

Prognose der Setzungen und des Emissionsverhaltens von Deponien mit Hilfe eines numerischen Modells

Markus Robeck, Tim Ricken, Renatus Widmann

Universität Duisburg-Essen, Essen

Prognosis of landfill settlements and emission properties by a numeric model

Abstract

Worldwide, landfills are the most common way to dispose of waste, but have an impact on the environment, as they result in harmful gas and leachate production. Estimating the long-term behaviour of a landfill in regard to this gas production and organic degrading, as well as to settlement and waste water production, is of high importance for designers, landfill operators and public authorities. Therefore, a numerical model has been developed to simulate these processes.

The constitutive model is based on the multiphase Theory of Porous Media (TPM) (RICKEN & USTOHALOVA, 2005), (USTOHALOVA ET AL., 2004). The body under investigation consists of an organic and an inorganic phase as well as a liquid and a gas phase. The equations of the model are developed on the basis of a consistent thermo-mechanical approach including the momentum balance for the solid phase and the mixture, the energy balance for the mixture and the mass balance for the gas phase. All interactions between the constituents such as mass transfers, interaction forces and energy fluxes are taken into consideration.

The strongly coupled set of partial differential equations is implemented in the finite element code FEAP. The former 2-D model has now been enhanced to real 3-D landfill geometries.

Zusammenfassung

Weltweit ist die Deponierung von Abfällen die verbreitetste Art, Abfälle zu entsorgen. Gleichzeitig verursacht diese Art der Abfallentsorgung schädliche Einflüsse auf die Umwelt, die vor allem aus der Sickerwasser- und Gasproduktion entstehen. Das Langzeitverhalten einer Deponie in Bezug auf diese Gasproduktion und den organischen Abbau, sowie die Setzungen und Sickerwassermengen abschätzen zu können, ist sowohl für Planer und Deponiebetreiber, als auch für die Abfallbehörden und Gesetzgebung von hoher Bedeutung. Für eine möglichst realitätsnahe Simulation der Deponieprozesse wurde ein numerisches Modell entwickelt, welches im Folgenden beschrieben wird.

Das Berechnungskonzept basiert auf der Theorie poröser Medien (TPM) (RICKEN & USTOHALOVA, 2005), (USTOHALOVA ET AL., 2004), womit Mehrphasensysteme beschrieben werden können. Der hier betrachtete Deponiekörper besteht aus zwei festen Phasen – der organischen und anorganischen Phase, sowie aus zwei beweglichen Phasen – der Gas- und Wasserphase. Die Materialgleichungen des Modells sind thermodynamisch konsistent und beinhalten die Bilanz der Bewegungsgröße der Festkörperphase und der Mischung, die Bilanz der Energie der Mischung und die Bilanz der Masse der Gasphase. Alle Interaktionen zwischen den einzelnen Konstituierenden wie Massenaustausch, Interaktionskräfte und Energieaustausch sind dabei berücksichtigt.

Zur Lösung werden die stark gekoppelten Differenzialgleichungen in das „Finite Element Analysis Program“ FEAP implementiert. Mittlerweile ist das 2-D Modell auf die Anwendung realer 3-D Deponiegeometrien erweitert worden.

Keywords

Deponie, Deponiegas, organischer Abbau, Setzungen, Simulation, numerisches Modell, Theorie poröser Medien, Mehrphasensystem, Phasenumwandlung, Langzeitverhalten

Landfill, landfill gas, organic degradation, settlement, simulation, numerical model, theory of porous media, multiphase system, phase transition, long term behaviour

1 Einleitung

Bis zum 31. Mai 2005 wurden in Deutschland i.d.R unvorbehandelte Siedlungsabfälle auf Siedlungsabfalldeponien verfüllt, die durch die damit verbundenen biologischen Umsetzungsprozesse ein Emissionspotenzial aufweisen. Verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen geben unterschiedliche Zeiträume für den Abbau der vorhandenen Restemissionspotenziale nach Deponieabschluss an. Für Umweltwissenschaftler und Deponiebetreiber, aber auch für die Abfallbehörden und die Gesetzgebung ist es von großer Bedeutung, diese Umsetzungsprozesse quantifizieren und einschätzen zu können. Ein prozessorientiertes und auf experimentellen Untersuchungen gestütztes Hilfsmittel, mit dem das langfristige Emissionsverhalten des Deponiekörpers bewertet werden kann, kann einen maßgeblichen Beitrag leisten, das Risikopotential solcher ganzheitlichen Systeme besser abzuschätzen können. Damit können deponiespezifisch geeignete Lösungen gefunden werden, so dass die Nachsorgephase verkürzt werden kann. Von entscheidender Bedeutung ist hierbei die Wahl des passenden Zeitpunktes, ein geeignetes Oberflächenabdichtungssystem aufzubringen. Das bisherige Vorgehen, Deponien mittels Kombinationsabdichtung möglichst schnell zu versiegeln und damit das Emissionspotenzial zu erhalten, ist heute umstritten. Daher sollte die endgültige Oberflächenabdichtung erst aufgebracht werden, wenn das Restpotenzial soweit gesunken ist, dass die Gefährdung durch Emissionen für nachfolgende Generationen minimiert wird. Da eine Deponie abschnittsweise über längere Zeiträume aufgebaut wird, variieren biologische Abbauprozesse örtlich und zeitlich und somit auch das vorhandene Restpotenzial.

Mit Hilfe des entwickelten und bereits an realen Deponien validierten Modells kann das langfristige Emissionsverhalten von Siedlungsabfalldeponien simuliert und Abbaugrad, Gas- und Temperaturentwicklung sowie Setzungen örtlich und zeitlich aufgelöst werden. Damit können Empfehlungen für das (u. U. abschnittsweise) Aufbringen von Oberflächenabdichtungssystemen gegeben werden.

2 Deponieverhalten

Die Abfallzersetzung in Deponien ist ein komplexer Prozess und ständigen Veränderungen unterworfen. Viele wissenschaftliche Studien über Umsetzungsvorgänge im Abfall, mit dem Ziel, den Einfluss der Biodegradation zu ermitteln, wurden unter gut kontrollierbaren Bedingungen im Labor-, Technikums- und Feldmaßstab durchgeführt.

2.1 Sickerwasser

Sickerwasser entsteht hauptsächlich durch Niederschlag, der auf den Deponiekörper trifft und darin versickert. Zu einem geringeren Anteil entsteht Sickerwasser durch das im abzulagernden Abfall selbst enthaltene, gespeicherte Wasser. Ist das Niederschlagswasser bzw. ein Teil davon durch den gesamten Deponiekörper gesickert, das heißt, ist die Wasserhaltekapazität im Deponiekörper überschritten, wird es als Sickerwasser im Entwässerungssystem erfasst.

2.2 Deponiegasmenge

Zur Bemessungsgrundlage von Anlagenteilen muss der zeitliche Verlauf des Deponiegasanfalls hinreichend genau bekannt sein. Dies wird mit Hilfe von Prognosemodellen errechnet. Ausgangspunkt für diese Berechnung zur Ermittlung des Gaspotentials stellt meist der TOC-Gehalt des abzulagernden Materials dar. Der tatsächliche Verlauf der Gasmenge ist neben dem abzulagernden Material von vielen Faktoren wie Geometrie des Deponiekörpers, Oberflächenabdichtung, Einbaumenge pro Abschnittverfüllung, Verdichtungsgrad, Wassergehalt, pH-Wert, Abbaubarkeit des Kohlenstoffs, Temperatur, Entgasungssystem, etc. abhängig. Für eine genauere Betrachtung zum örtlichen und zeitlichen Verlauf der Vorgänge im Abfallkörper sind die häufig angewandten, i.d.R. recht einfachen Prognosemodelle ungeeignet, da die gegenseitige Beeinflussung der Faktoren in der Modellbildung meist unberücksichtigt bleibt.

2.3 Setzung

Unter Setzung wird hier die Verformung des Untergrundes unter Last sowie Sackung durch das Versagen der Eigenfestigkeit des abgelagerten Materials (Abfall) verstanden. Dies bedeutet, dass die Oberflächensetzung die Summe aus Setzung und Sackung, also Untergrundsetzung und Abfallverformung, bildet. Die Verformung, teilweise auch Setzung des Abfalls genannt, lässt sich nach Kurzzeit- und Langzeitsetzungen unterscheiden. Erstere erfolgt aufgrund der Verdichtung und Auflast und ist lastabhängig. Zweitere findet infolge von biologischen Abbauvorgängen und Entwässerungen statt, ist also zersetzungsabhängig und somit orts- und zeitabhängig.

2.4 Deponieabschluss

Der Deponiebetreiber hat für die Deponien in der Stilllegungsphase (also nach Ende der Ablagerung) Maßnahmen durchzuführen, die zukünftige negative Auswirkungen auf die Umwelt verhindern. Dieses beinhaltet insbesondere die Einrichtung eines Oberflächenabdichtungssystems (OFA) und das Aufbringen einer Rekultivierungsschicht. Nach Aufbringung einer Oberflächenabdichtung wird die Gasentwicklung abnehmen, da infolge der Abkapselung keine weitere Feuchtigkeit eingetragen und damit die biologische Aktivität unterbunden wird. Der Deponiekörper wird mumifiziert, wobei das Restemissionspotenzial langfristig erhalten bleibt. Wird die Oberflächenabdichtung im Laufe der Zeit undicht, setzen biologische Prozesse wieder ein und es kommt zu weiteren – in diesem Falle höchstwahrscheinlich unkontrollierten – Emissionen.

Eine derartige Vorgehensweise im herkömmlichen Sinne beinhaltet – im Widerspruch zur grundsätzlichen Übertragung des Ziels der bundesdeutschen Abfallgesetzgebung – die Übertragung von Umweltproblemen auf zukünftige Generationen. Hauptkritikpunkte an diesen OFA sind neben der Erfordernis der „ewigen“ Instandhaltung vor allem die langfristige Konservierung der biologisch verfügbaren Abfälle, wodurch das Emissions- und Setzungspotenzial auf Dauer erhalten bleibt.

3 Modell für die Beschreibung des Deponieverhaltens

Die biologischen, chemischen und physikalischen Vorgänge im abgelagerten Abfall beeinflussen sich gegenseitig stark und können nur mit Hilfe von gekoppelten Differentialgleichungen beschrieben werden. Zur Simulation der Transport- und Umsetzungsprozesse im Deponiekörper wurde ein numerisches Modell entwickelt, welches auf der Theorie poröser Medien (TPM) basiert. Die Theorie poröser Medien wurde zur Beschreibung von Mehrphasensystemen entwickelt und wird heute bereits erfolgreich unter anderem in den Gebieten des Grundbaus oder der Biomechanik angewendet. Da es sich bei Deponien ebenfalls um ein Mehrphasensystem handelt, wurde das Modell hierauf adaptiert.

Die Theorie poröser Medien basiert auf der Mischungstheorie, eingeschränkt durch das Konzept der Volumenanteile (Abbildung 1). Der Mischungstheorie liegt die Annahme zu Grunde, dass sich die Bestandteile (Konstituierenden α) des Körpers vollständig vermengen, jedoch nicht molekular vermischen. Das heißt, die heterogene Verteilung der Konstituierenden α wird auf der mikroskopischen Ebene innerhalb eines Volumenelements dv durch Verschmierung der einzelnen Konstituierenden homogenisiert. Mit dem Konzept der Volumenanteile wird der Kontrollraum als Kontinuum bestehend aus einzelnen Partialvolumen dv^α ($dv^\alpha = n^\alpha * dv$, mit n^α als Volumenanteile) der Konstituierenden α betrachtet, welche in ihrer Summe wiederum den gesamten Kontrollraum ausfüll-

len. Dadurch wird die Verbindung zwischen mikro- und makroskopischer Ebene hergestellt. Die Festkörperphase beschreibt das Gebiet, welches durch den für die Festkörperphase materiellen und die beweglichen Phasen immateriellen Rand begrenzt ist.

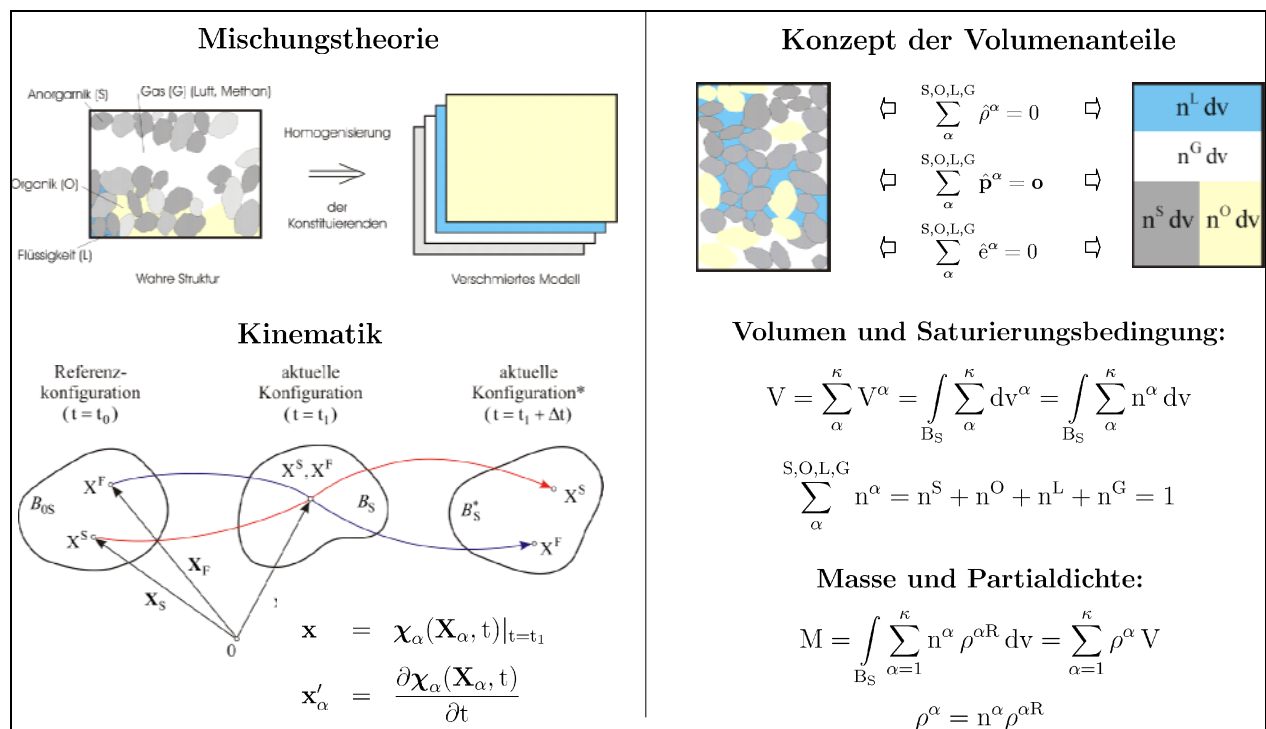


Abbildung 1: Grundlagen der Theorie poröser Medien

Der Deponiekörper wird als ein poröses Phasensystem mit einer organischen ($\alpha=O$) und anorganischen ($\alpha=S$) Festkörperphase, einer Gasphase ($\alpha=G$) und einer Flüssigkeitsphase ($\alpha=L$) beschrieben. In diesem ersten Modellbeschreibungsansatz wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Liquidphase in der Festkörperphase enthalten ist, also als Bestandteil der Festkörperphase idealisiert ist. Die Phasen werden wie in Abbildung 1 zu sehen ist, über den betrachteten Kontrollraum verschmiert. Das heißt, es findet eine Homogenisierung der wahren Struktur statt. Jeder Punkt des Kontinuums wird eindeutig durch den Vektor $\mathbf{x}(\mathbf{X}_\alpha, t)$ beschrieben, wobei \mathbf{X}_α den Ortsvektor in der Referenzkonfiguration und t die Zeit kennzeichnet und mit dessen Ableitung nach der Zeit sich die Geschwindigkeit \mathbf{x}'_α ergibt.

Die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Konstituierenden wie Massenaustausch (z.B. biologische Umsetzung), Interaktionskräfte (z.B. Reibungskräfte) und Energieaustausch (z.B. Wärmeproduktion aus biologischer Umsetzung) werden berücksichtigt. Die beschreibenden Feldgleichungen werden auf der Basis von kontinuumsmechanischen Grundgleichungen abgeleitet, bestehend aus den Bilanzen der Bewegungsgröße und der Energiebilanz jeweils für die gesamte Mischung und den Massenbilanzen für die festen und mobilen Phasen. Zusätzlich müssen in dem Satz der Feldgleichungen die physikalischen Zwangsbedingungen berücksichtigt werden, wie die Saturierungsbedin-

gung und die Bedingung, dass die Summe der Interaktionsgrößen sich gegenseitig zu null ergänzt.

Damit das Gleichungssystem geschlossen werden kann, ist es notwendig, konstitutive Beziehungen einzuführen (DE BOER ET AL., 2003) (RICKEN & USTOHALOVA, 2005), welche die thermodynamische Konsistenz erfüllen müssen. Die wesentlichen konstitutiven Beziehungen müssen für die Spannungen, die Interaktionskräfte, den Wärmetransport und den Massenaustausch formuliert werden.

Der organische Massenaustausch beschreibt die Änderungen in der organischen Phase durch die bakterielle Aktivität. Nach Monod (Monod, 1942) ist die Abbaurrate der organischen Substanzen negativ proportional zu der Wachstumsrate der Bakterien und somit zur Methangasproduktionsgeschwindigkeit. Die biologischen Reaktionsprozesse hängen ab von der aktiven Biomasse, der Temperatur und der Substratkonzentration, definiert als partielle Dichte der feuchten organischen Masse. Der organische Massenaustausch beschreibt somit die Änderungen in der organischen Phase durch die bakterielle Aktivität, bei der die organische Substanz abgebaut und in Gas umgewandelt wird. Je mehr organischer Abfall im Deponiekörper vorhanden ist, desto mehr Deponiegas wird durch die bakterielle Aktivität produziert, in Abhängigkeit vom Wärme- und Feuchtegehalt.

Es wurde ein numerisches Berechnungskonzept entwickelt, mit dem die Bewegung der festen Phasen, der Druck der Gasphase, die Temperatur der Mischung und die bakterielle Umwandlung (Massenaustausch) des organischen Materials in ein Gasgemisch (Biogas) aus Methan und Kohlendioxid beschrieben werden kann. Die numerische Implementierung der kontinuumsmechanischen Formulierungen wird mit Hilfe der finiten Element Methode (FEM) durchgeführt und mittels des Berechnungsprogramms FEAP (Finite Element Analysis Program) ausgewertet. Zur Verifizierung des numerischen Modells wurde das Langzeitverhalten von Deponiekörpern simuliert.

Mit dem Modell können die wesentlichen Prozesse innerhalb des Deponiekörpers gekoppelt berechnet werden. Als Randbedingungen können die äußere Temperatur, Druck und die Verschiebung vorgegeben werden.

4 Numerische Simulation einer Deponie

Bei einer realitätsnahen numerischen Simulation wird die Geometrie der Deponie als 3-D Abbildung digitalisiert, woraus repräsentative 2-D Schnitte gewonnen werden können. Des Weiteren muss der zeitliche und räumliche Verlauf der Abfallablagerung nachgebildet werden, woraus der geometrische Aufbau resultiert. Hierzu sollten möglichst Daten über die Abfallmengen und deren Qualität sowie die räumlich zeitliche Verteilung beispielsweise aus jährlichen Vermessungsplänen der Deponie bekannt sein. Der abgelag-

gerte Abfall kann dann bspw. lagenweise in Jahresschritten in den abgebildeten Deponiekörper gelegt und somit die Deponie abschnittsweise entsprechend der Realität nachgebildet werden.

In den folgenden Abbildungen, welche in der Höhe überhöht dargestellt sind, ist die grafische Ausgabe für die Parameter Temperatur, Organikgehalt und Setzung als Beispiel einer Deponiesimulation erkennbar. Hier wurde wie erwähnt der Aufbau einer Deponie realitätsnah nachgebildet und anschließend die Simulation für repräsentative Schnitte durchgeführt. Der Verfüllzeitraum betrug ca. 30 Jahre inkl. abschließender Profilierungsarbeiten zur temporären Oberflächengestaltung mit inertem Material bzw. Zwischenlagerung von Bodematerial.

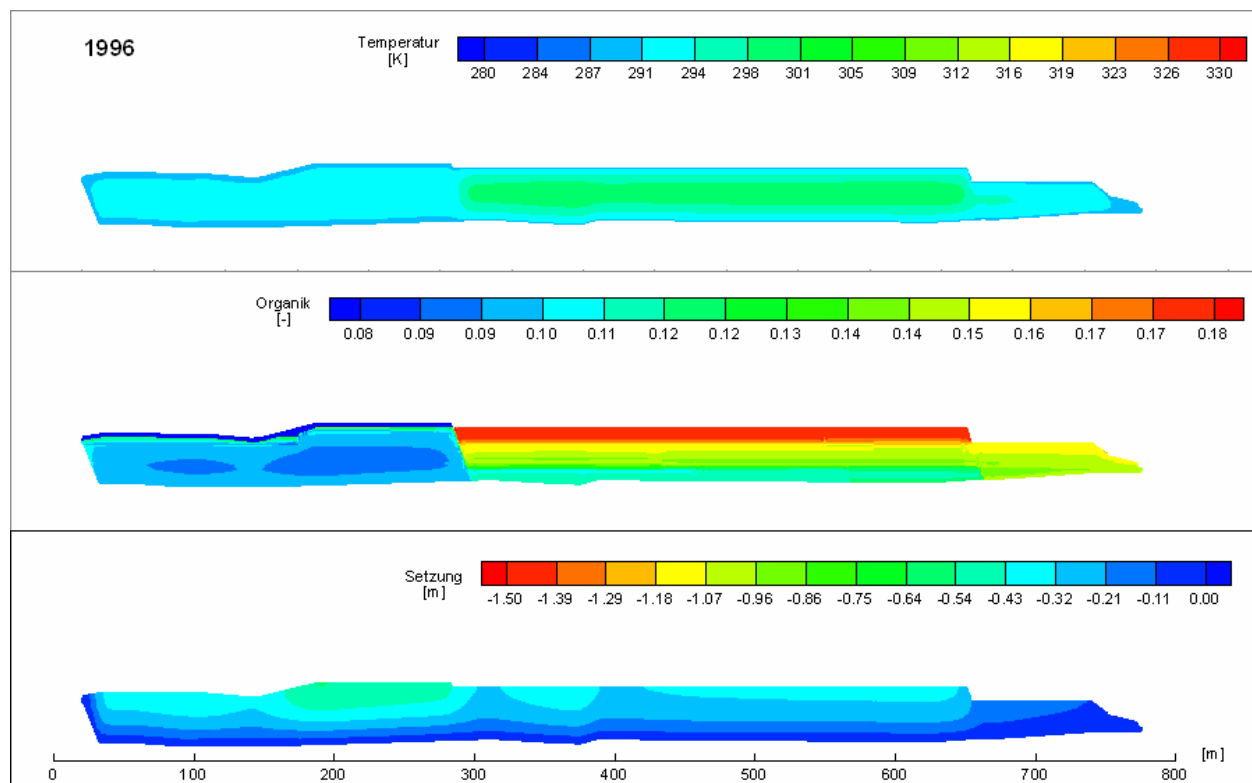


Abbildung 2: Temperatur-, Organik- und Setzungsverlauf 1996

Der Vergleich der Abbildung 2 und Abbildung 3 lässt erkennen, dass sich die Deponie in Abbildung 2 im Jahr 1996 noch in der Verfüllphase befindet. Der relativ große Unterschied des Organikgehalts zwischen dem linken Drittel und dem Rest resultiert in erster Linie aus der wesentlich späteren Verfüllung des rechten Teils. In diesem Schnitt wurde die Deponie zeitlich nicht kontinuierlich von links nach rechts verfüllt, sondern es wurden in einem mehrjährigem Zeitraum Bereiche davor bzw. dahinter liegend geschüttet. Aus den Jahren 2006, 2016 und 2026 wird deutlich, wie die Organik örtlich und zeitlich immer weiter abgebaut und in Deponiegas umgewandelt wird – zu erkennen am Farbverlauf (von rot mit hohem Organikgehalt zu blau mit niedrigerem Organikgehalt).

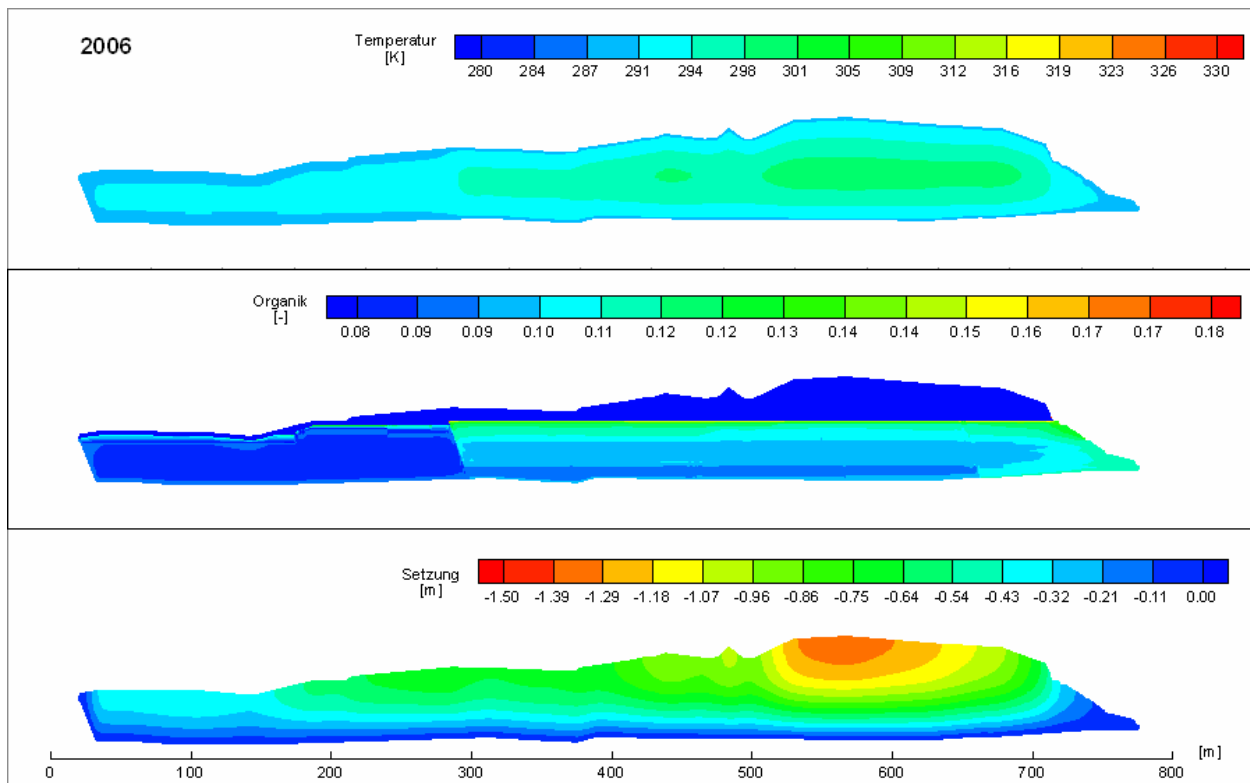


Abbildung 3: Temperatur-, Organik- und Setzungsverlauf 2006

Die vor dem Jahr 2006 aufgebrachte Profilierungsschicht bzw. Zwischenlagerung von inertem Boden ist ebenfalls am niedrigen Organikgehalt (blau) deutlich zu erkennen und hat bei der biologischen Umsetzung aufgrund fehlender Organik keinen Anteil an der Gasbildung.

In den Abbildungen sind die teilweise ungleichmäßigen Setzungen zu erkennen, die unter anderem aus unterschiedlichem Aufbau, Auflasten oder Abbaugraden resultieren. Die Untergrundsetzungen sind dabei außer acht gelassen. Des Weiteren lassen sich auch die Gasdruckverläufe bzw. –geschwindigkeiten darstellen, aus denen letztlich die Deponiegasmenge berechnet werden kann, welche über die Oberfläche austritt.

Mit entsprechend repräsentativ gelegenen Schnitten kann die Deponie somit realitätsnah abgebildet werden mit einem umfangreichem Überblick über alle relevanten Parameter – und zwar nach Zeit und Ort aufgelöst.

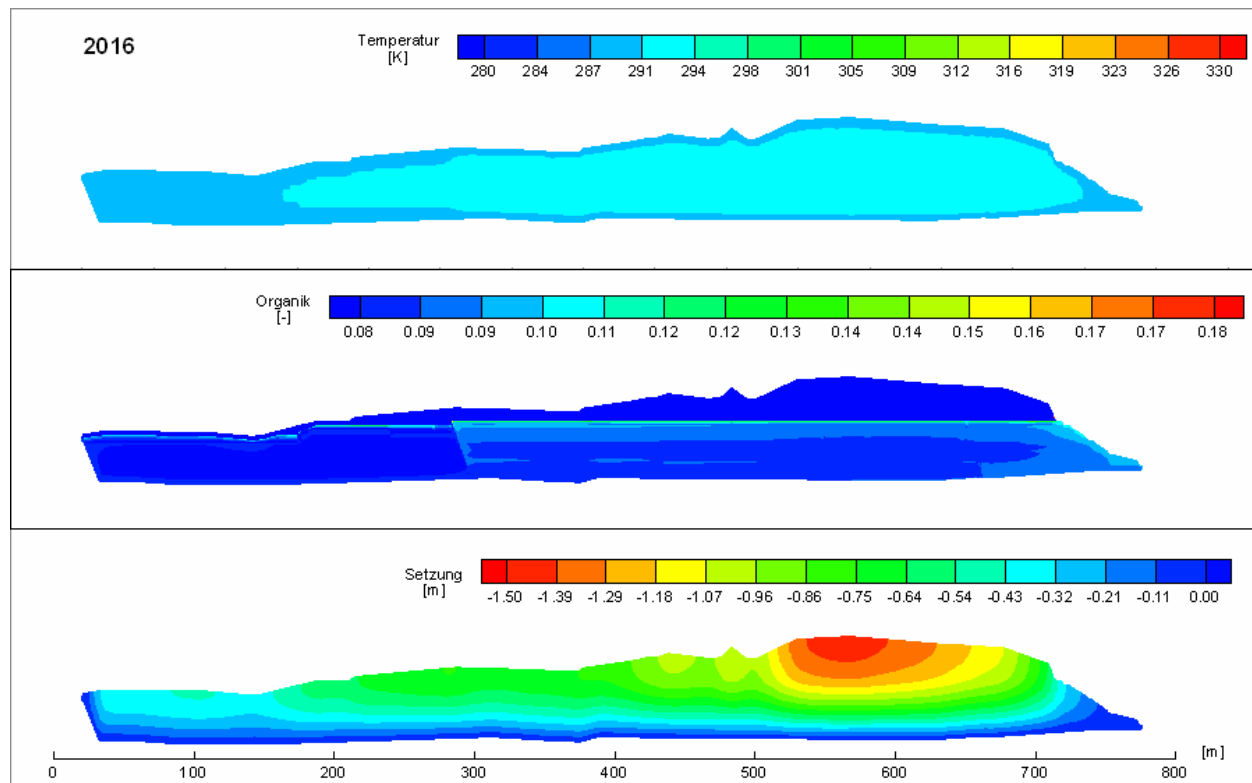


Abbildung 4: Temperatur-, Organik- und Setzungsverlauf 2016

Daraus lässt sich erkennen, welche Bereiche der Deponie sich noch in einer Aktivphase und welche sich schon in einer Passivphase befinden. Daraus kann ein differenziertes Vorgehen bei der Aufbringung von Oberflächensystemen abgeleitet werden, welches auf die Situation der einzelnen Deponie und deren Abschnitte individuell angepasst ist. Es kann gezielt entschieden werden, welche Bereiche beispielsweise nach und nach von der aktiven Entgasung entkoppelt und in ein passives System mit möglicher Methanoxidation überführt werden oder welche Bereiche bereits die passive Phase verlassen haben und aufgrund weitestgehender biologischer Inaktivität ein endgültiges Oberflächensystem erhalten können. Des Weiteren kann abgeleitet werden, ob es für Altbereiche, die möglicherweise über keine aktive Entgasung verfügen bzw. deren Entgasungssystem defekt ist, noch sinnvoll ist, ein neues Entgasungssystem zu installieren oder ob die zu erwartenden Gasmengen zu gering sind.

5 Zusammenfassung

Das dargestellte Modell ist ein leistungsstarkes Instrument zur Simulation der Umsetzungsprozesse einer Deponie und den daraus resultierenden Emissionen sowie Setzungen und kann als wichtige Entscheidungshilfe für Planer, Deponiebetreiber oder Behörden dienen. Vor allem die detaillierte Auflösung der Prozesse nach Raum und Zeit erlaubt ein differenzierteres Vorgehen bei der Beurteilung des langfristigen Deponiever-

haltens als herkömmliche, meist einfache Prognosemodelle, welche i.d.R. keine gekoppelte Berechnung der wichtigsten Parameter erlauben

6 Literatur

- | | | |
|---------------------------------|------|---|
| de Boer, Bluhm, Wähling, Ricken | 2003 | Phasenübergänge in porösen Medien", Forschungsbericht, Universität Duisburg-Essen |
| Monod, J. | 1942 | "Sur l'expression analytique de la croissance des populations bactériennes", en collaboration avec F. Morin, Rev. Scient., 5, pp. 227-229. |
| Ricken, T., Ustohalova, V., | 2005 | Modelling of thermal mass transfer in porous media with applications to the organic phase transition in landfills, Computational Materials Science 32, Issues 3-4, 498-508. |
| Ustohalova, Ricken, Widmann | 2004 | Kalkulierbares Risiko – Das Emissionsverhalten von Siedlungsabfalldeponien soll mit einer prozeßorientierten, experimentell abgesicherten numerischen Simulation langfristig abgeschätzt werden, Müllmagazin, S. 8-13, 2004 |

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. Markus Robeck
Universität Duisburg-Essen
Fachgebiet für Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft
Universitätsstraße 15
45141 Essen

Prof. Dr.-Ing. Tim Ricken
Universität Duisburg-Essen
Computational Mechanics
Universitätsstraße 15
45141 Essen

Prof. Dr.-Ing. Renatus Widmann
Universität Duisburg-Essen
Fachgebiet für Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft
Universitätsstraße 15
45141 Essen