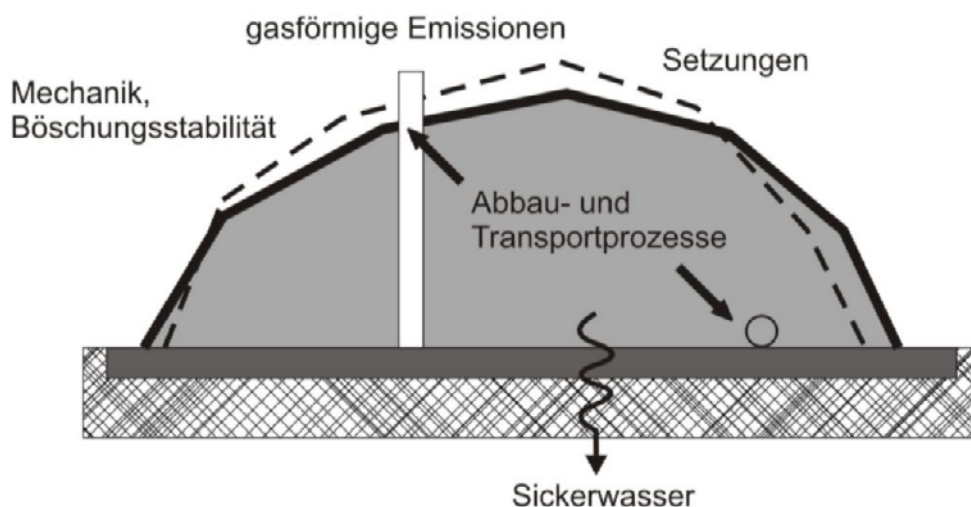
# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Im Anschluß an die Ablagerungs- und Stilllegungsphase einer Deponie beginnt die Phase der Nachsorge, in der das Deponieverhalten weiterhin zu überwachen ist. Die Kontroll- und Überwachungsmaßnahmen der Nachsorge sind solange durchzuführen bis aus dem Deponieverhalten keine Beeinträchtigung des Wohles der Allgemeinheit mehr zu erwarten ist. Dabei sind die Kriterien nach §13 Abs. 5 der Deponieverordnung (DepV) zugrunde zu legen, die u. a. fordern, dass biologische Prozesse und Setzungen weitgehend abgeklungen sein müssen und die Deponie dauerhaft standsicher sein muss. Zu welchem Zeitpunkt dieser Zustand erreicht ist, ist jedoch aufgrund der Heterogenität des Materials Abfall, der vielfältigen Einflüsse von Umgebungsbedingungen auf ablaufende Prozesse sowie der Beeinflussung von Prozessen untereinander schwer abzuschätzen. Prognosen geben hier Zeiträume von 30 bis 200 Jahren an (STEGMANN ET AL., 2006). Zur Quantifizierung der Lebensdauer des Ingenieurbauwerkes Deponie und für die Bewertung deren Gefährdungspotentials werden daher in Teilprojekten des Sonderforschungsbereiches SFB 477 „Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung“ Modelle entwickelt, die das komplexe Langzeitverhalten von Deponien beschreiben können. Gegenstand aktueller Forschung ist die Entwicklung eines voll gekoppelten Modells, das in der Lage ist, die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse in Deponien mit ihren wesentlichen Interaktionen zu erfassen.

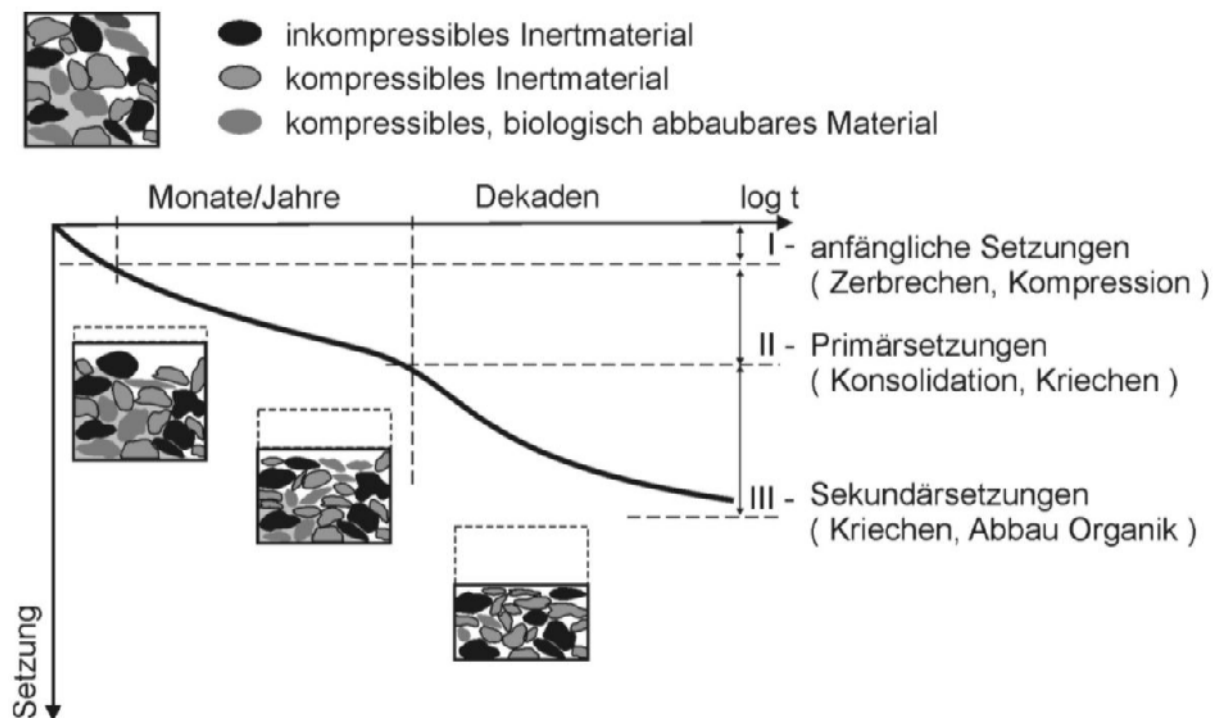
## 1.2 Prozesse in Deponien

Abb. 1 stellt die in Deponien stattfindenden Phänomene schematisch dar. Sie können in mechanische Prozesse, Transport- und Reaktionsprozesse unterteilt werden.



**Abbildung 1** Schematische Darstellung der gekoppelten Prozesse in Deponien

Infolge des Einbauwassergehalts und aufgrund der Infiltration von Niederschlag verläuft der Abbau der im Abfall enthaltenen organischen Substanz zum größten Teil unter anaeroben Bedingungen. Es entstehen Methan und Kohlendioxid, die zusammen mit einigen Spurengasen das originäre Deponiegas bilden. Teile des Porenraumes sind mit einer flüssigen Phase gefüllt, welche die Produkte der biochemischen Reaktionen und andere lösliche Bestandteile transportiert, es wird Sickerwasser gebildet. Die Geschwindigkeit der Abbaureaktionen ist abhängig von Umgebungsbedingungen wie Temperatur, pH-Wert und Wassergehalt. Infolge des Abbaus der Organik nimmt die Menge der festen Substanz ab, was zu Setzungen führt. Diese Setzungsprozesse können über relativ lange Zeiträume andauern, da sie an die Geschwindigkeit der Abbauprozesse gekoppelt sind, welche wiederum von den Umgebungsbedingungen beeinflusst wird. Anfänglich werden Setzungen durch Einwirkung von Lasten verursacht und wachsen aufgrund von Konsolidation oder Kriechen mit der Zeit an. Abb. 2 illustriert die verschiedenen Setzungsmechanismen. Mit fortschreitendem Abbau der organischen Substanz ändert sich auch die Abfallzusammensetzung, was sich auf die mechanischen Eigenschaften der festen Phase auswirken kann.



**Abbildung 2** Setzungsprozesse in Deponien (nach MANASERRO ET AL., 1996)

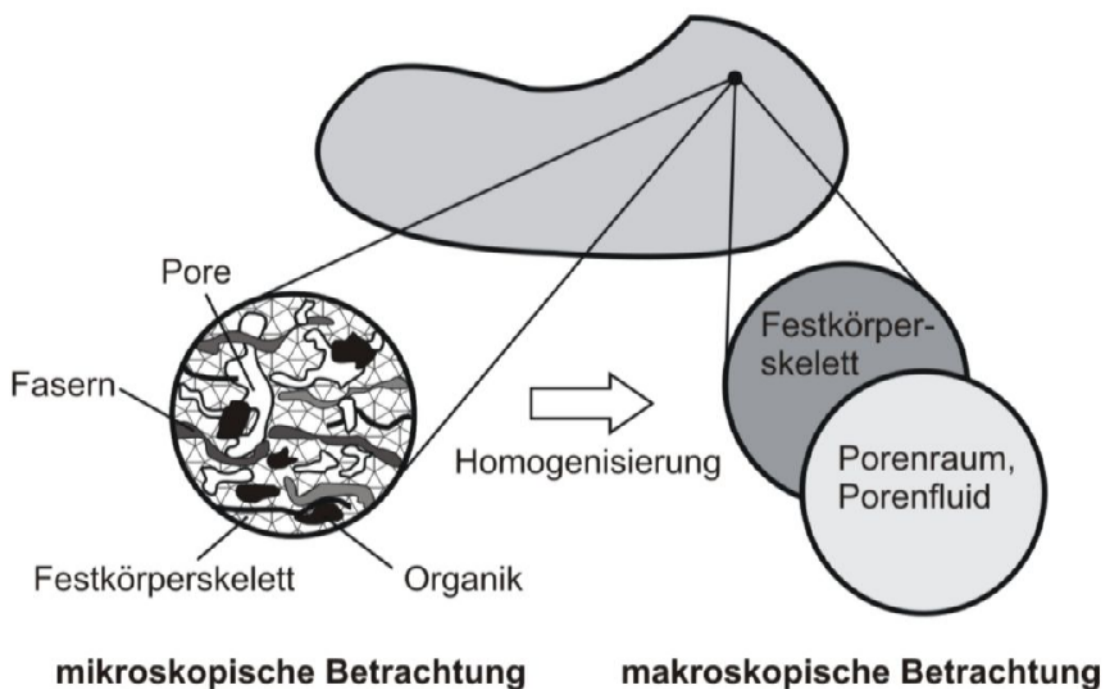
Verformungen führen zu einer Änderung der Dichte des Abfalls und zu veränderten Festigkeitseigenschaften. Desweiteren induzieren sie eine Umlagerung von Partikeln und eine Änderung von Struktur und Volumen. Die veränderte Porosität führt zu veränderten hydraulischen Eigenschaften, die den Ablauf der Transportprozesse beeinflussen. Wegen des Einflusses des Wassergehalts auf die Abbauprozesse wirken sich diese Änderungen wiederum auf die Reaktionsgeschwindigkeiten aus. Desweiteren können Ver-

Abfallforschungstage 2008 [www.wasteconsult.de](http://www.wasteconsult.de)

formungen zu einem Anstieg des Porendrucks führen, was sich zum einen auf die Fließgeschwindigkeiten der Fluid-Phasen auswirkt. Zum anderen geht mit einer Erhöhung des Porendrucks die Abnahme der vom Korngerüst übertragenen Spannungen und damit eine Verringerung der Scherfestigkeit einher.

## 2 Modellkonzept auf Basis der Theorie poröser Medien

Siedlungsabfall ist ein poröses Material, dessen Festkörperskelett aus verschiedenen Komponenten besteht und dessen Porenraum sowohl mit einer flüssigen als auch mit einer gasförmigen Phase gefüllt sein kann. Um bei der Modellierung nicht auf mikroskopischer Ebene jeden einzelnen Partikel beschreiben zu müssen, wird eine Methode benötigt, die eine Homogenisierung des Materials, also eine Betrachtung auf makroskopischer Ebene, erlaubt. Dies ist mit Hilfe der Theorie poröser Medien möglich (s. z.B. DE BOER, 2005). Ein grundlegender Aspekt in der Theorie poröser Medien ist das Konzept der Volumenanteile, Abb. 3.

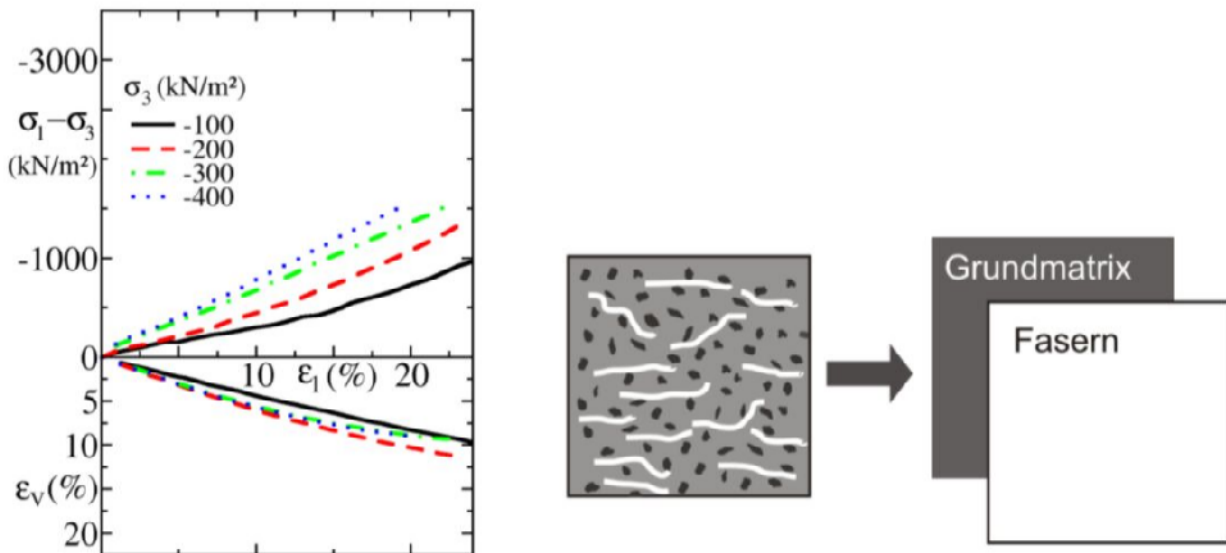


**Abbildung 3** Homogenisierung mit dem Konzept der Volumenanteile

Hieraus folgt eine Betrachtung der Bestandteile des Abfalls als *überlagerte Kontinua*, bei denen jede Komponente gleichzeitig an jedem Punkt mit ihrem Volumenanteil existiert. Es ist damit möglich, Bilanzgleichungen für die gesamte Mischung oder für einzelne Komponenten zu formulieren. Im entwickelten Modell wird die Impulsbilanz, äquivalent mit dem *Prinzip der virtuellen Verschiebungen*, auf die gesamte Mischung angewendet. Zusätzlich sind Massenbilanzen für einzelne Komponenten sowie die Energiebilanz zu erfüllen. Die Bilanzgleichungen werden durch konstitutive Gleichungen ergänzt, die in den folgenden Abschnitten, 2.1 bis 2.3, erläutert werden.

## 2.1 Mechanische Eigenschaften

Experimente zeigen, dass der Anteil an faserartigen Bestandteilen im Abfall dessen Festigkeit beeinflusst. So konnte KOCKEL in Triaxialversuchen, Abb. 4 a), aufgrund von faserigen Bestandteilen im Abfall, die als Bewehrung wirken, keinen Bruchzustand der Probe beobachten.



a) Triaxialversuch von KOCKEL, 1995

b) Aufteilung der festen Phase in Grundmatrix eingebettete Fasern

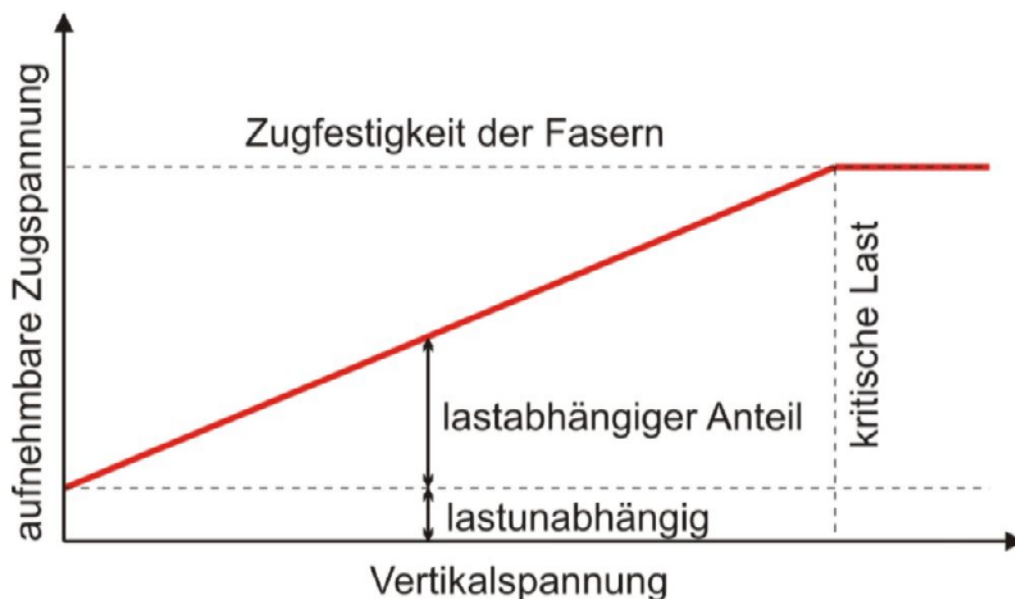
### Abbildung 4 Einfluss der faserartigen Bestandteile

Abfall verhält sich also je nach Zusammensetzung ähnlich einem Verbundwerkstoff. Das von EBERS-ERNST, 2001 entwickelte und von KRASE, 2007 modifizierte Modell berücksichtigt dies über die Beschreibung der festen Phase als eine bodenähnliche Grundmatrix mit eingebetteten Fasern, Abb. 4 b). Die Verzerrungen der beiden Anteile werden dabei als identisch angenommen. Die Materialmodelle für die Grundmatrix und für die Fasern werden getrennt formuliert. Die Bestimmung der Spannungen der Mischung ist mit den Partialspannungen möglich, die jeweils mit dem entsprechenden Volumenanteil multipliziert werden. Bei Berechnungen mit diesem Modell ist so die Vorgabe beliebiger Faseranteile möglich.

Die Ergebnisse der Triaxialversuche von KOCKEL verdeutlichen eine weitere Besonderheit bei der mechanischen Beschreibung von Siedlungsabfall. Bei der Belastung des Materials können großen Verzerrungen auftreten, so zeigen die Proben gemäß Abb. 4 a) Stauchungen bis über 20 %. Aus diesem Grund arbeitet das Modell mit einer Kinematik großer Verzerrungen. Eine Kinematik kleiner Verzerrungen, wie sie in der überwiegenden Anzahl von bauingenieurtechnischen Berechnungen, z.B. im Massivbau oder Stahlbau üblich ist, würde hier nicht die korrekten Ergebnisse liefern.

Die gesamte Verzerrung der Grundmatrix besteht aus einem spontan elastisch-plastischen sowie einem viskoplastischen Anteil. Die Spannungen aus elastischer Verzerrung werden mit einem Neo-Hooke Modell berechnet. Für die Bestimmung der spontan-plastischen Verformungsanteile ist eine Fließfläche erforderlich, die das Verhalten granularer Materialien beschreiben kann. Hier kommt eine Fließbedingung nach EHLERS, 1995 zur Anwendung, die im Wesentlichen dem Mohr-Coulomb-Kriterium entspricht. Die viskoplastische Dehnrate besteht wiederum aus zwei Anteilen. Der erste Anteil beschreibt die Spannungsabhängigkeit der Dehnrate mit einem Norton-Kriechgesetz. Ein zweiter Anteil gewährleistet, dass mit steigendem Kompaktionsgrad die Kriechrate abnimmt und der Kriechprozess so gegen einen Endzustand strebt.

Die Verzerrung der Fasern besteht aus einem elastischen und einem plastischen Anteil. Die Ermittlung der elastischen Spannungen erfolgt mit Hilfe einer transversal-isotropen Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Diese berücksichtigt die durch die Art des Einbaus bedingte Ausrichtung der Fasern. Für die Ermittlung der plastischen Dehnungsanteile wird ein Hauptspannungskriterium verwendet. Die maximal aufnehmbare Zugspannung wird nach einem Vorschlag von KÖLSCH, 1996 berechnet. Grundlage sind großmaßstäbliche Zugversuche, die am Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig durchgeführt wurden. Aus den Ergebnissen dieser Versuche folgert KÖLSCH, dass zwei Mechanismen für das Versagen der Probe maßgebend sind, das Versagen der Verankerung der Fasern in der Grundmatrix und das Versagen der Fasern selbst. Für die maximal aufnehmbare Zugspannung bedeutet dies, dass sie zunächst proportional zur Auflast zunimmt bis die Zugfestigkeit der Fasern erreicht ist und die übertragbare Zugspannung nicht mehr weiter gesteigert werden kann, Abb 5.



**Abbildung 5** Modell für die Ermittlung der maximal aufnehmbaren Zugspannung der Fasern in Abhängigkeit von der Auflast nach KÖLSCH, 1996

## 2.2 Transportprozesse und hydraulische Eigenschaften

Sowohl die flüssige als auch die gasförmige Phase strömen durch das poröse Medium Abfall. Das Modell bildet diese Mehrphasenströmung mit einem verallgemeinerten *Darcy*-Gesetz ab. In Abhängigkeit von der Sättigung der Phasen ist es möglich, die relativen Durchlässigkeiten zu bestimmen. Im Modell wird dies mit den Ansätzen nach *Brooks-Corey* oder *Van-Genuchten* durchgeführt. Im Teilprojekt D1 des SFB 477 durchgeführte Versuche von MÜNNICH, 2005 zeigen, dass die Permeabilität eine anisotrope Größe ist. Im Sinne einer mathematischen Beschreibung ist die Permeabilität daher keine skalare Größe sondern ein Tensor 2. Stufe. Die Hauptrichtungen des Permeabilitätstensors entsprechen anfänglich der Orientierung der Fasern und der hierzu senkrechten Richtung. Von großer Bedeutung für die Beschreibung der Sickerströmung sind neben der Permeabilität die residualen Sättigungen, die für Wasser- und Gasphase anzusetzen sind. Erst ab Sättigungen, die über der residualen Sättigung liegen, ist eine Strömung möglich.

Die hydraulischen Parameter sind nicht konstant sondern verändern sich in Abhängigkeit von der Deformation. Für die Ermittlung der aktuellen Porosität  $\phi_t$  gilt mit der Annahme einer inkompressiblen festen Phase

$$\phi_t = 1 + (\phi_0 - 1) \frac{V_0}{v_t} \quad (1)$$

mit der anfänglichen Porosität  $\phi_0$  und den anfänglichen und aktuellen Volumina  $V_0$  und  $v_t$ . Die aktuelle Permeabilität  $\mathbf{K}_{t,loc}$  wird in Abhängigkeit von der Ausgangs-Permeabilität  $\mathbf{K}_0$  und dem Verhältnis von aktueller und anfänglicher Porosität nach einem Vorschlag von EIPPER, 1998 berechnet

$$\mathbf{K}_{t,loc} = \mathbf{K}_0 \left( \frac{\phi_t}{\phi_0} \right)^\kappa \quad (2)$$

Mit dem Parameter  $\kappa$  ist die Nichtlinearität der Abhängigkeit einstellbar. Verformungen führen auch zu veränderten Hauptrichtungen der hydraulischen Leitfähigkeit, was einer Drehung des Permeabilitätstensors entspricht. Dies gelingt mit dem Rotationstensor, der verwendet wird, um die aktuelle Ausrichtung der Fasern zu bestimmen

$$\mathbf{K}_{t,glob} = \mathbf{R} \mathbf{K}_{t,loc} \mathbf{R}^T \quad (3)$$

Die Drücke der flüssigen und gasförmigen Phase,  $p_w$  und  $p_g$ , reduzieren die effektiven Spannungen die vom Korngerüst übertragen werden. Bei den hier vorliegenden ungesättigten Verhältnissen ist die Berechnung der effektiven Spannungen mit dem Ansatz von *Bishop* möglich

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} + p_g \mathbf{1} - \chi(p_g - p_w) \mathbf{1} \quad (3)$$

Für viele Materialien kann nach LEWIS und SCHREFLER, 1998 für den Parameter  $\chi$  die Sättigung der flüssigen Phase angesetzt werden.

### 2.3 Reaktionsprozesse

Für die Beschreibung der Reaktionen wurde zunächst in Zusammenarbeit mit dem Institut für Bioverfahrenstechnik ein detailliertes Modell entwickelt, das bis zu 30 Komponenten enthält (HAARSTRICK ET AL., 2001). Bereits bei der Entwicklung eines mit Transportprozessen gekoppelten Modells (HANEL, 2001) kommt das auf 2 Reaktionen reduzierte Modell nach Abb. 6 zur Anwendung, welches auch in der aktuellen Arbeit genutzt wird. Die erste Stufe des Reaktionsschemas umfasst Hydrolyse, Acidogenese und Acetogenese. In diesem Schritt reagiert organische Substanz mit Wasser zu Ethansäure, Kohlendioxid und Biomasse. Im zweiten Schritt, der Methanogenese, erfolgt die Bildung von Methan, Kohlendioxid, Wasser und Biomasse aus Ethansäure. Das Absterben der entstandenen Biomasse wird ebenfalls berücksichtigt.

1. Stufe: Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese 1 Organik + 0.31 H <sub>2</sub> O → 0.63 C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> + 0.46 CO <sub>2</sub> + 0.22 Biomasse [kg]
2. Stufe: Methanogenese 1 Essigsäure → 0.36 CH <sub>4</sub> + 0.29 CO <sub>2</sub> + 0.33 H <sub>2</sub> O + 0.02 Biomasse [kg]

**Abbildung 6** Zweistufiges Reaktionsmodell

Die Geschwindigkeiten der Reaktionen werden mit einer Monod-Kinetik berechnet. Die maximalen Reaktionsraten werden dabei in Abhängigkeit von Temperatur und Wassergehalt reduziert.

Für einzelne Komponenten wird ein Phasenwechsel berücksichtigt. So kann Wasser verdampfen und das Lösen von Kohlendioxid in der flüssigen Phase ist möglich.

Der Abbau der organischen Substanz bewirkt eine Verringerung der Partialdichte des Abfalls. Diese setzt sich zusammen aus der Dichte des Inertmaterials, also der nicht biologisch abbaubaren Substanz, der Dichte der Organik, der Biomasse und der flüssigen Phase. Die Dichte der Gasphase wird vernachlässigt

$$\rho_t = \rho_{inerts} + \rho_{org} + \rho_{bio} + \rho_w \quad (3)$$

Ohne Berücksichtigung abbaubedingter Setzungen führt dieses Vorgehen zu einer Entlastung des Deponiekörpers mit fortschreitendem Abbau und ist daher in dem in Abschnitt 4 gezeigten Beispiel noch nicht berücksichtigt.

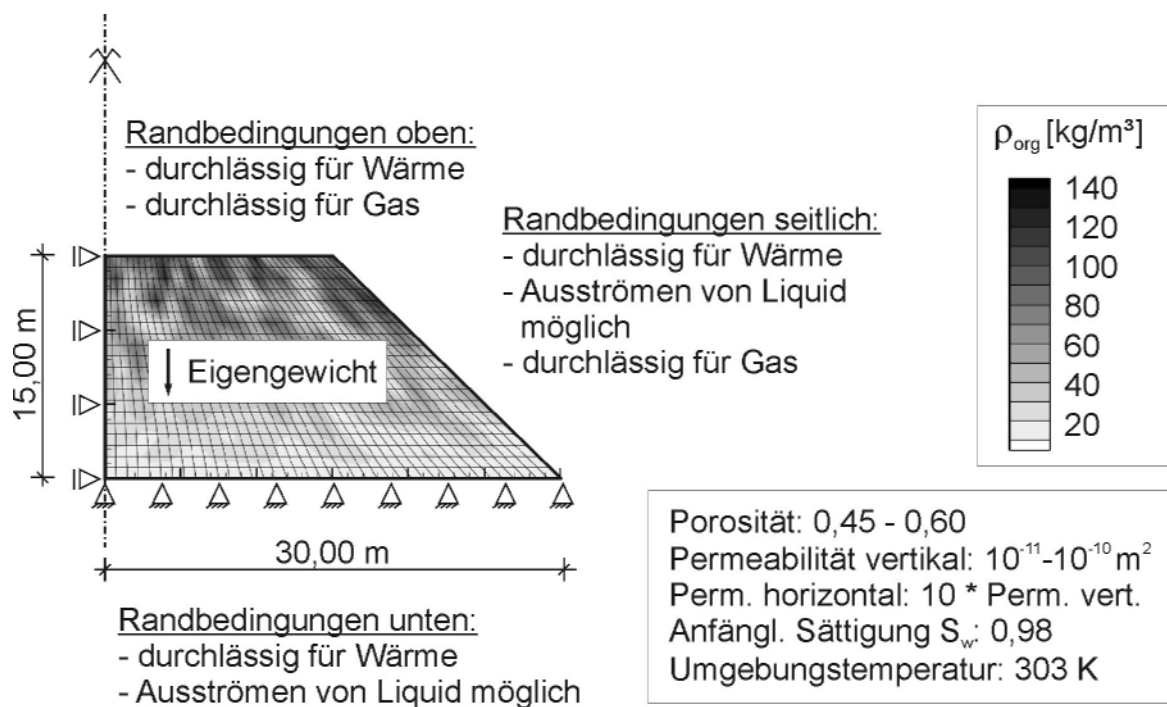


### 3 Numerische Umsetzung

Für die Lösung der nichtlinearen Gleichungen des PvV, der Massenbilanzen und der Energiebilanz ist die Anwendung eines numerischen Verfahrens erforderlich. Die räumliche Diskretisierung des PvVs erfolgt mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Unbekannte sind die Verschiebungen der Knoten. Zur Diskretisierung der Massenbilanzen und der Energiebilanz wird das Box-Verfahren nach HELMIG, 1997 verwendet. Unbekannte sind der Druck der flüssigen Phase, die Sättigung der Gasphase, der Massenanteil von Methan in der Gasphase, der Massenanteil von Ethansäure in der flüssigen Phase, die Temperatur, die Partialdichte der Organik und die Partialdichte der Biomasse. Um den gerichteten Charakter der konvektiven Strömung im Modell wiederzugeben, wird mit einem Upwind-Schema gearbeitet. Mit Hilfe des Newton-Raphson-Verfahrens werden stets alle Gleichungen simultan gelöst. Dieses Vorgehen entspricht einer starken Kopplung, was sich positiv auf die Konvergenz auswirkt. Alternativ dazu ist eine schrittweise Lösungsprozedur denkbar, in der Mechanik, Transport und Reaktion nacheinander gelöst werden. Dieser Ansatz wird in anderen Deponiemodellen, z.B. von McDUGALL, 2007, verfolgt.

### 4 Analyse einer Modelideponie

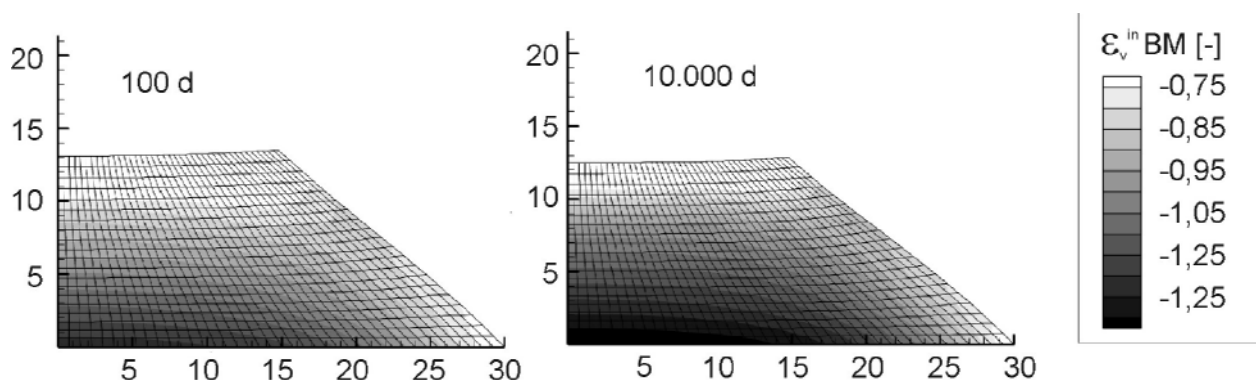
Beispielhaft wird eine Deponie gemäß Abb. 7 analysiert, um einen Teil der Möglichkeiten des Modells zu zeigen.



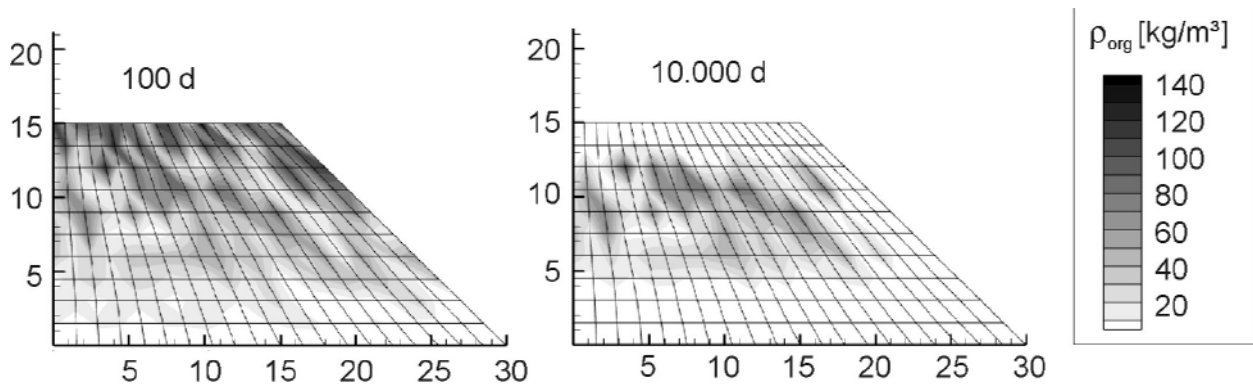
**Abbildung 7** Geometrie mit Rand- und Anfangsbedingungen der untersuchten Deponie

Im Verlauf der Simulation werden Verformungen, der Abbau von verteilter organischer Substanz, die Temperaturentwicklung und die Wassersättigung nach 100 Tagen und nach ca. 28 Jahren beobachtet. Unter Ausnutzung der Symmetrie ist nur der halbe Querschnitt der Deponie zu diskretisieren.

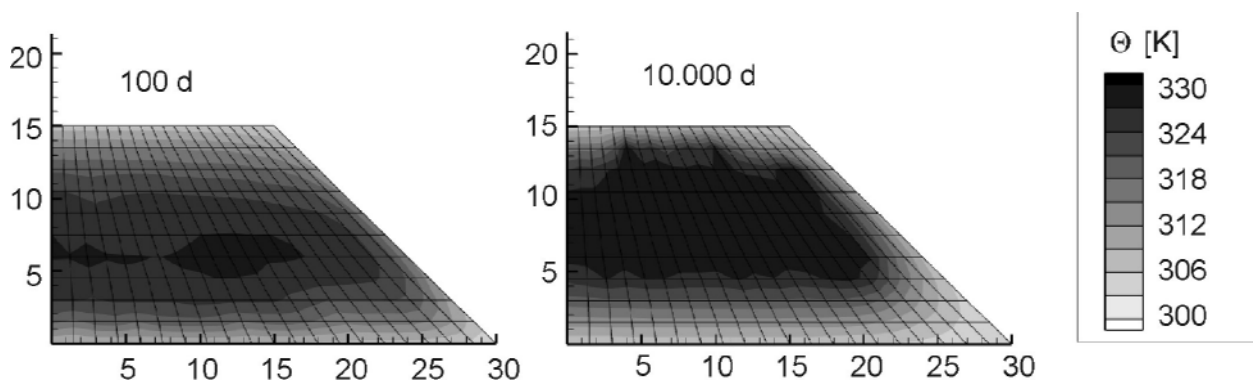
Abb. 8 zeigt, dass die Setzungen des Deponiekörpers zu Beginn aufgrund anwachsenden Eigengewichts sehr stark ansteigen. Es folgt eine Phase geringer Zunahme der Verformungen infolge von Kriechen. Der Großteil des Abbaus organischer Substanz erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt, wie die Darstellung der noch vorhandenen organischen Substanz nach 10.000 Tagen gemäß Abb. 9 zeigt. Die Modellbildung daraus folgender Setzungen ist Gegenstand aktueller Arbeiten. Das Kriechmodell der Grundmatrix ist zu erweitern, um diese Deformationen direkt abbilden zu können. Abb. 9 zeigt, dass die Reaktionsprozesse in den Randbereichen schneller verlaufen. Ursache hierfür ist die Temperaturentwicklung im Deponiekörper. Aus Abb. 10 ist ersichtlich, dass die Temperatur in einem großen Teil des Deponieinneren bis auf ca. 60°C ansteigt. Aufgrund des Einflusses der Temperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeiten wird der Abbauprozess in diesen Bereichen verlangsamt. Die Randbedingungen sind so vorgegeben, dass die entstehende Wärme am oberen, seitlichen und unteren Rand abfließen kann. Daher ist die Temperatur in den Randbereichen niedriger und die Reaktionen laufen dort mit höherer Geschwindigkeit ab. Wesentliche Parameter für den Transport der Wärme sind die Wärmeleitfähigkeit des Abfalls und die Wärmeübergangskoeffizienten. Das Beispiel veranschaulicht, welche große Bedeutung diesen Parametern zukommt. Abb. 11 zeigt das Absinken der Sättigung der flüssigen Phase beginnend von einem nahezu vollgesättigten Porenraum. Infolge der gesetzten Randbedingungen kann Sickerwasser am seitlichen und unteren Rand abfließen, während über andere Ränder kein neues Wasser infiltriert. Daher kommt es zum Absinken der Wassersättigung was sich über Einflussfunktionen ebenfalls auf die Reaktionen auswirkt.



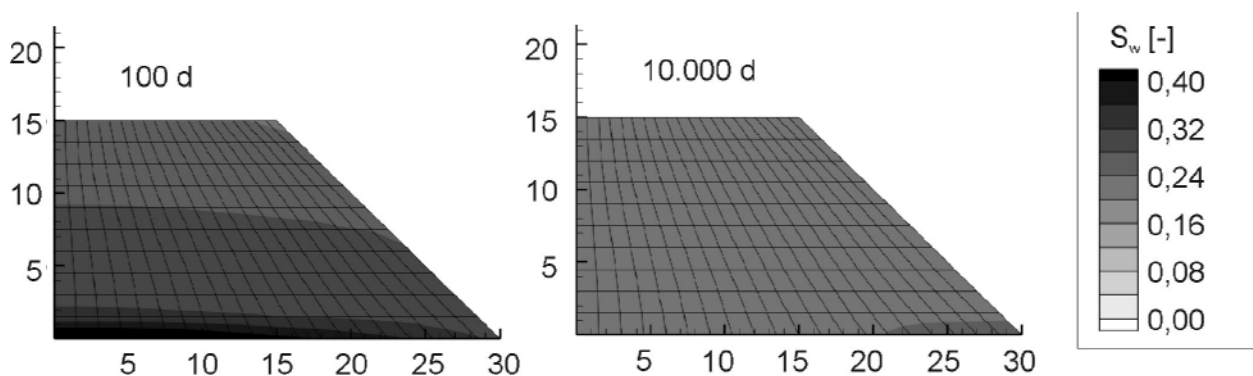
**Abbildung 8** Inelastische Volumenverzerrung



**Abbildung 9** Partialedichte Organik



**Abbildung 10** Temperatur



**Abbildung 11** Sättigung der flüssigen Phase

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wird ein Modell für Siedlungsabfalldeponien vorgestellt, das in der Lage ist, gekoppelte mechanische, hydraulische und biochemische Prozesse zu beschreiben. Ziel ist die Erarbeitung von Vorschlägen für Monitoringmaßnahmen und die Analyse des Langzeitverhaltens von Deponien. Bisher können spontane Verformungen infolge Last und zeitabhängige Verformungen infolge von Kriechen und Konsolidation beschrieben werden. Die Abbildung einer Mehrphasenströmung mit Phasenwechsel ist möglich. Reaktionsprozesse können mit einem zweistufigen Reaktionsschema beschrieben werden. Gegenwärtige Forschung konzentriert sich auf die direkte

Erfassung von abbaubedingten Setzungen mit Hilfe der Kopplung an das Reaktionsmodell. Das in Abschnitt 4 gezeigte Beispiel veranschaulicht, dass das Modell in der Lage ist, die bisher berücksichtigten Prozesse auf vergleichsweise großen Geometrien und über lange Zeiträume qualitativ gut wiederzugeben. Eine Beurteilung der quantitativen Ergebnisse ist nur mit der Kenntnis entsprechender Modell-Parameter und zugehöriger in-Situ-Messungen an Deponien möglich. Hierzu sind Parameterstudien und weitere experimentelle Untersuchungen erforderlich.

## 6 Literatur

- |  |      |  |
|--|------|--|
| de Boer  | 2005 | Trends in Continuum Mechanics of Porous Media. Springer.   |
| Deponieverordnung  | 2006 | Deponieverordnung vom 24. Juli 2002 (BGBl. I S. 2807), zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 13. Dezember 2006 (BGBl. I S. 2860)"            |
| Ebers-Ernst J.   | 2001 | Modellierung des inelastischen Verhaltens von Siedlungsabfalldeponien. Dissertation, Institut für Statik, TU Braunschweig.                                 |
| Ehlers W.  | 1995 | A single-surface yield function for geomaterials. Archive of Applied Mechanics, 65, S. 246-259.  |
| Eipper G.  | 1998 | Theorie und Numerik finiter elastischer Deformationen in fluidgesättigten porösen Festkörpern. Dissertation, Institut für Mechanik, Universität Stuttgart. |
| Haarstrick A., Hempel D. C., Ostermann L., Ahrens H., Dinkler D. | 2001 | Modelling of the biodegradation of organic matter in municipal landfills. In: Waste Management & Research, 19, S. 320-331                                  |
| Hanel J.   | 2001 | Modell zur Analyse von gekoppelten Transport- und Stoffabbauprozessen in Deponien. Dissertation, Institut für Statik, TU Braunschweig.                     |
| Helmig R.  | 1997 | Multiphase Flow and Transport Processes in the Sub-surface. A Contribution to the Modelling of Hydrosystems. Springer.                                     |
| Krase V., Dinkler D.   | 2007 | Modelling of Stress-Deformation Behaviour of Municipal Solid Waste. Proc. Sardinia 07, 11 <sup>th</sup> International Landfill Symposium, CISA, Cagliari.  |
| Kockel R.  | 1995 | Scherfestigkeit von Mischabfall im Hinblick auf die Standsicherheit von Deponien. Dissertation, Institut für Grundbau, Ruhr-Universität Bochum.            |

- Kölsch F. 1996 Der Einfluss der Faserbestandteile auf die Scherfestigkeit von Siedlungsabfall. Dissertation, LWI-Mitteilungen 133, TU Braunschweig
- Lewis R.W., Schrefler B.A. 1998 The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media. 2nd edition. John Wiley & Sons, Chichester.
- Manassero M., Van Impe W.F., Bouazza A. 1996 Waste disposal and Containment. Proc. 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Balkema, Rotterdam, Vol. 3, S. 1425-1474.
- McDougall J. 2007 A hydro-bio-mechanical model for settlement and other behaviour in landfilled waste. Computers and Geotechnics, 34, S. 229-246.
- Münnich K., Bauer J., Fricke K. 2005 Investigation on Relationship between Vertical and Horizontal Permeabilities of MBT Wastes. Proc. Sardinia 05, 10<sup>th</sup> International Landfill Symposium, CISA, Cagliari.
- Stegmann R., Heyer K.-U., Hupe K., Willand A. 2006 Deponienachsorge- Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge. Abschlussbericht, Förderkennzeichen (U-FOPLAN) 204 34 327, Umweltbundesamt

## 7 Danksagung

Unser Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung.

### **Anschrift der Verfasser(innen)**

Dipl.-Ing. Sonja Bente  
Dipl.-Ing. Volker Kruse  
Dr.-Ing. Ursula Kowalsky  
Prof. Dr.-Ing. Dieter Dinkler  
Institut für Statik  
Beethovenstraße 51  
D-38106 Braunschweig  
Telefon +49 531 391 3674  
Email: [sonja.bente@tu-bs.de](mailto:sonja.bente@tu-bs.de)  
Website: [www.statik.tu-bs.de](http://www.statik.tu-bs.de)