

Modellierung physikalischer und biologischer Umsetzungsvorgänge in Deponien als wichtiger Bestandteil der in situ Stabilisierung zur Abkürzung der Stilllegungs- und Nachsorgephase

1 Einleitung

Ein beträchtlicher Anteil an der globalen Erwärmung in den vergangenen 50 Jahren, verursacht durch Emissionen von Kohlendioxid, Methan und anderer Treibhausgase, wird dem Handeln des Menschen zugeschrieben. Hausmülldeponien, die einen Anteil am anthropogenen Methan von ca. 13 % bilden, tragen somit maßgebend als globale Emissionsquelle zum Treibhauseffekt bei. Die Hauptkomponenten von Deponiegas Methan und Kohlendioxid sind Produkte der biologischen Aktivitäten im abgelagerten Abfall, der ständigen Veränderungen unterworfen ist. Ein Methanmolekül besitzt ein 21-faches spezifisches Treibhauspotential im Vergleich zu einem Kohlendioxidmolekül.

Die energetische Nutzung von Methan aus Deponiegas wird unter den Experten als erneuerbare Energie gesehen und stellt einen wesentlichen Beitrag zum Klima- und Umweltschutz dar, solange diese sich wirtschaftlich abbilden lässt. Die Effizienz der üblichen Deponiegasfassung wird im Schnitt mit 40 bis 80 Prozent des erzeugbaren Gases angenommen. Eine Alternative zur Erhöhung der Methangasausbeute und weitgehender effizienter Biomasseumsetzung des gesamten Abfallkörpers stellt eines der innovativen Stabilisierungsverfahren DEPO⁺ dar, die in der Zukunft als ein wichtiger Bestandteil des langzeitigen Deponiemanagements gesehen werden kann.

Als ein komplexes Ingenieurbauwerk ist die Deponie während der Phasen der Naturraumsondernutzung (Ablagerungs-, Stilllegungs- und Nachsorgephase) vielen Einwirkungen ausgesetzt. Die komplexen Umsetzungsprozesse im Deponiekörper können sich über die Zeitspanne von 100 Jahren erstrecken, was eine experimentell gestützte Vorhersage des Verhaltens praktisch undurchführbar macht.

Für Umweltwissenschaftler und Deponiebetreiber, aber auch für die Abfallbehörden und die Gesetzgebung ist es von großer Bedeutung, die Umsetzungsprozesse verbunden mit langen wirtschaftlich nicht kalkulierbaren Nachsorgezeiträumen in einem Langzeitmasstab zu quantifizieren und einzuschätzen. Der gegenwärtige theoretische Kenntnisstand, geknüpft an praktische Erfahrungen bezüglich des Langzeitverhaltens dieser Systeme, ist jedoch gering. Kenntnisse über die zeitliche Entwicklung der Menge und Zusammensetzung des gebildeten Deponiegases sind grundlegend für weitere Optimierung des Anlagemanagements. Flexible Werkzeuge, die kurz- und langfristige Vorhersage der Gasbildung erlauben, sind von Kernbedeutung für Bestimmung der Art und voraussichtlicher Dauer des Betriebes und Kontrolle des Systems. Ein prozessorientiertes und auf experimentellen Untersuchungen gestütztes Hilfsmittel, mit dem das Emissionsverhalten des Deponiekörpers bewertet werden soll, könnte einen maßgeblichen Beitrag leisten, das Verhalten und das Risikopotential solcher ganzheitlichen Systeme in der Stilllegungs- und Nachsorgephase unter Miteinbeziehung von verschiedener Szenarien der Stabilisierungsmaßnahmen besser abzuschätzen.

In diesem Beitrag wird ein Modell vorgestellt, das beschreibt, wie die Zusammensetzung und die Porenstruktur des Deponiekörpers die Umsetzungsprozesse, den Gas-, den

Wärmetransport und die Setzungen beeinflussen und wie das Modell in das Langzeitmanagement der Deponie eingebunden werden kann. Dieses zweidimensionale konzeptionelle Modell gestützt auf den neusten theoretischen und praktischen Kenntnissen des Verhaltens von abgelagertem Abfall wurde zur Simulation des langzeitigen Emissionsverhaltens eines theoretischen Deponiekörpers angewendet. Im Folgenden werden die biologischen sowie die physikalisch-chemischen Prozesse erläutert und darauf aufbauend der Modellaufbau präsentiert. Des Weiteren werden die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen vorgestellt.

2 Langfristige Managementstrategie - Einflussfaktoren

Die Entwicklung einer Strategie zum Deponiemanagement erfordert die Berücksichtigung von vielen Faktoren, die den Prozess der Abfalldegradation beeinflussen. Dabei müssen sowohl die Bedingungen in dem Abfallkörper (Abfallablagerung, -zusammensetzung, -alter, Grad der Biodegradation) als auch externe Effekte wie Klima und hydrologische Verhältnisse in Betracht gezogen werden. Der Prozess der optimierten Planung legt den Fokus auf die Betriebssteuerung inklusive Kontrolle, Installation von Sicherheitssystemen zur Unterbindung der Schadstofffreisetzung sowohl im Kurzzeitmassstab (Betriebsdauer) als auch im Langzeitmassstab. Weiterhin sind die Kostennutzenanalyse, soziale und institutionelle Faktoren untrennbare Bestandteile der langzeitigen Managementstrategie.

3 Abfallkörper – Zusammensetzung und ablaufende Prozesse

Die auf Siedlungsabfalldeponien abgelagerten Abfälle bestehen aus einem Gemisch von organischen und anorganischen Feststoffen, die mit verschiedenen Feuchtegehalten inhomogen im Deponiekörper verteilt sind, des Weiteren aus Flüssigkeiten und Gase und diverse bakteriellen Stämme. Der Zeitmaßstab der Abfallumsetzung variiert stark sowohl in Abhängigkeit von der Abfallart (chemische und physikalische Zusammensetzung) als auch von den Bedingungen, die im Deponiekörper herrschen.

Die feste Phase besteht aus der anorganischen (mineralische und Kunststoffbestandteile verschiedener Form und chemischer Zusammensetzung) und organischen Phase, die sowohl aktive Mikroorganismen (Biofilm) als auch organisches Material in verschiedenen Phasen der Umsetzung beinhalten. Die Hohlräume zwischen den festen Partikeln sind mit wässriger Lösung verschiedener chemischer Verbindungen und einem Gasgemisch (Hauptgase CH_4 , CO_2 und Wasserdampf) gefüllt (siehe Abbildung 3.1). Der Wassertransport hängt von der Gravitation und Kapillarität ab. Die Struktur der festen Phase ist bestimmend für Transport und Retention der Wärme, des Wassers und der Gase. Die Zusammensetzung der Gasphase ist eng mit der Temperatur, der chemischen Zusammensetzung der festen und flüssigen Phase und dem bakteriellen Umsetzungsgrad der organischen Masse verbunden.

Im Falle von starken Verdichtungseffekten im Abfall in tieferen Schichten des Deponiekörpers nimmt u.a. die Gasgängigkeit ab, was zu einer Erhöhung des partiellen Gasdruckes führt. Dieser Effekt führt zu einem reduzierten, teilweise bis gegen Null tendierenden Abbau biogener Organik im Deponat. Das Deponat erkaltet, die Abbautätigkeit geht weiter zurück.

Als eins der der wichtigen Ziele der Beendigung der Nachsorgephase ist die komplette Umsetzung der Organik im Deponat und somit deren Stabilisierung zu gewährleisten. Dies ist die Aufgabe der in situ Stabilisierungsverfahren.

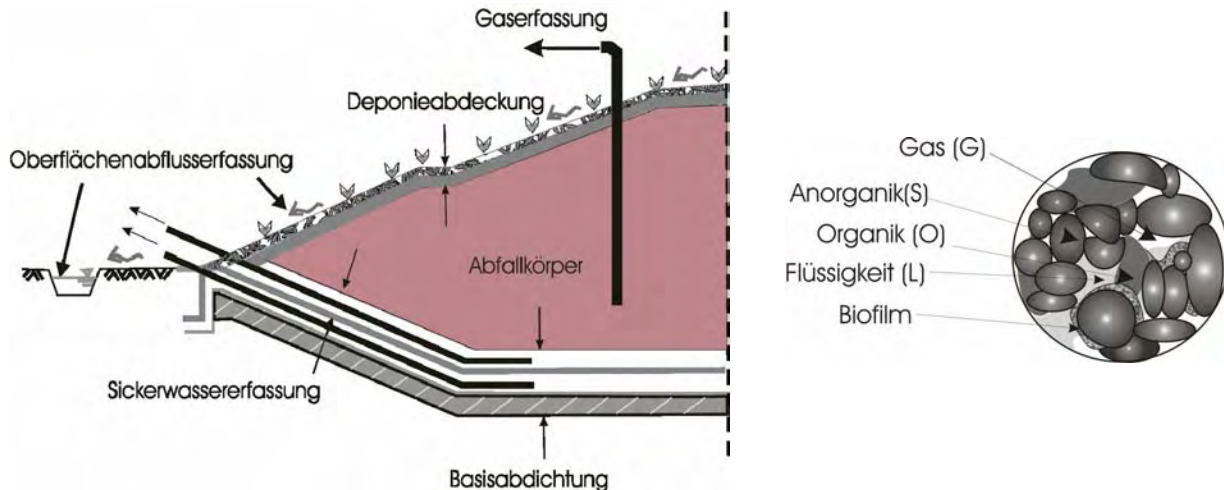


Abbildung 3.1: Abfallkörper und Abfallzusammensetzung

4 Modelaufbau - Implementierung der realen physikalischen Bedingungen in das Modell

Die biologischen, chemischen und physikalischen Vorgänge in dem abgelagerten Abfall sind eng miteinander verbunden. Die Umsetzung und Setzungen sind mit der Änderung der Volumina und Geometrie des Porenraumes verbunden. deshalb sind diese nur mit Hilfe von gekoppelten Differentialgleichungen (Formulierungen von Bilanzgleichungen) mechanisch zu beschreiben. Im Folgenden wird für ein besseres Verständnis der Modellaufbau ohne den theoretischen mathematischen und numerischen Hintergrund erläutert.

Für interessierte siehe Ustohalova et. al, 2004, Kalkulierbares Risiko - das Emissionsverhalten von Siedlungsabfalldeponien soll mit einer prozessorientierten, experimentell abgesicherten numerischen Simulation langfristig abgeschätzt werden. Müllmagazin ISSN 0934-3482, RHOMBOS-VERLAG, 1/2004, 1. Quartal.

4.1 Modellvorstellung – Vereinfachung der Realität

Der abgelagerte Abfall wird als ein poröser Körper betrachtet. Es wird die Annahme getroffen, dass das Material aus einer kompressiblen Gasphase und einer materiell inkompressiblen Festkörper-, Organik- und Liquidphase besteht (siehe Abbildung 4.1). In diesem ersten Modellbeschreibungsansatz wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Flüssigkeitsphase in der Festkörperphase (organische und anorganische feste Phase) enthalten ist, also als Bestandteil der Festkörperphase idealisiert ist. Des Weiteren wird angenommen, dass die anorganische feste Phase nicht in den Massenaustausch miteinbezogen wird, dass heißt, es werden keine Stoffe freigesetzt oder aufgenommen.

Wir nehmen an, dass die immobilen (festen) Phasen die gleiche Bewegung aufweisen.

Der Modellaufbau basiert auf der Theorie Poröser Medien eingeschränkt durch das Konzept der Volumenanteile. Dabei wird angenommen, dass sich die Bestandteile des Deponiekörpers vollständig vermengen, das heißt, die heterogene Verteilung der Konstituierenden (einzelnen Phasen) wird innerhalb des Abfallkörpervolumens homogenisiert. Mit dem Konzept der Volumenanteile wird der Kontrollraum als Kontinuum bestehend aus einzelnen konstituierenden – Phasen - betrachtet. Die Festkörperphase beschreibt den Raum, welcher durch den für die Festkörperphase materiellen (organische und anorganische feste Bestandteile) und die beweglichen Phasen (Gas und Flüssigkeit) immateriellen Rand begrenzt ist. Die einzelnen Phasen besitzen ein reales Volumen. Der Mischkörper besteht aus einer anorganischen Festkörperphase (S), einer organischen Festkörperphase (O), einer Flüssigphase (L) und einer Gasphase (G). Die Flüssigkeits- und Gasphase besetzen die Poren im Inneren des Festkörpers und können den Raum im Gegensatz zur Festkörperphase verlassen. In dem Konzept der Volumenanteile werden die Volumenanteile zur Bestimmung des Partialvolumens der Konstituierenden - Phasen - im Verhältnis zum Gesamtvolumen (siehe Abbildung 4.1) dargestellt.

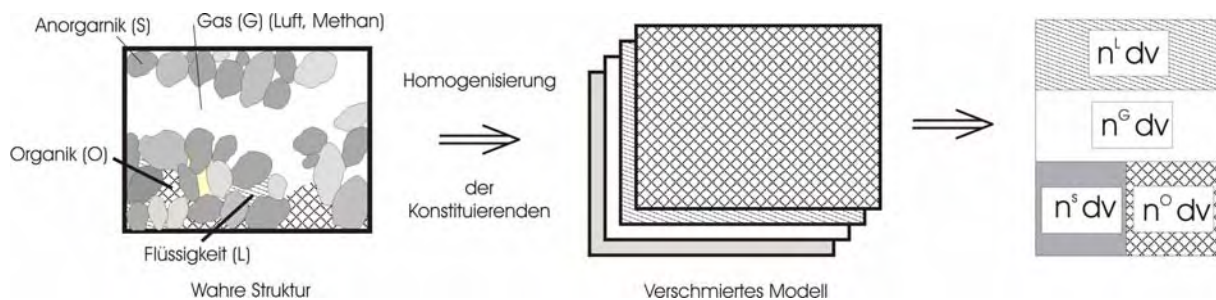


Abbildung 4.1: Die reale Abfallzusammensetzung und das Konzept der Volumenanteile

4.2 Beschreibung der einzelnen Prozesse

4.2.1 Wasser und Gastransport

Wasser und Gasströmung in einer Deponie können vereinfachend als Versickerungsvorgang begriffen werden. Die Flüssigkeitsphase sickert über die Abfallpartikel und Gas migriert durch den restlichen Porenraum. Gastransport in einer Deponie ist primär durch den Druckgradienten bestimmt (Konvektion). Die Gaspermeabilität ist gleichzeitig von dem Wassergehalt abhängig. Der Konzentrationsgradient (Diffusion) spielt eine unterordnete Rolle. Je mehr organischer Abfall im Deponiekörper vorhanden ist, desto mehr Deponiegas wird durch die bakterielle Aktivität produziert. Gasmoleküle haben die Tendenz zu expandieren und füllen schnell den vorhandenen Raum aus oder migrieren weiter durch die für Gas zugänglichen Poren des Abfallkörpers und der Abdeckschicht. Der organische Massenaustausch (Umsetzung der im Abfall vorhandenen Organik durch bakterielle Aktivität) hängt von der Substratkonzentration (definiert als Dichte der organischen Masse), sowie von der aktiven Biomasse (Bakterien), der Temperatur und des vorhandenen Gasdruckes ab.

4.2.2 Wärmetransport

Wärme im Abfall entsteht vor allem durch die bakterielle Aktivität. Die Wärmeleitfähigkeit des porösen Materials hängt von den Voluminaproportionen und Dichte der Komponenten, als auch von der Größe und Anordnung der einzelnen festen Partikeln ab. Wärmetransport findet vor allem in der festen und flüssigen Phase und über deren Kontaktgrenzflächen statt. Der Dampf in der Gasphase trägt zur Wärmeleitfähigkeit bei.

4.2.3 Setzungen

Die Setzungen infolge der biologischen Abbauprozesse entstehen durch Volumenreduktion bei Überführung der biologisch verfügbaren organischen Abfallbestandteile in die Gasphase, wenn infolge einer Schwächung des Stützgerüsts Hohlräume zusammenbrechen (Sackungen).

4.2.4 Massenaustausch, bakterielle Aktivität

Der organische Massenaustausch beschreibt die Änderungen in der organischen Phase durch die bakterielle Aktivität. Naturgemäß vorhandene Mikroorganismen wie Bakterien wandeln je nach der Verfügbarkeit die organische Substanz um. Die im Deponiekörper abgelagerten Abfälle beinhalten einen bestimmten Anteil an organischen, leicht bis schwer abbaubaren Verbindungen. Die biologischen Reaktionsprozesse hängen ab von der aktiven Biomasse, der Temperatur und der Substratkonzentration.

Die biologische Aktivität hängt stark von dem Wassergehalt ab. Die Hauptaufgabe der Umsetzung der organischen Masse besteht darin, Energie und Zellsubstanzkomponenten (Metabolite) zu gewinnen. Dabei werden als Nebenprodukte Gase und andere chemische Verbindungen in das Milieu ausgeschieden. Als Beiprodukte des Metabolismus entstehen nicht verwertbare Energie (Wärme) und nicht verwendbare Komponenten wie Methan und Kohlendioxid im Spezialfall des anaeroben Umsetzungsprozesses (siehe Abbildung 4.2).

Die Nährstoffe können nur in gelöster Form im Wasser aufgenommen werden. Die Mikroorganismen haften an der Oberfläche der festen Phase und bilden einen sog. Biofilm. Die bakterielle Aktivität ist konzentriert auf der Schnittstelle zwischen der festen und flüssigen Phase. Hier laufen alle biologische Reaktionen bei der Umsetzung der organischen Masse ab. Anaerobe Umsetzung der organischen Substanz, das heißt deren Mineralisierung bei gleichzeitiger Methanproduktion läuft in einzelnen Stufen ab, wo verschiedene Bakterienstämme, je nach der Stufe, dominant sind (siehe Abbildung 3.1).

Die zeitgemäß gebauten Deponien sind über eine längere Zeitspanne abschnittsweise verfüllt. Die einzelnen Umsetzungsphasen können deshalb in verschiedenen Deponieabschnitten gleichzeitig eintreten. In der präsentierten numerischen Simulation der Umsetzungsprozesse wurde eine realitätsnahe und für die Praxis wichtige Phase, die stabile Methanphase mit konstantem pH-Wert gewählt.

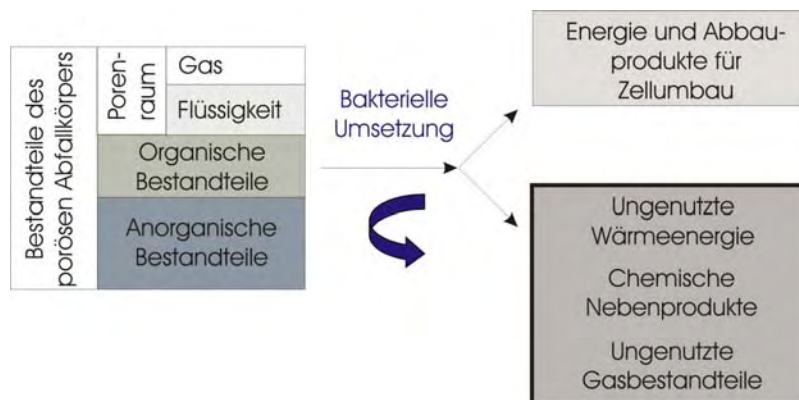


Abbildung 4.2: Bakterielle Umsetzung

4.2.5 Die numerische Simulation

Für die numerische Simulation wurde ein theoretisches Beispiel gewählt, das jedoch auf praktische Kenntnisse gestützt aus Untersuchungen von mechanisch biologisch vorgebehandeltem Abfall.

Ein Deponiekörper von 180 m Länge und 32 m Abfallablagehöhe wurde berechnet. Die Diskretisierung und die Dimensionen des ermittelten Kontrollraumes (Deponiekörper) sind der Abbildung 4.3 entnommen. Es wurden die Umsetzungsprozesse, Wärmetransport und Setzungen in einem abgedeckten Deponiekörper, gefüllt mit MBA Abfall, simuliert. In diesem Fall ist der Anteil der organischen Masse niedrig. Durch eine hohe Abdichtung des MBA Materials, ist der Porenraumvolumenanteil gering. Dies hat eine geringe Gaswegsamkeit zur Folge. Des Weiteren wurde angenommen, dass der Wassergehalt im ganzen Deponieraum als homogen verteilt angenommen werden kann. Die Volumenanteile der einzelnen Phasen wurden so gewählt, dass sie möglichst nah an den Werten lagen, die in der Praxis ermittelt wurden: Volumenanteil der festen anorganischen Phase - 45%, Volumenanteil der festen organischen Phase - 17%, Wasservolumenanteil - 30%, mit Gas gefüllter Porenraum - 5%. Im Vordergrund stand dabei die Qualität der Widerspiegelung der zeitlichen Entwicklung der realen Prozesse. Gemäß den Randbedingungen wurde angenommen, dass der Kontrollraum des Deponiekörpers für die Gasphase nur am oberen Rand durchlässig ist. Für den Wärmetransport ist die gesamte Grenze des Kontrollraumes frei. Die Anfangsbedingungen wurden wie folgt definiert: die Temperatur der Deponieumgebung liegt bei einem konstanten Wert von 283 K (ca. 10°C). Die Anfangstemperatur in dem Deponiekörper beträgt 300 K (ca. 23°C). Für die Auswertung wurde der zu berechnete Kontrollraum diskretisiert (siehe Abbildung 4.3). Es wurde mit einer Zeitspanne von 100 Jahren gerechnet.

Grundsätzlich ist die Steuerung des Prozesses von der Temperatur, dem Wassergehalt, der organischen Bestandteile und der Gasphase abhängig. In der Abbildung 4.3 sind Beispiele für eine punktuelle Entwicklung in der Mitte des Deponiekörpers zu sehen. Die zeitliche Entwicklung der Größen weist eine starke Korrelation auf. Der Anstieg der

Gasvolumenfraktion hängt mit der Abnahme der organischen Volumenfraktion zusammen, weil die organische Substanz als Ernährungssubstrat (Edukt) für die gasproduzierende Organismen dient. Durch die bakterielle Aktivität entsteht Wärme, welche das Maximum in der Zeit der maximalen Umsetzungsrate erreicht. Der Setzungsprozess weist in der Zeit der maximalen Gasproduktion und somit auch extrem hohen Gasdruckwertes einen positiven Wert auf.

In der Abbildung 4.4 sind Beispiele der 2D Simulation zu sehen. In dem vertikalen Schnitt können die räumliche Variabilität und die Transportprozesse sehr exakt verfolgt werden. Am Anfang sind der Abbau der organischen Phase, der Umsetzungsprozess, und somit auch die hohen Temperaturen in der Mitte am stärksten ausgeprägt. Je weniger an organische Masse vorhanden ist, desto niedriger ist die Umsetzungsrate und Temperatur. Die Prozesse verlaufen später intensiver weiter entfernt von der Mitte. Es findet der Wärmetransport in Richtung auf die Ränder statt. Mit der Zeit kommt es dann zum Abklingen der Umsetzung und die Temperaturen sinken.

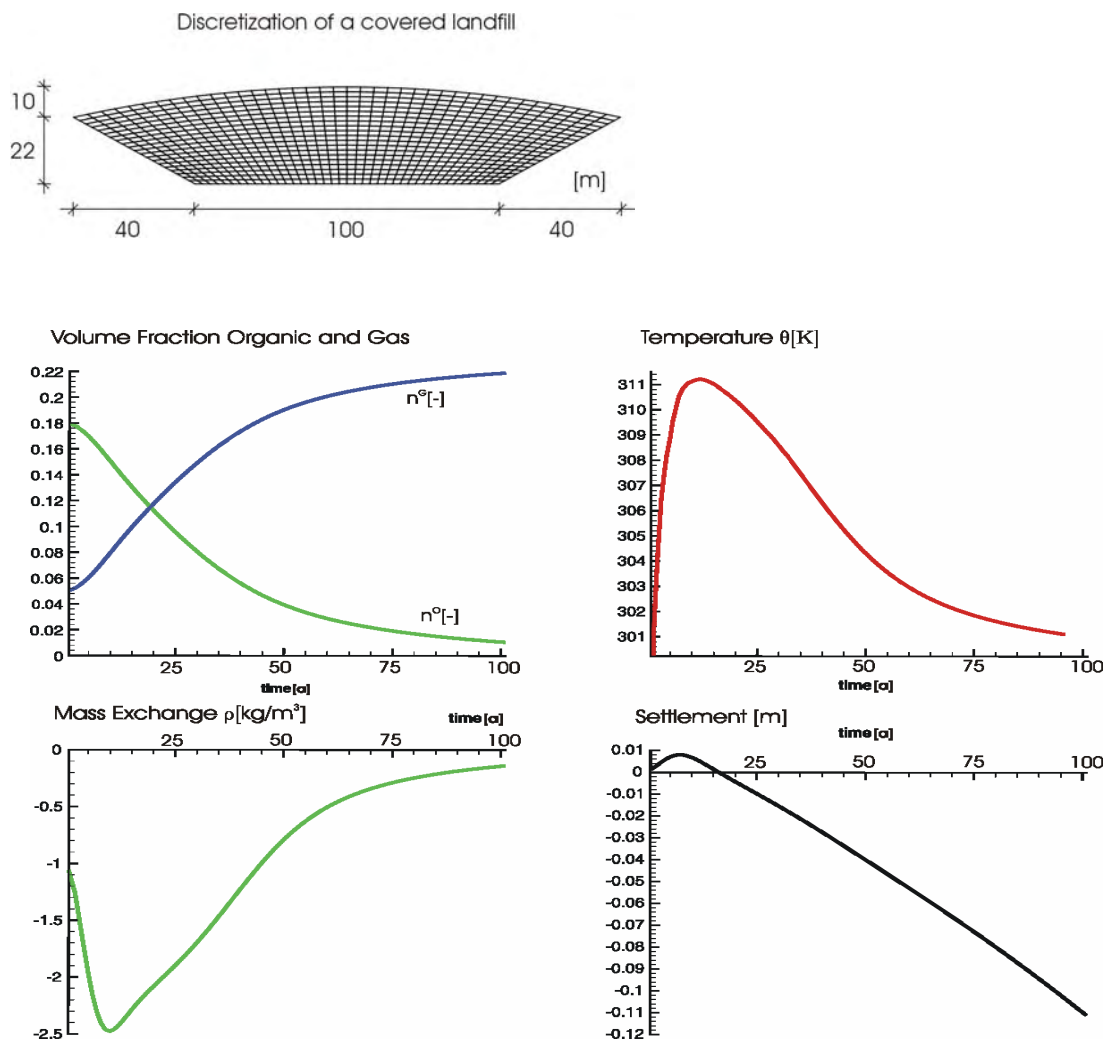


Abbildung 4.3: Diskretisierung und Dimensionen des Abfallkörpers und die punktuelle Entwicklung von Gasproduktion, Organikabbau, Temperatur, Massenaustausch und Setzungen bezogen auf die Zeit

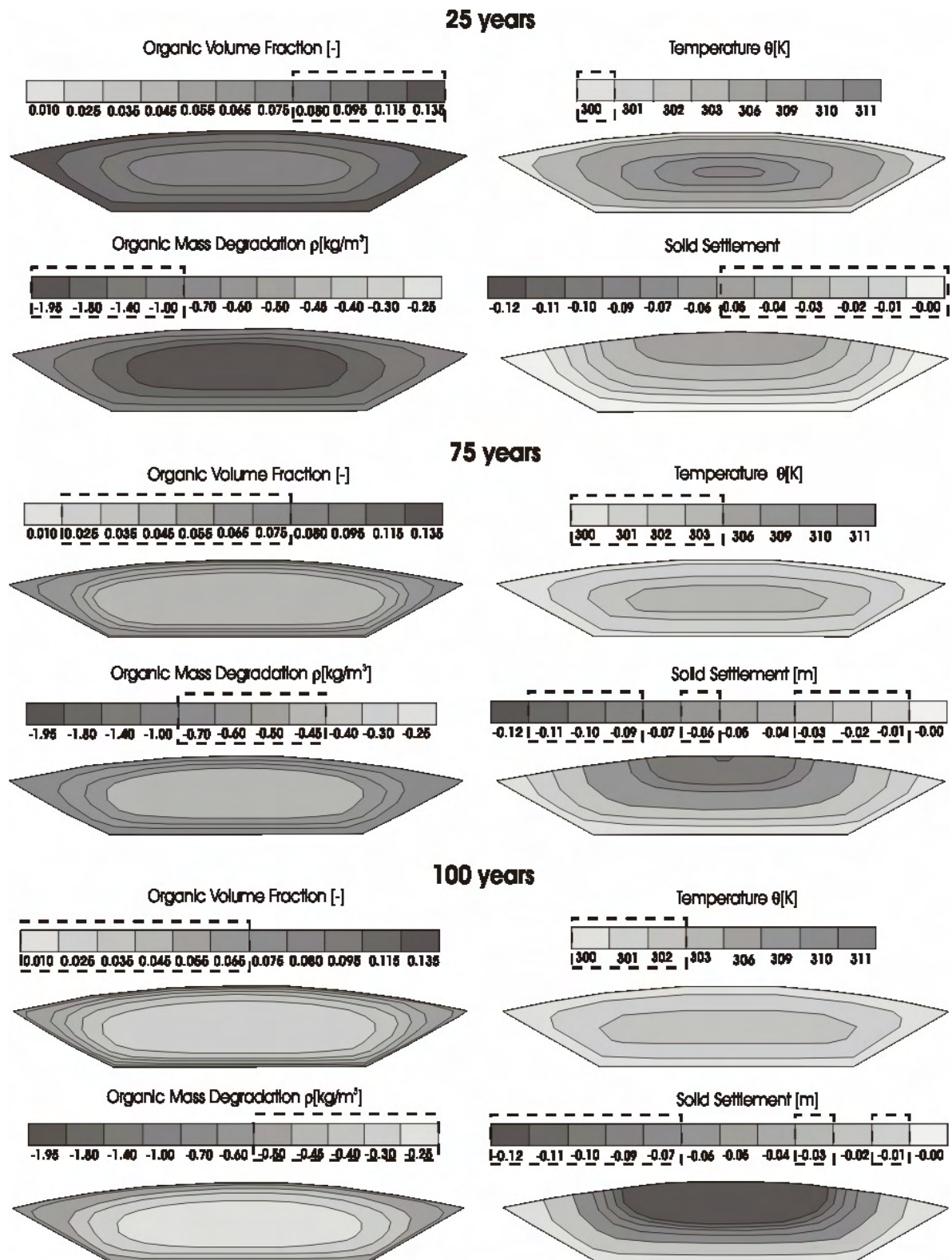


Abbildung 4.4: 2D Simulation: Entwicklung von Gasproduktion, Organikabbau, Temperatur, Massenaustausch und Setzungen

Die hier angestellte Betrachtung bezieht sich auf einen Modelldeponiekörper, der ohne

jegliche Beeinflussung (z.B. in situ Stabilisierungsmaßnahme) sich selbst überlassen bleibt.

5 Zusammenfassung

Ziel der Arbeit war es, aufgrund einer präzisen Analyse der realen Prozesse, die im abgelagerten Abfall ablaufen, ein vielseitiges Instrument zu entwickeln, mit dem das Emissionspotential der Deponie unter sich ändernden Bedingungen im Langzeitmaßstab beurteilt werden kann.

Zur Simulation der Transport- und Umsetzungsprozesse im porösen Deponiekörper wurde ein numerisches Konzept entwickelt. Das untersuchte Material ist ein Mehrphasensystem, das aus der organischen und anorganischen festen Phase mit definiertem Wassergehalt und der Gasphase besteht. Es wurde vorerst ein mathematisches Konzept entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich ist, die Setzung und Druck der Gasphase, die Temperatur des Abfallgemisches und die Umsetzung des organischen Materiales in ein Gasgemisch aus Methan-Kohlendioxid durch bakterielle Aktivität in der stabilen Methanphase zu beschreiben. Das numerische Konzept der präsentierten Arbeit wurde durch Berechnung von Beispielen getestet und es wurde geprüft, ob gefundenen Werte mit der realen zeitlichen Entwicklung der Prozesse qualitativ übereinstimmen. Die Ergebnisse der numerischen Simulation der gekoppelten Prozesse haben eine sehr gute Plausibilität gezeigt. Zu dieser Problematik wurden bis jetzt viele empirische Modellansätze entwickelt, aber nur wenige Verfahren sind bekannt, die sich auf das Konzept der Kontinuumsmechanik stützen. Es konnte bewiesen werden, dass die komplexen Prozesse im Deponiekörper mit Hilfe der Theorie poröser Medien mit den getroffenen Annahmen gut zu simulieren sind.

Die Wartung der Deponie in der Zeit der Sonderraumnutzung muss sorgfältig geplant werden. Die Validierung bzw. die Einbindung des Modells zur Aussage über das Langzeitverhalten ist standortspezifisch und muss für jede konkrete Deponie mit Hilfe von Kenntnissen über den abgelagerten Abfall durchgeführt werden.

Ein prozessorientiertes Modell kann als ein wichtiges Stützelement bei der Planung von Deponiebau, Ablaufplanung des Betriebes und der Nachsorge sowie der Abschätzung der voraussichtlichen Dauer gesehen werden. Durch Berechnung von verschiedenen Szenarien und deren Vergleich untereinander, kann die optimale Lösung zur Betriebssteuerung gefunden werden.