Universität für Bodenkultur
Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt
Institut für Abfallwirtschaft

ÖKOBILANZIERUNG UNTERSCHIEDLICHER ABDECKSZENARIEN VON SIEDLUNGSABFALLDEPONIEN

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

eingereicht von

Gerald Duscher, Bakk.techn.

Stud. Kennz. 427. / Matr. Nr.: 0540214

Wien, 2014

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Marion Huber-Humer und Dipl.-Ing. Andreas Pertl für die Unterstützung und Betreuung bei der Verfassung der vorliegenden Masterarbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Rüdiger Schneider für die Bereitstellung benötigter Daten bedanken.

Ein außerordentlicher Dank gilt meinen Eltern Dolores und Manfred Duscher, die mir das Studium ermöglichten und in allen Lebenslagen beiseite stehen.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meiner Freundin Juliane für ihre Geduld und ihr Verständnis in mühevoller Zeit.

Gerald Duscher, Bakk.techn.

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist, eine vergleichende Ökobilanz unterschiedlicher Abdeckszenarien einer Modelldeponie für Siedlungsabfälle zu erstellen. Der Betrachtungszeitraum beträgt insgesamt 50 Jahre (20 Jahre temporäre Abdeckung - laut Deponieverordnung 2008 maximal zulässige Dauer der temporären Abdeckung; 30 Jahre endgültige Abdeckung).

Für den Übergang zur endgültigen Abdeckung wurden 3 Szenarien – das Belassen der temporären Abdeckung (1,5 m Evapotranspirationsschicht) als Referenzszenario, die Erhöhung der Abdeckung auf 2,5 m Mächtigkeit und die Aufbringung einer Abdeckung mit Dichtelement gemäß Deponieverordnung – hinsichtlich ihres Treibhauspotenzials untersucht. Die Ökobilanzierung wurde nach der internationalen Normenreihe DIN-EN-ISO 14040ff (2006) erstellt. Des Weiteren wird eine grobe Kostenabschätzung der Szenarien betrachtet.

Das Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ verursacht im Bilanzierungszeitraum die geringsten Auswirkungen auf den Treibhauseffekt. Unter Berücksichtigung des Restmethanpotenzials dieses Szenarios, das nach Abdichtung einer Deponieoberfläche im Deponiekörper verbleibt und erst in späteren Zeiträumen (in dieser Arbeit außerhalb des Bilanzierungszeitraums) entstehen bzw. freigesetzt werden kann, verursacht dieses Szenario jedoch die größten, das Referenzszenario wiederum die geringsten Auswirkungen auf den Treibhauseffekt. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die Emissionen des Materialtransports keine Auswirkungen auf das Ergebnis haben, der Sickerwasseranfall sowie die Methanemissionen hingegen das Ergebnis stark beeinflussen.

Das Szenario „Evapotranspirationsschicht - 2,5 m“ stellt unter den in dieser Arbeit getroffenen Annahmen die kostengünstigste Variante dar. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Kosten zeigen jedoch, dass aufgrund der großen Schwankungsbreiten der Kosten keine allgemeinen Aussagen hinsichtlich der Kosteneinstufung gemacht werden können, sondern diese einzelfallbezogen betrachtet werden müssen.

Abstract

The aim of this thesis is to create a comparative LCA of different scenarios of cover layers on a model landfill for municipal solid waste. The observation period is 50 years (20 years temporary cover - according to the Austrian Landfill Ordinance 2008 maximum duration of temporary cover; 30 years final cover).

For the transition to the final covering 3 scenarios were investigated regarding their global warming potential: leaving the temporary layer (evapotranspiration layer – 1.5 m) as the reference scenario; increasing the thickness of the layer to 2.5 m; applying a layer with a sealing element according to the Landfill Ordinance (DVO 2008). The LCA was created according to the international standard series DIN-EN-ISO 14040 (2006). Furthermore the financial impact was assessed by means of a rough cost estimate.

The scenario "cover with sealing element according DVO" causes in the accounting period the least impact on the greenhouse effect. Taking into account the residual methane emission potential of this scenario that remains after sealing a landfill surface in the landfill body and can be released in later periods (in this work outside of the accounting period), however, this scenario causes the greatest, the reference scenario the least impact on the greenhouse effect. The results of the sensitivity analysis show that the emissions of the material transport have no effect on the result, however, leachate accumulation and methane emissions strongly affect the result.

The results of the cost analysis show that the scenario "evapotranspiration layer - 2.5 m" under the given assumptions in this work is the least expensive option. The results of the sensitivity analysis of the costs, however, show that due to the large fluctuation of costs no general clear statements can be made in terms of cost classification, the specific situation must be regarded.

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.

1.1 PROBLEM- UND ZIELDEFINITION DER ARBEIT 10

1.2 FORSCHUNGSFRAGE 10

2 GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK 12

2.1 UMWELTAUSWIRKUNGEN VON SIEDLUNGSABFALLDEPONIEN 12

2.1.1 Abbauprozesse in Deponien 12

2.1.1.1 Aerobe Abbauprozesse in Deponien 13

2.1.1.2 Anaerobe Abbauprozesse in Deponien 14

2.1.2 Deponiegas 15

2.1.2.1 Zusammensetzung und Umweltrelevanz des Deponiegases 15

2.1.2.2 Bildung von Deponiegas 16

2.1.2.3 Verwertung und Beseitigung von Deponiegas 17

2.1.3 Sickerwasser aus Deponien 18

2.2 TEMPORÄRE DEPONIEOBERFLÄCHENABDECKUNG 20

2.3 METHANOXIDATION 21

2.3.1 Methanoxidationsschicht 23

2.4 EVAPOTRANSPIRATIONSSCHICHT (WASSERHAUSHALTSSCHICHT) 26

3 MATERIAL UND METHODEN 29

3.1 ÖKOBILANZIERUNG 29

3.2 MODELLIERUNG DES DEPONIEKOMPARTIMENTS 30

3.2.1 Deponiegasprognose 30

3.2.2 Sickerwasserprognose 36

3.3 UNTERSUCHUNGSRAHMEN UND SYSTEMGRENZEN 36

3.3.1 Zeitliche Charakterisierung 37

3.3.2 Räumliche Charakterisierung 38

3.3.3 Technische Charakterisierung 38

3.4 FUNKTIONELLE EINHEIT 38

3.5 SZENARIENBESCHREIBUNG 39

3.6 WIRKUNGSKATEGORIEN UND -INDIKATOREN 39

4 SACHBILANZ 41

4.1 TEMPORÄRE ABDECKUNG 41

4.1.1 Errichtung der temporären Abdeckung 41

4.1.1.1 Materialienherstellung 42

4.1.1.2 Transport 42

4.1.1.3 Aufbringen der temporären Abdeckung 42

4.1.2 Emissionen der Deponie 43

4.1.2.1 Deponiegas 43

4.1.2.2 Sickerwasserbehandlung 45

4.1.3 Monitoring 46

4.2 REFERENZSZENARIO „EVAPOTRANSPIRATIONSSCHICHT – 1,5 M“ 47

4.2.1 Emissionen der Deponie 48

4.2.1.1 Deponiegas 48
4.2.1.2 Sickerwasserbehandlung 48
4.2.2 Monitoring *48*
4.3 SZENARIO „EVAPOTRANSPIRATIONSSCHICHT – 2,5 M“ 48
4.3.1 Errichtung einer 2,5 m mächtigen Evapotranspirationsschicht *49*
4.3.1.1 Materialienherstellung 49
4.3.1.2 Transport 49
4.3.1.2.1 Dieselverbrauch der Aufbringung der 2,5 m mächtigen Abdeckung 50
4.3.2 Emissionen der Deponie *50*
4.3.2.1 Methanemissionen nach Erhöhung der Schichtstärke 51
4.3.2.2 Sickerwasser 51
4.3.3 Monitoring *51*
4.4 SZENARIO „ABDECKUNG MIT DICHTELEMENT GEMÄß DVO“ 52
4.4.1 Errichtung einer Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO. *52*
4.4.1.1 Materialienherstellung 52
4.4.1.2 Transport 53
4.4.1.3 Aufbringen der Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO 53
4.4.2 Emissionen der Deponie *54*
4.4.2.1 Deponiegas 54
4.4.2.2 Sickerwasser 56
4.4.3 Monitoring *57*
4.5 BASISINVENTAR 57
4.5.1 Bereitstellung elektrischer Energie *57*
4.5.2 Dieselbereitstellung und Verbrennung *58*
4.5.3 Energieverbrauch der Sickerwasserbehandlung *58*
5 WIRKUNGSBILANZ **60**
5.1 TEMPORÄRE ABDECKUNG 60
5.2 REFERENZSZENARIO „EVAPOTRANSPIRATIONSSCHICHT – 1,5 M“ 61
5.3 SZENARIO „EVAPOTRANSPIRATIONSSCHICHT - 2,5 M“ 62
5.4 SZENARIO „ABDECKUNG MIT DICHTELEMENT GEMÄß DVO“ 63
5.5 GEGENÜBERSTELLUNG DER SZENARIEN 64
5.6 SENSITIVITÄTSANALYSE - ÖKOBILANZ 65
5.6.1 Sensitivitätsanalyse - Transport *65*
5.6.2 Sensitivitätsanalyse - Methan *67*
5.6.3 Sensitivitätsanalyse - Sickerwasser *69*
6 BETRACHTUNG AUSGEWÄHLTER KOSTEN **72**
6.1 KOSTEN DER ABDECKUNGEN 72
6.1.1 Materialkosten *72*
6.1.2 Herstellungskosten *73*
6.2 SICKERWASSER 75
6.2.1 Kosten der Sickerwasserbehandlung *75*
6.2.2 Kosten des Sickerwassertransports *76*
6.3 KOSTENVERGLEICH DER SZENARIEN 77
6.4 BETRACHTUNG AUSGEWÄHLTER KOSTEN IM RAHMEN DER SENSITIVITÄTSANALYSE 78

6.4.1 Sensitivitätsanalyse – Sickerwasserkosten *78*
6.4.2 Sensitivitätsanalyse – Materialkosten *80*
7 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN **82**
8 ZUSAMMENFASSUNG **85**
9 LITERATURVERZEICHNIS **87**
10 ABBILDUNGSVERZEICHNIS **93**
11 TABELLENVERZEICHNIS **95**
12 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS **98**
13 ANHANG: GASPROGNOSE UND METHANOXIDATION **99**

1 Einleitung

In der Deponieverordnung 1996 wurde die Deponierung von Abfällen mit mehr als 5 Masse-% organischem Kohlenstoff (TOC) ab dem 1.Jänner 2004 (mit Ausnahmen bis 2009) verboten. Die Abfälle müssen seither vor der Ablagerung einer (Vor-)Behandlung unterzogen werden (DVO, 2008). Bevor diese Vorgaben in Kraft traten, wurden Abfälle mit hohen Anteilen an organischem Kohlenstoff deponiert. Aufgrund des hohen Anteils an organischer Substanz und den damit einhergehenden biologischen Aktivitäten und biochemischen Reaktionen werden solche Deponien „Reaktordeponien" (Siedlungsabfalldeponien) genannt. Durch die Bildung von Deponiegas und Sickerwasser haben Emissionen jener genannter Auswirkungen auf die Schutzgüter Boden, Wasser (v.a. Grundwasser) und Luft (LECHNER et al., 2004). Laut Umweltbundesamt (UBA, 2010) sind in Österreich Deponien mit 77% aller Treibhausgasemissionen der Abfallwirtschaft die Hauptverursacher in diesem Sektor. Die Menge der jährlich deponierten Abfälle mit relevantem organischem Anteil geht jedoch bereits seit Anfang bis Mitte der 1990er Jahre deutlich zurück. Dies ist vor allem auf die Verordnung über die getrennte Sammlung biogener Abfälle und die Verpackungsverordnung zurückzuführen. Diese Verordnungen führten dazu, dass biogene Abfälle und Packstoffe in hohem Maße stofflich verwertet werden. Neben diesen Faktoren sind für die sinkende jährlich deponierte organische Abfallmenge seit dem Jahre 2004 vor allem die thermische und die mechanisch-biologische Abfallbehandlung entscheidend (UBA, 2010).

Die österreichische Deponieverordnung 2008 schreibt vor, nach Beendigung der Ablagerungsphase einer Deponie eine Deponieoberflächenabdeckung herzustellen. Um zu vermeiden, dass eine Trockenstabilisierung der Abfälle stattfindet, ist auf Deponien mit einem hohen Anteil an biologisch abbaubaren Abfällen eine temporäre Deponieoberflächenabdeckung zu errichten, um den biologischen Abbau der organischen Substanz zu fördern bzw. aufrecht zu erhalten. Nach spätestens 20 Jahren muss der Übergang von der temporären zu einer endgültigen Abdichtung erfolgen. Eine Möglichkeit für die temporäre Abdeckung stellt die Aufbringung einer Rekultivierungsschicht, welche gleichzeitig die Funktion einer Wasserhaushaltsschicht und einer Methanoxidationsschicht erfüllt, dar (DVO, 2008). Es stellt sich die Frage, wie nach 20 Jahren der Übergang zur endgültigen Abdeckung sowohl ökologisch als auch ökonomisch am sinnvollsten gestaltet werden kann bzw. ob es notwendig und Ziel führend ist, die temporäre Abdeckung überhaupt zu verändern. In dieser Arbeit wird eine Ökobilanzierung einer temporären Abdeckung mit unterschiedlichen Übergängen zu einer endgültigen Deponieoberflächenabdichtung sowie eine Kostenabschätzung durchgeführt, um sowohl ökologische als auch ökonomische Vor- und Nachteile evaluieren zu können. Das in dieser

Arbeit untersuchte System ist ein Kompartiment einer Siedlungsabfalldeponie. Dabei handelt es sich um keine reale Deponie, weshalb ein Deponiekompartiment modelliert wird.

1.1 Problem- und Zieldefinition der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist, die potenziellen Umweltauswirkungen unterschiedlicher Oberflächenabdeckungen auf Siedlungsabfalldeponien aufzuzeigen, sie miteinander zu vergleichen und aus ökologischer sowie ökonomischer Sicht zu evaluieren. Die dabei verwendete Methode ist die Ökobilanzierung nach der Normenreihe DIN EN ISO 14040ff. (2010). Das für alle drei Szenarien identische Grundszenario stellt eine temporäre Abdeckung (für 20 Jahre) dar, die aus einer 1,5 m mächtigen Evapotranspirationsschicht besteht. Für den Übergang zur endgültigen Abdeckung werden folgende drei Szenarien miteinander verglichen:

- Referenzszenario „Evapotranspirationsschicht 1,5 m“
- Szenario „Evapotranspirationsschicht 2,5 m“
- Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“

1.2 Forschungsfrage

In dieser Arbeit sollen die potenziellen Umweltauswirkungen und Kosten verschiedener Ausführungsalternativen des Übergangs von einer temporären Abdeckung zur endgültigen Abdeckung bzw. -dichtung einer Siedlungsabfalldeponie mit einem Referenzszenario (= Belassen der temporären Abdeckschicht) erörtert werden. Die daraus resultierende Forschungsfrage lautet daher:

> Welche Ergebnisse liefern die Ökobilanzierung und die Betrachtung von ausgewählten Kosten unterschiedlicher Szenarien (Handlungsmöglichkeiten) für Oberflächenabdeckschichten auf Siedlungsabfalldeponien am Beispiel eines Modelldeponiekompartiments?

Folgende Sub-Fragen bzw. Vorgehensweisen sollen zur Beantwortung der Forschungsfrage führen:

- Mit welchen Szenarien soll das Referenzszenario (Evapotranspirationsschicht 1,5 m) verglichen werden?

  Methodik: Literaturrecherche
  Ergebnis: Darstellung der verschiedenen Handlungsalternativen.

- Mit welcher Methode sollen die potenziellen Umweltauswirkungen des Referenzszenarios sowie der Vergleichsszenarien bewertet werden?

  Methodik: Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040ff. (2006).
  Ergebnis: Ökobilanz des Referenzszenarios sowie der Vergleichsszenarien.

- Welche Handlungsempfehlungen für die Praxis können aus dem Vergleich der Szenarien abgeleitet werden?

  Methodik: Gegenüberstellung der Vergleichsszenarien mit dem Referenzszenario in Hinblick auf potenzielle Umweltauswirkungen sowie die Betrachtung von ausgewählten Kosten.

  Ergebnis: Schlussfolgerung, Handlungsempfehlungen.

2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden der aktuelle Stand der Technik bezüglich Siedlungsabfalldeponien in der Sitlllegungsphase und der damit verbundenen Emissionsproblematik sowie die Funktionsweise von Wasserhaushalts- und Methanoxidationsschichten erläutert.

2.1 Umweltauswirkungen von Siedlungsabfalldeponien

In Österreich wurden, mit Ausnahmen in einigen Bundesländern (bis 2009), bis zum Jahr 2004 Abfälle unbehandelt abgelagert (*DVO*, 2008). Solche Deponien werden wegen der biologischen Aktivität, durch die Abfallbeschaffenheit und den Wasserhaushalt bedingt, Reaktordeponien genannt (*LECHNER et al.*, 2004). Dabei ist das Wissen über die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse im Deponiekörper Voraussetzung für die Ermittlung, Kontrolle sowie die Reduzierung der dadurch entstehenden Umweltauswirkungen. Die beiden wesentlichen Emissionen sind dabei das Deponiegas und der Stoffaustrag über das Sickerwasser (*HEYER*, 2003). In diesem Kapitel werden die grundlegenden Prozesse des biologischen Abbaus dargestellt.

2.1.1 Abbauprozesse in Deponien

Unter dem biologischen Abbau organischer Substanz wird die Stoffumwandlung zu energiearmen mineralischen Verbindungen verstanden. Der Abbau erfolgt durch die mikrobielle Aktivität von verschiedenen Mirkroorganismen. Erfolgt der Abbau vollständig, wird dies als Mineralisierung bezeichnet. In natürlichen Stoffkreisläufen, wie z.B. dem Kohlenstoff- und dem Stickstoffkreislauf, ist der Ab- und Umbau der organischen Substanz ein wesentlicher Bestandteil. Als Stabilisierungsprozess wird vor allem die Bildung stabiler, huminstoffähnlicher Substanzen (Humifizierung) bezeichnet (*LECHNER et al.,* 2004). Um die Emissionen von Deponien möglichst zu verringern, ist seit dem Jahr 2004 die Ablagerung von unbehandeltem Abfall nicht mehr erlaubt. Die Abfälle müssen zuvor in einer mechanisch-biologischen-Abfallbehandlung (MBA) aufbereitet oder thermisch behandelt werden. Dabei dürfen die Grenzwerte für eine zulässige Ablagerung nicht überschritten werden. So sind im Anhang der österreichischen Deponieverordnung Stabilitätsparameter (AT_4 < 7 mg O_2/g TM; GS_{21} bzw. BG_{21} < 20 Nl/kg TM) sowie der höchst zulässige Brennwert (H_O < 6.600 kJ/kg TM) angegeben, die für die Ablagerung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen einzuhalten sind. Das Ziel dieser Vorgaben ist einerseits die Reduzierung der deponierten Abfallmengen und andererseits die Verminderung der Reaktivität der Abfälle, einhergehend mit der Verringerung der Deponiegasbildung (*DVO,* 2008 idF 2010).

2.1.1.1 Aerobe Abbauprozesse in Deponien

Beim Abbau organischer Substanz werden energiereiche, hochmolekulare Verbindungen in niedermolekulare, energiearme Produkte umgesetzt. Findet der Abbauprozess im aeroben Milieu, d.h. unter Vorhandensein von Sauerstoff, statt, wird die organische Substanz bis zu anorganischen Endprodukten oxidiert („veratmet“). Bei vollständigem Katabolismus (Abbau von Stoffwechselprodukten) sind die Endprodukte Kohlendioxid, Wasser und mineralische Bestandteile (Mineralisierung). Die Freisetzung von Energie, die in etwa zu 40% von Mikroorganismen genutzt wird und zu ca. 60% als Wärme abgegeben wird, ist ebenfalls eine Folge des aeroben Abbauprozesses(*HEYER*, 2003). Folgende Summenformel beschreibt vereinfacht den aeroben Abbau von Glucose (*LODISH et al.* 1995):

$C_6H_{12}0_6 + 6\ O_2 \Rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O + 686$ kcal/mol

Die Abbauaktivität wird dabei von vielen Faktoren beeinflusst, u.a. von den mikrobiellen Gruppen, abiotischen Faktoren (Sauerstoffverfügbarkeit, Wassergehalt, Temperatur, pH-Wert, Gasporenvolumen), dem Vernetzungsgrad sowie der chemischen Bindung der Abfallinhaltsstoffe. Die Temperaturentwicklung während des Abbaus hängt von der Beschaffenheit des Ausgangsmaterials und der Tätigkeit der Mikroorganismen ab. In der mesophilen Phase (0 – 40 °C) werden die leicht abbaubaren Substrate durch mesophile Mikroorganismen umgesetzt. In dieser Phase steigt die Temperatur auf ca. 40°C an. Ein weiterer Temperaturanstieg erfolgt in der thermophilen Phase (40 – 70 °C). Dies bedingt ein Absterben mesophiler und gleichzeitig ein Wachstum thermophiler Mikroorganismen (v.a. Bakterien und z.T. Actinomyceten). Nach dem Abbau des leicht abbaubaren Substrats sinkt die Temperatur wieder (mesophiler Bereich), einhergehend mit dem Absterben und Umschichten der mikrobiellen Population. In der darauf folgenden Abkühlungsphase bilden sich wieder mesophile Organismen, durch die dann der Abbau von schwer abbaubaren Verbindungen (u.a. Zelluloseanteile, Lignine und Lignoproteine) erfolgt. Die abschließende Phase ist die Aufbauphase. Hier erfolgt v.a. die Bildung von Huminstoffen.

Neben der Temperatur hat der Wassergehalt einen großen Einfluss auf die Abbauleistung. Dieser steht in Konkurrenz zum Gasporenvolumen. Einerseits soll die erforderliche Luftfeuchtigkeit von ca. 95% erreicht werden sowie die Abfallpartikel von einem feinen Wasserfilm umgeben sein, andererseits soll ein ausreichendes Gasporenvolumen gegeben sein, damit keine anaeroben Zonen ausgebildet werden. Der optimale Wassergehalt für den aeroben Abbau liegt in etwa bei 50 – 55 %. Des Weiteren sind der pH-Wert sowie das Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis entscheidend. Der optimale pH-Wert kann bei unterschiedlichen Mikroorganismenpopulationen variieren (Pilze im schwach sauren, Bakterien im neutralen bis schwach alkalischen und Actinomyceten im schwach sauren Bereich). Das Stickstoff/Kohlenstoff-Verhältnis ist für die Abbaugeschwindigkeit entscheidend. Ist das Verhältnis < 20, erfolgt der Abbau schnell, wobei die Mikroorganismen

den Stickstoff nicht schnell genug binden können und dieser in gasförmigem Zustand als Ammoniak ausgetragen wird. Bei einem Verhältnis > 20 erfolgt der Abbau langsam, wodurch stickstoffreiche Endprodukte gebildet werden können (*HEYER*, 2003).

2.1.1.2 Anaerobe Abbauprozesse in Deponien

Beim anaeroben Abbau werden biochemisch verwertbare Kohlenstoffverbindungen durch fakultativ und obligat anaerobe Mikroorganismen zu Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) umgewandelt. Dies geschieht unter Luftabschluss. Anders als beim aeroben Abbau, bei dem bestimmte Organismengruppen die Organik in mineralische Endprodukte (CO_2 und Wasser) abbauen können, sind beim anaeroben Abbau mehrere von einander abhängige Organismengruppen beteiligt. Vereinfacht ausgedrückt werden die Abbauprozesse in drei Phasen unterschieden. Die Hydrolyse, die saure Gärung (Versäuerung bzw. acidogene Phase und Essigsäurebildung bzw. acetogene Phase) und die methanogene Phase. In der Phase der Hydrolyse werden die unlöslichen polymeren Substanzen (z.B. Kohlenhydrate, Proteine, Fette), wie beim aeroben Stoffwechsel, durch extrazelluläre Enzyme zerkleinert und in monomere wasserlösliche Bausteine (Monosaccharide, Aminosäuren oder Fettsäuren) gespalten. Dadurch werden sie erst für Bakterien verwertbar. In der darauf folgenden acidogenen Phase, dem ersten Schritt der sauren Gärung, werden die Monosaccharide, Aminosäuren und Carbonsäuren zu einem Gemisch aus Propionsäure bzw. Propionat, Buttersäure bzw. Butyrat, Alkoholen, Aldehyden und Ketonen sowie CO_2 und Wasserstoff umgewandelt. Im zweiten Schritt der sauren Gärung, der acetogenen Phase, werden die von den Acidogenen gebildeten höheren Carbonsäuren durch acetogene (essigsäurebildende) Bakterien weiter umgesetzt. In der Natur werden ca. zwei Drittel des organischen Materials über Acetat und etwa ein Drittel über CO_2 und Wasserstoff zu Methan umgewandelt. Erst nachdem ein Großteil der rasch abbaubaren organischen Substanzen durch die Acidogenen verbraucht und das Übermaß an sauren Stoffwechselprodukten über das Sickerwasser ausgetragen wurde, setzt die Methangärung ein. In dieser Phase (Methanphase) werden schließlich Methanol, Essigsäure, Ameisensäure und Wasserstoff zu CH_4 und CO_2 abgebaut. Schlussendlich wird eine stabile Methanphase erreicht, in der die Gaszusammensetzung über einen längeren Zeitraum annähernd gleich bleibt. Die Essigsäurekonzentration im Sickerwasser nimmt deutlich ab, die Methanbildung erreicht das Maximum und klingt allmählich ab. Folgende Summenformel beschreibt vereinfacht den anaeroben Abbau von Glucose (*LECHNER et al.,* 2004):

$$C_6H_{12}O_6 \Rightarrow 3\ CH_4 + 3\ CO_2 + 405\ kJ/Mol + Biomasse$$

In Abbildung 1 sind die Phasen des anaeroben Abbaus grafisch dargestellt.

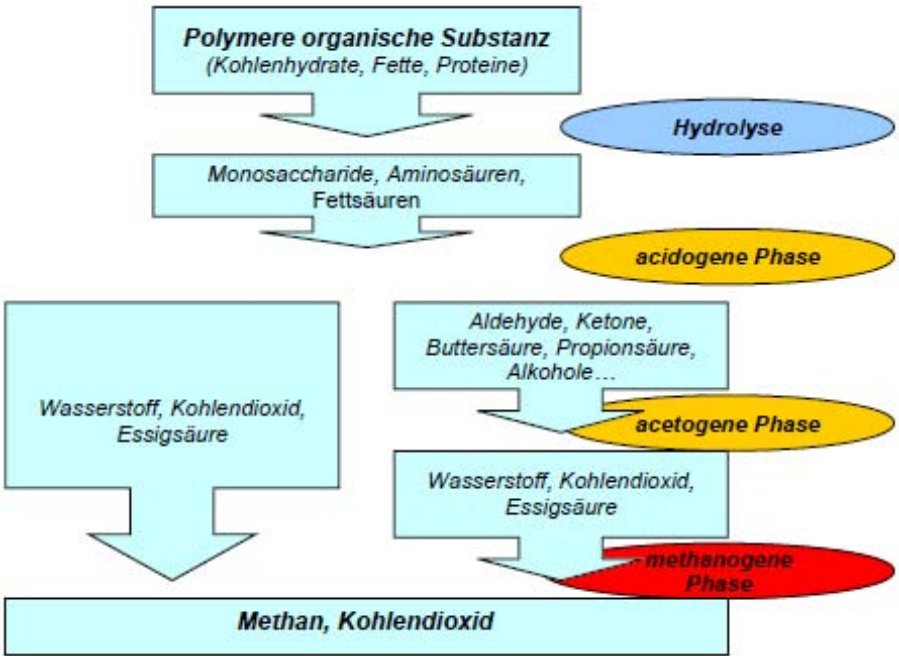


Abbildung 1: Anaerober Abbau (Lechner et al., 2004; zitiert in Strimitzer, 2011).

2.1.2 Deponiegas

In diesem Kapitel werden die Bildung, die Zusammensetzung und die Umweltrelevanz von Deponiegas beschrieben.

2.1.2.1 Zusammensetzung und Umweltrelevanz des Deponiegases

Deponiegas entsteht in erster Linie durch biologische Abbauvorgänge (Gärungsprozesse). Das Gas ist ein Gemisch aus Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2). Das Volumenverhältnis beträgt dabei meist 60:40. Zu einem sehr geringen Anteil sind auch andere Spurengase enthalten, welche sehr geruchsintensiv (z.B. Schwefelwasserstoff) oder anderweitig umweltrelevant (z.B. FCKW) sind. Diese Spurengase machen weniger als 1 % aus. Ein unkontrollierter Deponiegasaustritt kann zu negativen Umweltauswirkungen führen. Diese sind neben der Verstärkung des Treibhauseffektes die Schädigung der Vegetation (durch Verdrängen der Bodenluft) sowie die Brand- und Explosionsgefahr (*LECHNER et al.,* 2004). Die Zusammensetzung des Deponiegases ist von den Abbauphasen des Schüttkörpers abhängig. Die Menge hängt wiederum von der Abfallzusammensetzung, der abgelagerten Abfallmasse, dem Stand der Umsetzungsprozesse, dem Alter der Deponie sowie den Betriebsbedingungen der Deponie ab (*RAMKE,* 2004).

Methan hat bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren in etwa die 25-fache Treibhauswirksamkeit wie CO_2 und ist zudem bis zu zwölf Jahre in der Atmosphäre klimawirksam. Die Wirksamkeit auf den Treibhauseffekt wird Treibhauspotenzial (engl. Global Warming Potencial, GWP) genannt. Dieses beschreibt den Anteil einer bestimmten Menge eines Treibhausgases am Treibhauseffekt. CO_2 dient als Vergleichswert mit dem Wert eins. Alle anderen Treibhausgase werden in CO_2-Äquivalenten beschrieben. Eine besonders hohe Treibhauswirksamkeit haben zum Beispiel FCKWs. Im Vergleich zu CO_2

haben diese eine um 14.400-fache höhere Treibhauswirksamkeit. Kohlendioxid aus Deponien wird hingegen als klimaneutral angesehen, da es biogenen Ursprungs ist und über den Photosynthesekreislauf wieder von den Pflanzen gebunden wird (*IPCC,* 2007).

Ohne natürlichen Treibhauseffekt würde die Durchschnittstemperatur auf der Erde -18°C betragen. Durch den natürlichen Treibhauseffekt findet eine Erwärmung um +33°C statt. Somit beträgt die durchschnittliche Temperatur auf der Erde +15°C. Neben Methan und Kohlendioxid zählen Wasserdampf, Lachgas (N_2O) und Ozon (O_3) zu den wichtigsten Treibhausgasen. Jedes dieser Gase absorbiert in bestimmten Wellenlängenbereichen, wodurch sich die Wirkung der einzelnen Gase addiert (*LECHNER et al.*, 2004). In Österreich betrugen die gesamten Methanemissionen (alle Sektoren) im Jahr 2009 269.800 t, davon wurden 27,2 % (73.385,6 t) aus Deponien emittiert (*UBA,* 2009). Abbildung 2 stellt die Zusammensetzung des Deponiegases im 9-Phasen-Modell (siehe Kapitel 2.1.2.2) grafisch dar.

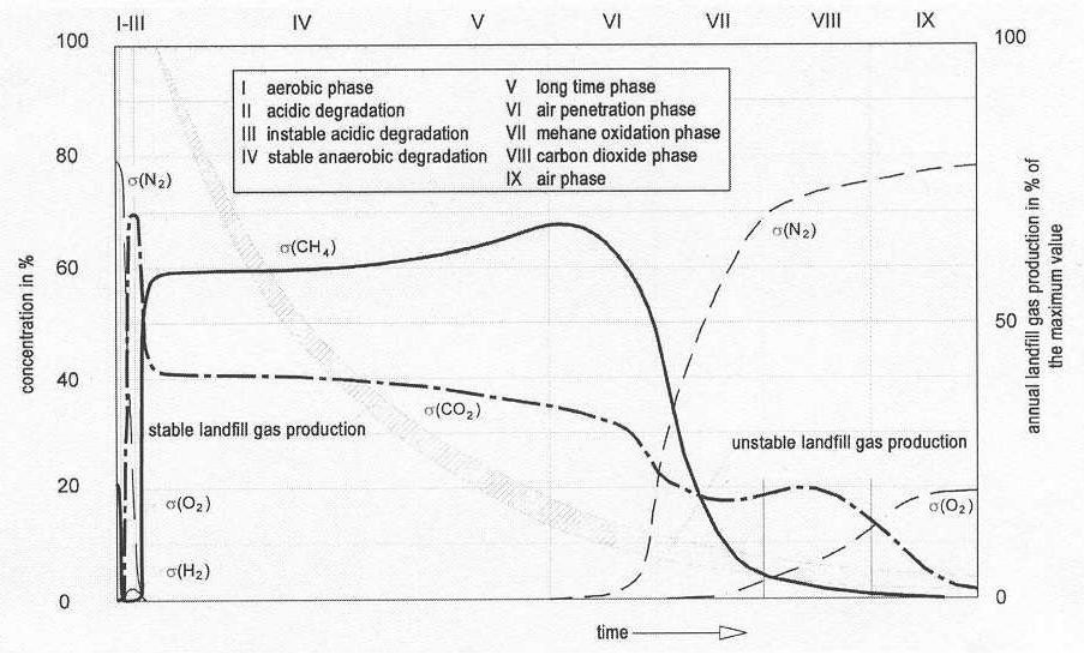


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung der Gaszusammensetzung und der Gasbildung (Rettenberger, 2005; zitiert in Prantl, 2007).

2.1.2.2 Bildung von Deponiegas

In Kapitel 2.1.1.2 wurde bereits näher auf den anaeroben Abbau und somit auf die Entstehung von Methan eingegangen. Für das Wachstum der dafür verantwortlichen Methanbakterien sind folgende Faktoren entscheidend: Temperatur, Wassergehalt und -transport, Nährstoff- und Substratangebot, pH-Wert, toxische Stoffkonzentrationen (wachstumshemmend) und der Aufbau des Deponiekörpers. Neben diesen internen Faktoren sind auch einige externe Faktoren entscheidend. Dazu zählen z.B. Niederschlag, Wind, Außentemperatur, Deponieabdichtung bzw. -abdeckung und Grundwasserstände. Für die Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Deponiegasbildung gibt es verschiedene

Modelle. In den 1970er Jahren wurden von Farquhar et al. (1973) bereits vier Gasphasen charakterisiert. Rettenberger et al. (1992) erweiterten diese vier Phasen um fünf weitere. Diese sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Phasen sind nicht strikt voneinander getrennt, sondern können zeitlich ineinander übergehen. Es können sich auch verschiedene Bereiche (z.B. Randbereiche, Deponiemitte) der Deponie in unterschiedlichen Phasen befinden.

Tabelle 1: 9-Phasen-Modell der Deponiegasbildung (Rettenberger et al., 1992)

Phase		Beschreibung
I	**Aerobe Phase**	Nach Einbau des Abfalls ist im Deponiekörper noch Luftsauerstoff enthalten. O_2 in den Poren wird durch den aeroben Abbau verbraucht. Es entstehen CO_2, Wasser und Wärme.
II	**Phase der sauren Gärung**	Der Abfall enthält keinen Sauerstoff mehr, wodurch der anaerobe Abbau einsetzt. Es entstehen CO_2 und Wasserstoff.
III	**Instabile Methanphase**	Die in Phase II entstandenen Gärprodukte werden zu Methan und Kohlendioxid umgewandelt.
IV	**Stabile Methanphase**	Die stabile Deponiegasbildung hat zur völligen Auffüllung des Porenraumes geführt. Es sind erhöhte Emissionen an der Oberfläche messbar.
V	**Langzeitphase**	Leicht abbaubare Abfälle sind weitestgehend abgebaut, die Deponiegasbildung ist stabil. Der Porenraum ist zur Gänze mit Deponiegas erfüllt. Emissionen sind merklich zurückgegangen.
VI	**Lufteindringphase**	Die Deponiegasentwicklung geht weiter zurück, wodurch Luft in die Ablagerung eindringen und durch ausströmendes Deponiegas nicht mehr zur Gänze verdrängt werden kann. Mit der Zeit umfasst das die gesamte Ablagerung. Aerobe Abbauprozesse setzen ein.
VII	**Methanoxidationsphase**	Es kommt zu einer fortschreitenden Aerobisierung. Es entsteht CO_2. Das Methan wird durch die mikrobielle Methanoxidation abgebaut, das CH_4 /CO ändert sich. Es finden keine Emissionen statt.
VIII	**CO_2-Phase**	Weitestgehend aerobe Phase. Methan kommt nur noch in geringen Konzentrationen vor. Durch den noch abbaubaren Abfall in der Ablagerung kommt es noch zu geringfügig erhöhten CO_2-Konzentrationen im Porenraum der Ablagerung.
IX	**Luftphase**	Abbaubare Abfallbestandteile sind weitestgehend abgebaut (inertisiert). Die Gasphase der Ablagerung entspricht der in natürlichen Böden.

2.1.2.3 Verwertung und Beseitigung von Deponiegas

In der österreichischen Deponieverordnung wird gefordert, bei einer mehr als geringfügig zu erwartenden Deponiegasbildung eines Deponiekompartiments, dieses mit Einrichtungen auszustatten, um eine ausreichende Erfassung und Behandlung des entstehenden Deponiegases zu ermöglichen. Bei Kompartimenten, die mit Abfällen mit hohen biologisch

abbaubaren Anteilen verfüllt sind, vor allem Siedlungsabfälle (oder vergleichbare Abfälle aus Altlasten), ist eine aktive Entgasung zu installieren. Ausschlaggebend dafür sind das Alter der Ablagerung sowie die noch zu erwartende Gasbildung. Vorrangig soll das Deponiegas, bei aktiver Entgasung, verwertet werden. Nur wenn dies nicht möglich ist, ist es zu beseitigen (*DVO,* 2008). Die Verwertungsmöglichkeiten bei der aktiven Entgasung unterscheiden sich je nach Qualität (CH_4/CO_2, Anteil der Spurengase) und Menge. Dabei kommen Gasmotoren oder -turbinen am häufigsten zum Einsatz. Soll das Deponiegas in ein öffentliches Gasnetz eingespeist werden, muss es meist technisch sehr aufwendig und kostspielig aufbereitet werden. In den dafür angewendeten Verfahren müssen Kohlendioxid, Wasserdampf, Schwefelwasserstoff, Feinpartikel und störende Spurengase eliminiert werden. Ansonsten würden diese Stoffe Bauteile der Motoren und Turbinen angreifen (u. a. korrosiv), was eine erhebliche Lebensdauerverkürzung zur Folge hat (*GOOSSENS,* 1996; zitiert in *STRIMITZER,* 2011). Eine weitere Beseitigung des Deponiegases stellt die passive Entgasung mittels Methanoxidationsschicht dar. Dabei strömt das Gas, ohne maschinell erzeugten Unterdruck, über die Gasverteilungsschicht in die Methanoxidationsschicht, wo das Methan von Mikroorganismen oxidiert werden kann (siehe Kapitel 2.3).

2.1.3 Sickerwasser aus Deponien

Als Deponiesickerwasser wird jenes Wasser bezeichnet, welches an der Basis einer Deponie auftritt. Dabei wird zwischen endogenem und exogenem Sickerwasser unterschieden. Endogenes Sickerwasser ist jenes, das durch biologische Abbauprozesse im Abfallkörper entsteht. Exogenes hingegen entsteht durch das Eindringen von Niederschlagswasser in den Deponiekörper. In den ersten Jahren einer Abfallablagerung ist aufgrund des Speichervermögens des Deponiekörpers deutlich weniger Sickerwasseranfall zu erwarten. Nach Erreichen der Wassersättigung des Deponiekörpers steigt dann die Menge an anfallendem Sickerwasser (*SCHACHERMAYER und LAMPERT,* 2010). Bei Hausmülldeponien beträgt der Sickerwasseranfall in der Regel 20 – 30 % des gefallenen Niederschlages, wobei eine zuverlässige Prognose bezüglich der Entwicklung der anfallenden Menge und der Beschaffenheit des Sickerwassers kaum möglich ist (*BMU/LAGa,* 2002). Die anfallende Menge ist laut Krümpelbeck (1999) in erster Linie von der Größe der offenen Einbaufläche, den Niederschlagsmengen, der Einbauweise und des Retentionsvermögens der abgelagerten Abfälle sowie der Höhe der Verdunstung abhängig.

Das Sickerwasser nimmt beim Durchsickern des Deponiekörpers Abfallinhaltsstoffe und Stoffwechselprodukte auf. Die organische Belastung des Sickerwassers hängt dabei stark von den unterschiedlichen Phasen des anaeroben Abbaus der organischen Substanz im Deponiekörper ab. So treten bei Belastungen organischer Inhaltsstoffe deutliche Unterschiede zwischen der sauren Phase und der Methanphase auf (*HEYER*, 2003). Sehr junge Deponien weisen sehr hohe Konzentrationen organischer Inhaltsstoffe im

Sickerwasser auf, wobei es sich dabei in erster Linie um beim anaeroben Abbau (siehe Kap. 2.1.2) gebildete niedermolekulare, leicht abbaubare Carbonsäuren handelt. In der sauren Phase ist das BSB_5/CSB-Verhältnis (Biochemischer Sauerstoffbedarf/Chemischer Sauerstoffbedarf) eng (0,5), wird jedoch im zeitlichen Verlauf der Methanphase immer weiter (ca. 0,05 bis 0,15). Im Zuge der Änderung der Milieubedingungen kommt es in der stabilen Methanphase zu einer deutlichen Abnahme der biologisch leicht abbaubaren organischen Substanz. Das Emissionsverhalten der Deponie wird schlussendlich nur mehr von physikalischen Auslaugvorgängen dominiert. Es kommen fast nur mehr schwer abbaubare Substanzen (chemischer Sauerstoffbedarf, CSB) im Sickerwasser vor (*LECHNER et al.,* 2004). In Tabelle 2 sind Beispiele für die mittleren und maximalen Sickerwasserkonzentrationen aus Haumülldeponien ersichtlich.

Tabelle 2: Beispiel für mittlere und maximale Sickerwasserkonzentrationen aus Hausmülldeponien (Werte für die saure Phase und die Methanphase, nach Stegmann und Spendlin, 1987, und maximal zulässige Konzentrationen für die Sickerwassereinleitung in Fließgewässer nach AbwasserVDeponie, zitiert in Brunner et al., 2000).

		Saure Phase		Methanphase		AbwasserV Deponie
Parameter	**Einheit**	**Mittelwert**	**Maximum**	**Mittelwert**	**Maximum**	
pH-Wert		6,1	5,5 (Min.)	8	8,5	6,5-8,5
Biologischer Sauerstoffbedarf (BSB_5)	mg/l	13.000	30.425	180	383	10
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	mg/l	22.000	38.100	3.000	4.340	50
BSB_5/CSB	mg/l	0,58	-	0,06	-	-
Eisen	mg/l	925	2.120	15	29,3	-
Calcium	mg/l	1.300	2.480	80	573	-
Magnesium	mg/l	600	1.130	250	534	-
Mangan	mg/l	24	65,5	0,65	1,73	-
Zink	mg/l	5,6	68,4	0,64	3,78	0,5
Strontium	mg/l	7,2	14,7	0,94	7,25	-
Sulfat	mg/l	-	1745	-	884	-

In Österreich werden die Direkt- und Indirekteinleitung (über die Kanalisation) von Sickerwasser in natürliche Gewässer über die Festlegung von Grenzwerten geregelt. Zur Anwendung kommen die Verordnung über die Begrenzung von Sickerwasseremissionen aus Abfalldeponien (2003) sowie die Allgemeine Abwasseremissionsverordnung AAEV, BGBl. Nr. 186/1996. Deponiesickerwässer müssen einer speziellen Behandlung unterzogen werden. Zur Anwendung kommende Verfahren sind biologische Verfahren (zur Reduktion der abbaubaren organischen Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen), Chemische Oxidation und UV-Licht (zur Reduktion der Parameter CSB, TOC und AOX), Adsorption (zur Entfernung von z.B. Kohlenwasserstoffen, chlorierten Kohlenwasserstoffen, Aromaten, Pestiziden, Lösungsmitteln), Fällung/Flockung (primär zur Entfernung von organischen Substanzen wie CSB bzw. AOX), Membranverfahren und Strippung (Entfernung des

Ammonium-Stickstoffs) (*LECHNER et al.*, 2004). Abbildung 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sickerwasser- und Gaszusammensetzung der verschiedenen Phasen einer Reaktordeponie.

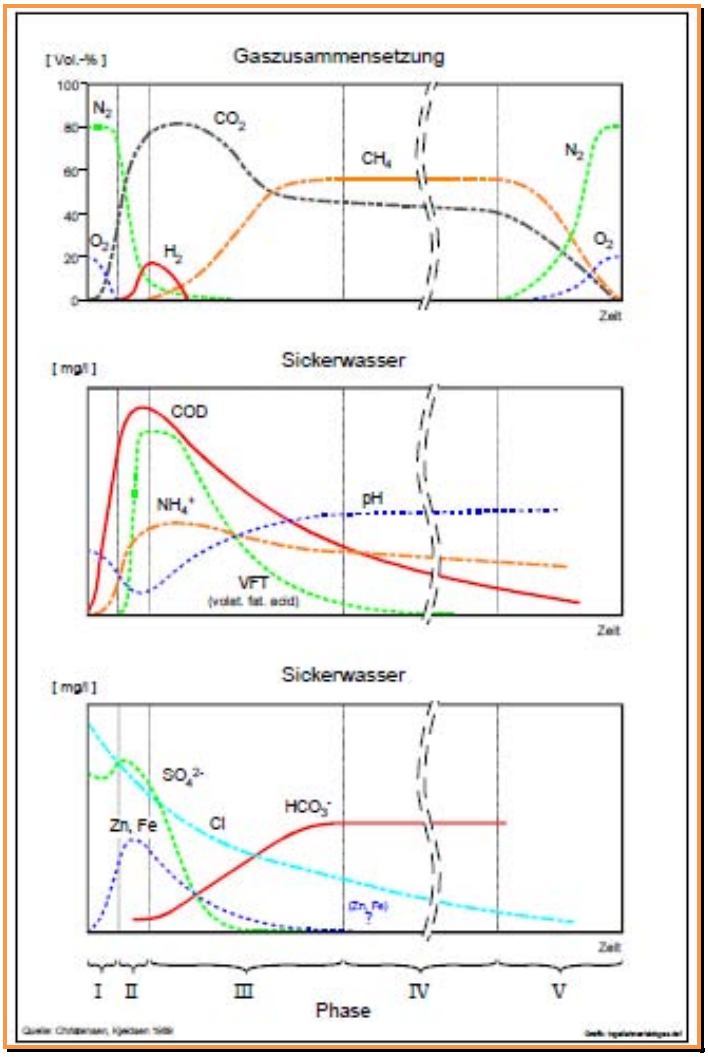


Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung der Deponiegas- und Sickerwasserzusammensetzung in Siedlungsabfalldeponien (nach Christensen/Kjeldsen, 1989; zitiert in Brunner et al., 2000)

2.2 Temporäre Deponieoberflächenabdeckung

Auf Deponien mit einem hohen Anteil an biologisch abbaubaren Abfällen ist gemäß der österreichischen Deponieverordnung 2008 eine temporäre Oberflächenabdeckung herzustellen. Bei einer sofortigen und vollständigen Abdichtung einer Deponie wird der biologische Abbau der Organik durch eine Trockenstabilisierung unterbunden. Dadurch bleibt das Emissionspotenzial auf lange Zeit erhalten. Wird die Abdichtung im Laufe der Zeit z.B. durch Setzungen undicht, wodurch wieder Wasser in den Deponiekörper eindringen kann, setzt der biologische Abbau erneut ein. Somit würden die Emissionen auf kommende Generationen verlagert werden. Daher soll die temporäre Abdeckung das Eindringen der für den anaeroben Abbau erforderlichen Wassermenge ermöglichen, wodurch es zu einer Erhöhung bzw. Aufrechterhaltung der Deponiegasbildung kommt. Bei der Planung bzw.

Ausführung von temporären Abdeckungen sollen in erster Linie der Wasserhaushalt sowie die Methanoxidation optimiert werden (*LEBENSMINISTERIUM,* 2009). Dabei sind laut Deponieverordnung (2008) folgende Anforderungen zu beachten:

- Die **Methanemissionen** über die Oberfläche müssen **< 5 kg $CH_4/m^2/a$** (als Mittelwert über alle Messpunkte des Methanmassenstroms) sein
- **Einzelwerte** der Methanemissionen dürfen nicht **> 10 kg $CH_4/m^2/a$** betragen (hot spots, Linienquellen etc.)
- Um den **anaeroben Abbau** zu **steigern bzw. aufrecht zu erhalten**, muss **ausreichend Wasser** in den Deponiekörper infiltrieren können.

Wenn eine temporäre Abdeckung errichtet wird, ist die Ausführung bzw. der Übergang zur endgültigen Oberflächendichtung vorzulegen. Dies erfordert Angaben darüber, ob das Material der temporären Oberflächenabdeckung weiterverwendet oder entfernt wird. Des Weiteren muss der zuständigen Behörde ein Konzept vorgelegt werden, mit welchen Maßnahmen der biologische Abbau intensiviert wird (z.B. In-Situ-Aerobisierung, Bewässerung, etc.). Sind diese Maßnahmen abgeschlossen, beziehungsweise nach spätestens 20 Jahren, muss eine endgültige Abdeckung (entweder Abdichtung oder eine gleich wirksame Wasserhaushaltsschicht) hergestellt werden (*DVO,* 2008).

2.3 Methanoxidation

Im Gegensatz zur Entstehung von Methan findet die Methanoxidation im aeroben Milieu statt. So genannte methanotrophe oder methanabbauende Mikroorganismen (Bakterien) bauen unter Energiegewinnung und Wärmeabgabe (exothermer Prozess) das Methan in Wasser und Kohlendioxid beziehungsweise zu mikrobieller Biomasse um. Damit ein Molekül Methan oxidiert, werden zwei Moleküle Sauerstoff benötigt, wobei ein gasförmiges Molekül – Kohlendioxid – entsteht. Der Kohlenstoff wird teilweise in die Biomasse eingebaut. Dadurch erfolgt eine Volumenreduktion, die ein Nachströmen von Sauerstoff auch in größere Tiefen ermöglicht. Die Summenformel für diese Veratmung lautet (*HUBER-HUMER et al.,* 2009):

$$CH_4 + 2O_2 \Rightarrow CO_2 + 2\,H_2O + 210{,}8\ \text{kcal}$$

Die methanotrophen Bakterien sind zwar relativ anpassungsfähig, ihre Leistungsfähigkeit wird jedoch stark von Umweltfaktoren (pH-Wert, Temperatur, Wassergehalt, Sauerstoffversorgung, Bodenzustand und Nährstoffversorgung) beeinflusst. Der Toleranzbereich des pH-Wertes ist bei methanotrophen Bakterien relativ groß (4 - 9). Für die Aktivität der Bakterien ist jedoch ein relativ konstanter, keinen kurzfristigen Schwankungen unterliegender Wert von Bedeutung. Die optimalen Aktivitäts- und Wachstumsraten finden zwischen 6,6 und 6,8 statt (*HEYER,* 1990; zitiert in *HUMER und LECHNER,* 1997a). Hohe Oxidationsraten können jedoch auch noch bei Werten zwischen 5,5 und 8,5 erreicht werden.

Die Methanoxidationsmenge ist meist stark temperaturabhängig. Aufgrund verschiedener Arten methanotropher Bakterienstämme (mesophile, thermophile, psychrophile) sind die optimalen Temperaturbereiche unterschiedlich. So haben mesophile Arten zwischen 20 und 37°C ihr Temperaturoptimum. Thermophile Arten können ihr Wachstum auch bis 55°C (Exosporen sogar kurzfristig bis 80°C) aufrechterhalten. Bei einigen psychrophilen Arten liegt das Temperaturoptimum unter 20°C. Nahe 0°C ist wahrscheinlich die Untergrenze für die Vermehrung. Da die Methanoxidation eine exotherme Reaktion ist, können die Bakterien durch die dadurch auftretende Temperaturerhöhung die Milieubedingungen, in Bezug auf die Temperatur, zu einem gewissen Grad selbst beeinflussen. Des Weiteren wird die Methanoxidation auf vielfältige Weise vom Wassergehalt des Trägermediums beeinflusst. Im Allgemeinen wird die Aktivität der methanotrophen Bakterien bei einem Wassergehalt < 13 % max. Wasserkapazität eingestellt (*HUMER und LECHNER*, 1997a). Figueroa (1993, zitiert in *HUMER und LECHNER*, 1997a) ermittelte bei Untersuchungen von verschiedenen Materialen für Abdeckschichten einen relativ großen Feuchtebereich als optimale Bedingung für die Methanoxidation. Bei der Untersuchung von Biokompost wurde bei 40 – 80 % Wassergehalt der max. Wasserkapazität der effektivste Methanabbau beobachtet.

Die verwendeten Materialien für Deponieabdeckschichten müssen für eine maximale Methanoxidation bestimmte Eigenschaften besitzen. Dazu zählen ein ausreichendes Luftporenvolumen (ebenso bei hohen Wassergehalten) und eine langfristige Stabilität der Struktur (um die Sauerstoffversorgung und Methanzufuhr zu gewährleisten), ein hohes Wasserhaltevermögen sowie eine gute Nährstoffversorgung. Die organische Substanz dient einerseits als Trägersubstrat für die Mikroorganismen, was zu einer Verbesserung der Substrat- und Bodeneigenschaften führt und andererseits als Nährstoffbereitsteller bzw. Nachlieferant. Dies ist für den Aufbau der methanotrophen Biomasse von großer Bedeutung (*HUMER und LECHNER,* 1997a). In Abbildung 4 sind die Einflussfaktoren auf die Methanoxidation bei passiver Entgasung schematisch dargestellt.

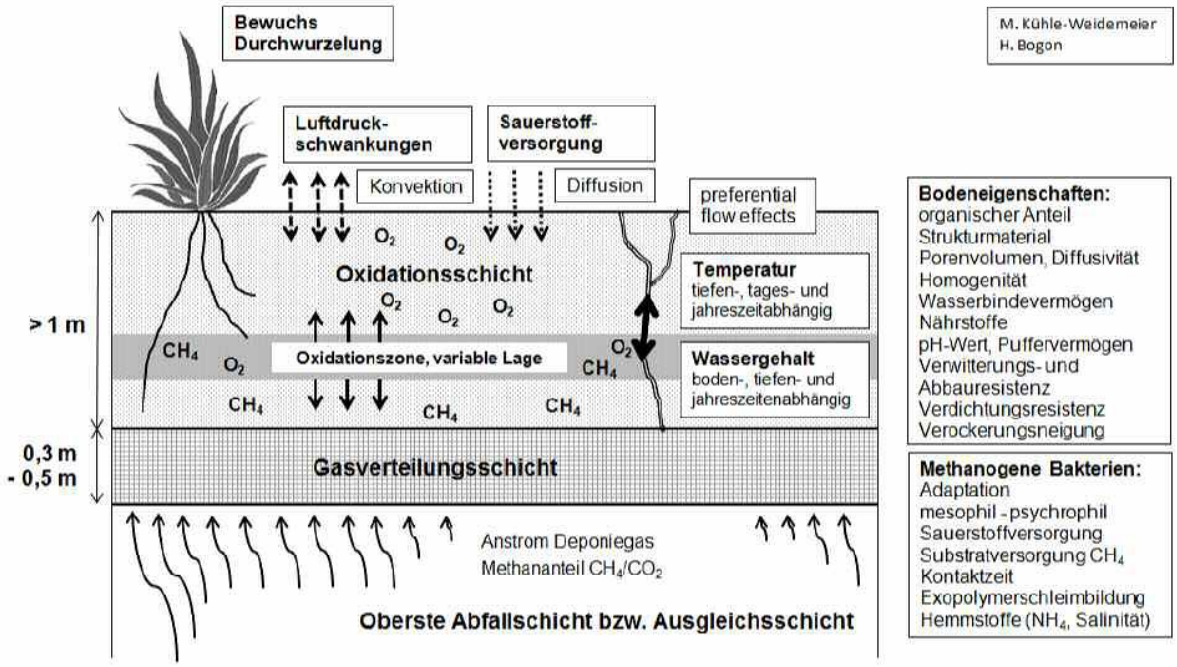


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Einflussfaktoren auf die Methanoxidation bei passiver Entgasung (Kühle-Weidemeier und Bogon, 2008).

2.3.1 Methanoxidationsschicht

In Österreich bestehen zurzeit keine Normen oder Regelwerke, die den Aufbau bzw. die Ausführung einer Methanoxidationsschicht einheitlich regeln. Es gibt jedoch bspw. den technischen Leitfaden Methanoxidation von Huber-Humer et al. (2008), die sich mit der Frage der optimalen bzw. der effektivsten Ausführung einer Methanoxidationsschicht beschäftigen. Humer und Lechner (2001a) empfehlen den in Abbildung 5 dargestellten Regelaufbau einer Methanoxidationsschicht.

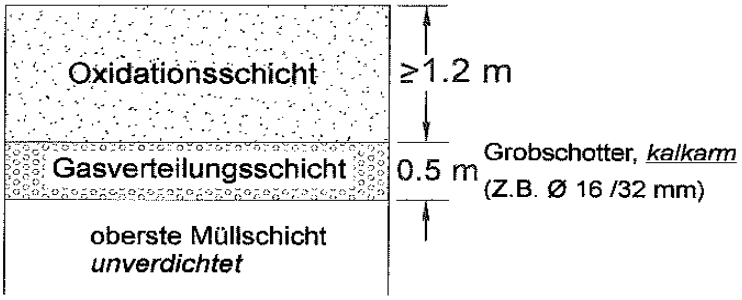


Abbildung 5: Empfohlener Regelaufbau für ein Methanoxidationssystem (Humer und Lechner, 2001a)

Eine Methanoxidationsschicht ist in der Regel eine offene Oberflächenabdeckung. Das bedeutet, dass kein technisches Dichtelement vorhanden ist. Dadurch kann die Oxidationsschicht bei entsprechender Ausführung auch als Wasserhaushaltsschicht (Evapotranspirationsschicht, siehe Kapitel 2.3) dienen. Bei den gegebenen Klimaverhältnissen in Ostösterreich (Niederschlag < 700mm/a) kann durch den Einbau einer 1 m mächtigen Methanoxidationsschicht und einem entsprechenden Bewuchs (Miscanthus,

Pappeln, etc.) der Wassereintrag auf bis zu < 10 % des Jahresniederschlages reduziert werden. Die Gasverteilungsschicht soll eine regelmäßige Methanflächenbelastung und eine Verlangsamung der Gasströme gewährleisten. Dies ermöglicht den Mikroorganismen den problemlosen Abbau des Methans. Mit 30 – 50 cm mächtigen Gasverteilungsschichten aus kalkarmen Grobschotter wurden sehr gute Erfahrungen gemacht, wobei die Körnungsgröße 16/32 nicht unterschritten werden soll (*HUBER-HUMER et al.*, 2009). Nachfolgend sind die entscheidenden inneren und äußeren Standortfaktoren für einen sinnvollen Einsatz von Methanoxidationsschichten sowie deren Vor- und Nachteile laut LEBENSMINISTERIUM (2009) aufgezählt.

- **Abfalleigenschaften** (aktuelle Gasbildung und Gasbildungspotenzial): Bei geringer Gasbildung ist eine Methanoxidation überflüssig; bei sehr hoher Gasbildung ist die energetische Nutzung sinnvoller.
- **Deponiegeometrie/Böschungsneigung:** Bei Böschungen steiler als 1:2,5 kann die Standsicherheit gefährdet sein.
- **Niederschlag:** Geringe Niederschläge können die Methanoxidation durch Austrocknung zum Erliegen bringen, bei sehr hohen Niederschlägen kann die Gaspermeabilität negativ beeinflusst werden.
- **Temperatur:** Bei sehr niedrigen Temperaturen (über längere Zeiträume) kann die mikrobielle Aktivität negativ beeinflusst werden.
- **Sickerwasserfassung/Schutzgut Grundwasser:** Die Gefährdung des Grundwasser durch die Sickerwasserbildung ist zu prüfen.
- **Materialienverfügbarkeit (Kompost, etc.):** Beeinflusst die Kosten sowie die Umweltauswirkungen (z.B. durch lange Transportwege) der Oberflächenabdeckung wesentlich.
- **Nachnutzung:** Bei einer für bestimmte Nachnutzungen erforderlichen erheblichen Verdichtung der Abdeckschicht oder einer Versiegelung ist eine Methanoxidationsschicht nicht sinnvoll.

Die Vor- und Nachteile von Methanoxidationsschichten sind, vereinfacht dargestellt, folgende:

+ es ist ein einfaches, robustes und natürliches System
+ der Betriebs- und Wartungsaufwand ist gering
+ als temporäre Abdeckung ideal einsetzbar
+ bei Einsatz von Kompost oder Bodenaushub werden Ressourcen geschont
− ohne ein zusätzliches Dichteelement sind gesetzliche Anforderungen (z.B. Sickerwasserneubildungsrate) nur schwer erreichbar
− hoher Monitoringaufwand
− Einschränkungen der Nachnutzung

Der Horizont, in dem die Methanoxidation tatsächlich stattfindet, wird als Methanoxidationshorizont bezeichnet. Dieser ist stark mit methanotrophen Bakterien angereichert. Meist beschränkt sich dieser Horizont auf eine Stärke von 10 bis 30 cm. Er befindet sich in jener Bodentiefe, in der das Sauerstoff/Methan-Verhältnis optimal ist (~ 2:1) sowie die weiteren benötigten Milieubedingungen (z.B. Temperatur) für die Bakterien ausreichend sind. In einer Deponieabdeckung kann sich der Oxidationshorizont - bei steigender Methankonzentration nach oben, bei sinkender Konzentration nach unten - verschieben. Dabei ist die Lage des Oxidationshorizontes grundsätzlich von der Diffusionsgeschwindigkeit der Gase CH_4 und O_2, vom vorhandenen Luftporenvolumen im Trägermedium und damit auch vom Wassergehalt im Trägermedium abhängig (*LECHNER und HUBER-HUMER*, 2008). Lechner et al. (2004) empfehlen für eine Methanoxidationsschicht reifen, grob strukturierten Kompost mit einer Mächtigkeit von 1-1,5 m. Laut Deponieverordnung (*DVO*, 2008) sind aus Rest- und Hausmüll hergestellte Komposte für die Anwendung als Deponieabdeckschicht nicht zugelassen. In den Tabellen 3 und 4 sind die Methanoxidationsraten von verschiedenen Komposten bzw. die Anforderungen an die Kompostqualität zur Methanoxidation ersichtlich.

Tabelle 3: Methanoxidationsraten verschiedener Komposte in Laboruntersuchungen (Humer und Lechner, 1997a).

Komposte	Untersuchungs-Methode	Durchschnittliche Methanoxidationsrate	Literaturangabe
Biomüllkompost	Laborversuche im Durchflussbetrieb	55,2 g CH_4/m^3 d **(=3,5 mol/m^3 d)**	STEGMANN et al. (1991)
Rindenkompost (85 cm)	Laborversuche im Durchflussbetrieb	0,36 – 1,25 m^3 CH_4/m^2 d (=256 - 893 g CH_4/m3 d; **16 - 54 mol/m3 d**)	MENNERICH (1986)
Biofilter zur Deponiegasreinigung (70 cm)	---	10 – 50 g CH_4/m^2 d **(=0,63 - 3,1 mol/m^2 d)**	FIGUEROA (1993)
Biokompost	Inkubationsversuche im Labor	3,07 mg/g TS (= **0,29 mol/m^3 d)**	FIGUEROA (1993)
Müllkompost (1 Jahr alt)	Laborversuche im Durchflussbetrieb	332 l CH_4/m^3 d **(=14,6 mol/m^3 d)**	HUMER (1996)

Tabelle 4: Anforderungen an die Kompostqualität zur Methanoxidation (Humer und Lechner, 2001b)

Anforderungen	Parameter
Hoher Anteil an Nährstoffen und Organik	TOC ≥ 8,0 TS; C/N-Verhältnis ca. 15
Reife und Stabilität der Organik	AT7 ≤ 8,0 mg O_2/g TS; hoher Anteil an Huminstoffen
Stickstoffverbindungen, ein Großteil des Stickstoffs sollte bereits in Huminstoffen gebunden sein.	Ammonium < 350 ppm TS; kein Nitrit
Porosität, Porenvolumen	Ausreichender Anteil an Strukturmaterial, z.B. Holzanteile 5-15 % TS
Wasserhaltekapazität	> 80 % FS

Substrate mit einem hohen Anteil an organischer Substanz haben den Vorteil, dass sie nur schwer verdichtbar sind. Ein hoher Luftporenanteil hat eine temperaturisolierende Wirkung, wodurch auch im Winter eine effiziente Methanoxidation stattfinden kann. So können ab ca. 80 cm Tiefe, bei Außentemperaturen von ~ -5°C, in etwa +15°C oder höhere Temperaturen in der Abdeckschicht herrschen. Die verwendeten Substrate müssen reife und stabile organische Substanzen enthalten, da hohe Ammoniumkonzentrationen und der Nitrifikationsprozess zu einer Hemmung der Methanoxidation führen können. Der Abbau der organischen Substanz durch heterotrophe Mikroorganismen bedingt eine zusätzliche Sauerstoffzehrung. Dies steht in Konkurrenz mit den Methanoxidierern, wodurch es zu einer erhöhten Bildung von „Exopolymeren“ (Schleimabsonderung in „Stresssituationen“ methanotropher Mikroorganismen) kommen kann (*HUBER-HUMER et al.,* 2008).

2.4 Evapotranspirationsschicht (Wasserhaushaltsschicht)

Eine Evapotranspirationsschicht (oder Wasserhaushaltsschicht) ist eine Variante der Rekultivierungsschicht. Sie besitzt eine hohe Wasserspeicherfähigkeit sowie eine hohe Evapotranspirationsleistung (durch die Einheit Boden/Substrat in Verbindung mit der Vegetation), wodurch der Sickerwassereintritt in den darunter liegenden Abfallkörper minimiert wird (*HUBER-HUMER et al.,* 2008). Eine herkömmliche Abdichtung und Einrichtungen zur Entwässerung sind bei Evapotranspirationsschichten nicht erforderlich. Bei entsprechender Ausführung der Schicht wird das Eindringen einer gewissen Wassermenge ermöglicht, wodurch eine Trockenstabilisierung des Abfalls verhindert wird. Gleichzeitig kann eine Wasserhaushaltsschicht auch als Methanoxidationsschicht dienen. Eine Schwierigkeit bei Evapotranspirationsschichten ist vor allem das Erreichen der geforderten Sickerwasserneubildungsrate von < 5 % des Jahresniederschlages (nach spätestens 5 Jahren) in sehr niederschlagsreichen Gebieten. Dies ist nicht oder zumindest nur sehr schwer zu erreichen (*LEBENSMINISTERIUM,* 2009).

Der Aufbau einer Wasserhaushaltsschicht besteht aus mehreren Schichten. Über dem Abfall ist eine Drainageschicht zu errichten. Dadurch soll das eindringende Niederschlagswasser

sowie das aufsteigende Deponiegas homogen verteilt werden. Bisher wurden mit 30 - 50 cm mächtigen Drainageschichten aus kalkarmen, grobkörnigem (Körnungsgröße min. 16/32) Schotter gute Erfahrungen gemacht. Zwischen dem Unterboden der Rekultivierungsschicht und der Drainageschicht soll ein Trennvlies das Eindringen von Feinteilchen in die Drainageschicht verhindern (*LEBENSMINISTERIUM*, 2009). Soll die Evapotranspirationsschicht jedoch auch den Anforderungen einer Methanoxidationsschicht entsprechen, wie es in dieser Arbeit der Fall ist, ist von einem Trennvlies abzuraten, da die Gefahr der Verschlämmung und des Zuwachsens durch mikrobielle Ausscheidungen (Exopolymere) gegeben ist. Daher ist eine Schichtstärke von 50 cm zu bevorzugen, womit auch langfristig, trotz Eindringens von Feinteilchen in den oberen Bereich der Gasverteilungsschicht, eine ausreichende Gasverteilung gegeben ist (*HUBER-HUMER et al.,* 2008).

Wenn die Evapotranspirationsschicht auch als Methanoxidationsschicht dienen soll, sind laut Wimmer und Reichenauer (2006) folgende Zusatzkriterien zu beachten:

Oberboden:

- 80 – 120 cm Mächtigkeit
- hoher Anteil an pflanzenverfügbaren Nährstoffen (Humusanteil > 5 M-%)
- Luftporenvolumen bei Wasserkapazität: 15 – 20 Vol. %
- Wasserleitfähigkeit (gesättigt) von 10 bis 50 cm/Tag; Wasserspeicherfähigkeit min. 200 mm/m Abdeckschicht (nicht verpflichtend)

Unterboden:

- Luftporenvolumen bei Wasserkapazität: 15 – 20 Vol. %
- Wasserleitfähigkeit von 1 – 10 cm/Tag; Wasserspeicherfähigkeit min. 200 mm/m Abdeckschicht (nicht verpflichtend)

In Abbildung 6 ist der Regelaufbau einer Wasserhaushaltsschicht grafisch dargestellt. Der Aufbau der Schicht des Szenarios „Erhöhung der Schicht auf 2,5 m“ unterscheidet sich zum Regelbaufbau aufgrund der gleichzeitigen Funktion als Methanoxidationsschicht durch eine höhere Mächtigkeit des Oberbodens (siehe Kapitel 4). In Abbildung 7 sind die Einflussfaktoren auf den Wasserhaushalt einer Deponie schematisch dargestellt.

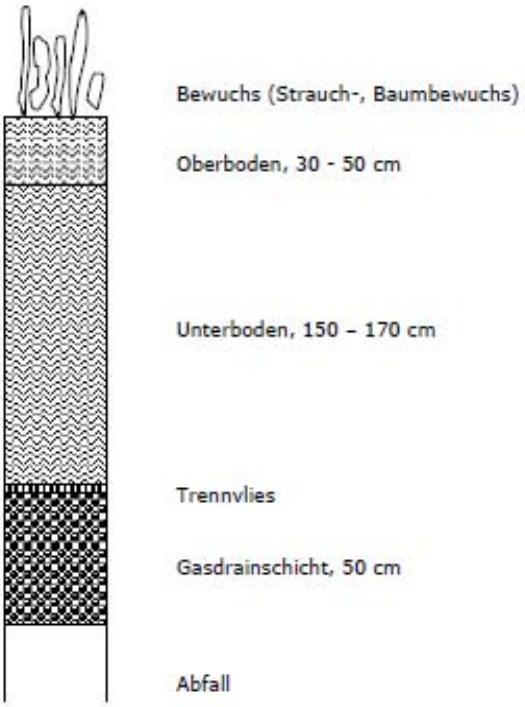


Abbildung 6: Aufbau einer Wasserhaushaltsschicht (Wimmer, 2006; zitiert in Lebensministerium, 2009).

Für die Bilanzierung in dieser Arbeit werden bezüglich der anfallenden Sickerwassermengen Annahmen getroffen. Dies wird in der Sachbilanz (Kapitel 4) näher erläutert.

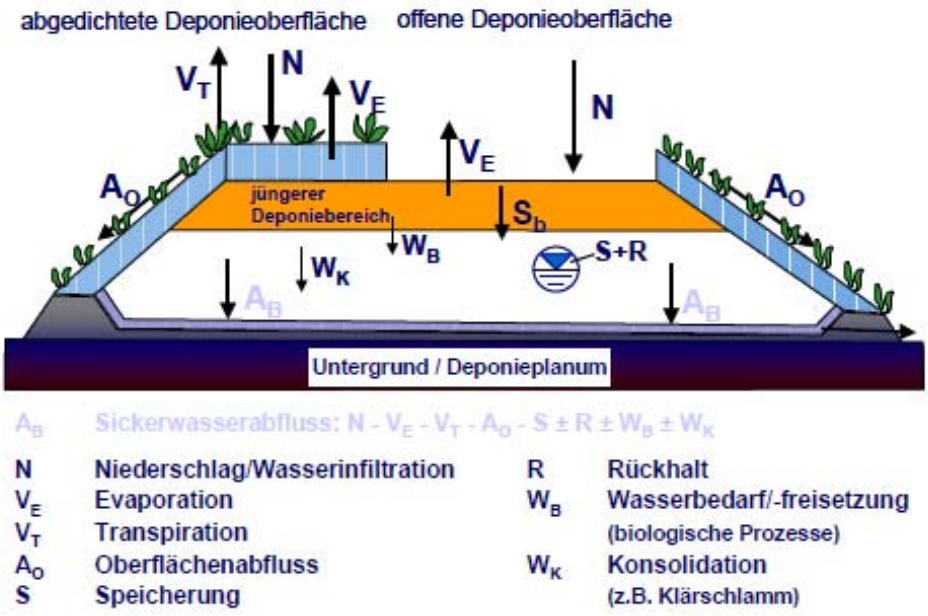


Abbildung 7: Einflussfaktoren auf den Wasserhaushalt einer Deponie (schematische Darstellung nach Heyer et al., 2000; zitiert in Hupe et al., 2002)

3 Material und Methoden

In diesem Kapitel wird die Modellierung des Deponiekompartiments durchgeführt und eine kurze Erklärung der Ökobilanz gegeben.

3.1 Ökobilanzierung

Bereits in den 1970er Jahren wurden erste Ansätze der Ökobilanzierung entwickelt. Durch die aufkommende Umweltbewegung und die politische Diskussion über die Grenzen des wirtschaftlichen Wachstums wurden erste Studien durchgeführt, um die Umweltbelastungen von Unternehmen und Produkten aufzuzeigen. Themen dieser Untersuchungen waren vor allem die Belastung der Luft, Auswirkungen von Abwässern und Abfällen sowie der Energie- und Rohstoffverbrauch. Eine Methode unter Einbezug des ökologischen Produktlebensweges wurde bereits 1969 im Auftrag der Coca Cola Company entwickelt. Die Bezeichnung dieser Methode lautete „Resource and Environmental Profile Analysis (REPA)“. Die 1974 durchgeführte Studie im Auftrag der amerikanischen Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) wird heute als erste Publikation zur Produktökobilanzierung gesehen (*SIEGENTHALER,* 2006). Die Methode der Ökobilanz war die erste Methode zur Analyse von Umweltauswirkungen von Produkten und Prozessen, die in ihren Grundsätzen international genormt wurde (*VOGT et al.,* 2002).

Die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 ff betrachtet den gesamten Lebensweg eines Produktes/Prozesses, daher auch die englische Bezeichnung LCA (Life Cycle Assessment). Dabei werden die Umweltauswirkungen von der Rohstoffgewinnung und -erzeugung, der Energieerzeugung, der Materialherstellung bis zur Anwendung sowie der Abfallbehandlung bis zur endgültigen Beseitigung berücksichtigt („von der Wiege bis zur Bahre“). Eine Ökobilanz-Studie nach DIN EN ISO 14040ff besteht aus folgenden vier Phasen:

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

In der Regel werden in Ökobilanzen keine sozialen oder ökonomischen Faktoren berücksichtigt. Der Ökobilanzansatz und die in der Norm beschriebene Methodik können jedoch auch für diese Aspekte angewendet werden (*DIN EN ISO 14040,* 2006).

Die Ökobilanzierung in dieser Diplomarbeit wird nach den Anforderungen der Norm DIN EN ISO 14040 und 14044 erstellt. Zur Berechnung der Ökobilanz wurde die Software GaBi 6.0 Education verwendet. Es werden die potenziellen Umweltauswirkungen entlang des gesamten Lebensweges eines Produktes, einer Dienstleistung oder eines Verfahrens abgeschätzt. Dazu werden in der Sachbilanz die Input- und Outputflüsse des

Produktsystems quantifiziert, um die mit den Ergebnissen verbundenen potenziellen Umweltauswirkungen in der anschließenden Wirkungsabschätzung zu berechnen. Schließlich werden die Ergebnisse hinsichtlich der Forschungsfrage dieser Arbeit ausgewertet und interpretiert bzw. diskutiert.

3.2 Modellierung des Deponiekompartiments

Das in dieser Arbeit untersuchte System ist ein Kompartiment einer Siedlungsabfalldeponie. Da es sich um eine fiktive Deponie handelt, muss das Kompartiment modelliert werden. Dafür ist eine Vielzahl an Daten, wie z.B. die Abfallmenge, die Anteile des abbaubaren organischen Kohlenstoffs der einzelnen Abfallfraktionen, Halbwertszeiten etc., erforderlich. Für die Menge des entstehenden Deponiegases wird im nächsten Kapitel eine Deponiegasprognose durchgeführt. Für die Modellierung der Deponie sowie für die Deponiegasprognose werden folgende Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

- Der Wasserverbrauch anaerober Abbauvorgänge wird nicht berücksichtigt.
- Die Wasserbildung aerober Abbauvorgänge wird nicht berücksichtigt.
- Die Geometrie des Modellkompartiments wird vereinfacht als Quader angenommen.
- Die Deponiebasisabdichtung wird als gegeben und für den Beobachtungszeitraum als funktionstüchtig angesehen.

3.2.1 Deponiegasprognose

Die Deponiegasprognose wird mit zwei unterschiedlichen Berechnungsmodellen durchgeführt. Einerseits mit dem Modell von Tabasaran und Rettenberger und andererseits mit dem vom IPCC (International Panel on Climate Change) für nationale Treibhausgasinventuren empfohlenen Tier 2 Modell. In diesem Kapitel werden die Erklärungen dieser beiden Modelle sowie die Berechnungen der Gasprognose durchgeführt.

Berechnung nach Tabasaran und Rettenberger (1978):

Um die Menge des entstehenden Deponiegases abschätzen zu können, muss eine Deponiegasprognose durchgeführt werden. Zu unterscheiden sind dabei der zeitliche Verlauf der Gasbildung und das Gaspotenzial. Das Gaspotenzial gibt die gesamte Gasmenge, die durch die abgelagerten Stoffe entstehen kann, an. Die dafür wesentlichsten Faktoren sind der abbaubare Substratkohlenstoff und die Temperatur (*RETTENBERGER et al.,* 1992). Tabasaran und Rettenberger (1978) stellten folgende Modellgleichungen für die Berechnung des Gaspotenzials auf:

$$G_e = 1{,}868 * C_{org} * (0{,}014 * T + 0{,}28)$$

mit:
- G_e = die in langen Zeiträumen gebildete Gasmenge in m^3
- 1,868 = Faktor, der das Volumen von 1 kg Kohlenstoff als Deponiegas angibt
- T = Temperatur in °C
- C_{org} = organischer Kohlenstoff

Diese Gleichung hat als Ergebnis die Summe der Gasproduktion. Um den zeitlichen Verlauf der Gasproduktion abzuschätzen, muss die Gleichung mit folgenden Faktoren erweitert werden:

$$G_t = G_e * (1\text{-}10^{-kt}) \text{ in } m^3/t$$

mit: G_t = bis zur Zeit t gebildete spezifische Deponiegasmenge in m^3/t Abfall

k = Abbaukonstante

t = Zeit in Jahren

Diese beiden Modelle werden nun für die Prognose des zeitlichen Verlaufs der Gasbildung miteinander verknüpft. Somit lautet die Gleichung:

$$\mathbf{G_e = 1{,}868 * C_{org} * (0{,}014 * T + 0{,}28) * (1\text{-}10^{-kt})}$$

Für die Anwendung dieses Modells ist die Auswahl geeigneter Parameter Voraussetzung. Es werden zwei Parameterkombinationen berechnet und schließlich der Mittelwert dieser Berechnungen und der Berechnungen nach dem Tier 2-Modell für das weitere Vorgehen verwendet. Folgende Parameter werden für die Prognose herangezogen:

C_{org}: Rolland und Scheibengraf (2003) geben in einer Studie des Umweltbundesamtes eine Zeitreihe des biologisch abbaubaren Kohlenstoffs im Restmüll an. Die Werte sinken kontinuierlich vom Jahr 1990 mit 200 g/kg bis zum Jahr 2003 mit 120 g/kg Abfall, wobei der Anteil an organischem Kohlenstoff ab dem Jahr 1999 gleich bleibend 120 g/kg Abfall beträgt. Der Wert für das Jahr 2004 wird daher ebenfalls mit 120 g/kg Abfall angenommen. Der Mittelwert der Zeitreihe beträgt 136 g/kg Abfall. Die Berechnungen mit diesem Modell werden einerseits mit einem geringen Anteil an biologisch abbaubaren Kohlenstoff von 130 g/kg Abfall und andererseits mit einem höheren Anteil von 150 g/kg Abfall durchgeführt.

T: In Deponien liegen die Temperaturen überwiegend im Bereich von 30 – 36°C. Mit diesem Modell wird die Prognose jeweils mit 30°C bzw. mit 35°C berechnet.

k-Werte: Diese sind ein Maß für die Abbaugeschwindigkeit und werden in der Literatur zwischen 0,025 und 0,05 angegeben. Laut Rettenberger und Mezger (1992) lassen Messungen an Deponien jedoch auf einen k-Wert zwischen 0,035 und 0,045 schließen. Daher werden für die Berechnung ebendiese Werte verwendet.

(0,014 * T + 0,28): Temperaturglied, das angibt, welcher temperaturabhängige Anteil organischer Kohlenstoffverbindungen nicht biologisch abgebaut wird. Bei 30°C ergibt sich ein Wert von 0,7, bei 35°C ein Wert von 0,77. Das heißt, dass nur 70 bzw. 77 % des abbaubaren Kohlenstoffs in die Berechnung eingehen.

Die Gasprognose wurde anhand eines Berechnungsbeispiels von Rettenberger und Mezger (1992) erstellt. In Tabelle 5 sind die für die Prognose verwendeten Parameterkombinationen zusammengefasst.

Tabelle 5: Parameterkombinationen für die Gasprognose nach Tabasaran und Rettenberger (1987)

Parameter	Parameterkombination A	Parameterkombination B
	(geringe Gasproduktion)	(hohe Gasproduktion)
C_{org}	130 kg/t Abfall	150 kg/t Abfall
T	30°C	35°C
k-Wert	0,035	0,045

Die Bilanzierung in dieser Arbeit wird für einen Zeitraum von 50 Jahren (20 Jahre temporäre Abdeckung und 30 Jahre Mindestnachsorgezeitraum gemäß Europäischer Deponierichtlinie 1999/31/EG) nach Deponieabschluss durchgeführt. Die Gasproduktion wird somit bis zum Jahr 2054 berechnet. Hierfür muss die abgelagerte Abfallmenge in Teilmengen gegliedert werden, die bezogen auf den Berechnungszeitraum ein unterschiedliches Alter haben. Die Ablagerung beginnt im Jahr 1990. Jährlich werden 18.000 t Abfall bis zum Jahr 2004 deponiert. Somit ergeben sich 15 Teilmengen zu je 18.000 t Abfall. Es wird eine Zeitverzögerung des Beginns der Gasproduktion von 1 Jahr berücksichtigt. Bei der im Jahr 1990 abgelagerten Menge beginnt die Gasproduktion somit im Jahr 1991, usw. Tabelle 6 zeigt die Deponiegasbildung der einzelnen Teilmengen, die gesamte Menge an gebildetem Deponiegas 50 Jahre nach Deponieabschluss und die Mengen an gebildetem Methan bei einem Volumenanteil von 60 % im Deponiegas.

Tabelle 6: Gesamtgasmenge (m^3) 50 Jahre nach Deponieabschluss (im Jahr 2054).

jährlich abgelagerte Menge = 18.000 t	Dauer der Gasproduktion der einzelnen Teilmengen (1991- 2054)	gebildete **Deponiegas-menge** in **m^3 (A)**	gebildete **Deponiegas-menge** in **m^3 (B)**	**Mittelwert**	bei einem **Methangehalt** von **60 %**
1. Teilmenge (1990)	64	3.042.177	3.878.452	3.460.315	2.076.189
2. Teilmenge (1991)	63	3.040.699	3.877.894	3.459.296	2.075.577
3. Teilmenge (1992)	62	3.039.097	3.877.274	3.458.185	2.074.911
4. Teilmenge (1993)	61	3.037.361	3.876.586	3.456.974	2.074.184
5. Teilmenge (1994)	60	3.035.479	3.875.823	3.455.651	2.073.390
6. Teilmenge (1995)	59	3.033.439	3.874.977	3.454.208	2.072.524
7. Teilmenge (1996)	58	3.031.228	3.874.039	3.452.634	2.071.580
8. Teilmenge (1997)	57	3.028.832	3.872.998	3.450.915	2.070.549
9. Teilmenge (1998)	56	3.026.234	3.871.844	3.449.039	2.069.423
10. Teilmenge (1999)	55	3.023.418	3.870.563	3.446.991	2.068.194
11. Teilmenge (2000)	54	3.020.366	3.869.143	3.444.755	2.066.853
12. Teilmenge (2001)	53	3.017.058	3.867.568	3.442.313	2.065.387
13. Teilmenge (2002)	52	3.013.472	3.865.821	3.439.646	2.063.787
14. Teilmenge (2003)	51	3.009.585	3.863.883	3.436.734	2.062.040
15. Teilmenge (2004)	50	3.005.372	3.861.733	3.433.553	2.060.131
Gesamtgasmenge (m^3) 50 Jahre nach Deponieabschluss		**45.403.821**	**58.078.598**	**51.741.209**	**31.044.725**

Unter den getroffenen Annahmen würden bis zum Jahr 2054 ca. 31 Mio. m^3 (Mittelwert) Methan gebildet werden. Für die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Deponiegasbildung muss die jährliche Deponiegasbildung berechnet werden. Um die produzierte Deponiegasmenge im 50. Jahr nach Deponieabschluss zu erhalten, wird die Differenz aus der Gesamtgasmenge nach 50 Jahren abzüglich der Gesamtgasmenge nach 49 Jahren nach Deponieabschluss berechnet.

Gesamtgasmenge 50 Jahre nach Deponieabschluss:	51.741.209 m^3
Gesamtgasmenge 49 Jahre nach Deponieabschluss:	51.710.972 m^3
= produzierte Gasmenge im Jahr 50	= 30.237 m^3

Im Jahr 2054 (50. Jahr nach Deponieabschluss) werden 30.237 m^3, bzw. 3,45 m^3/h Deponiegas gebildet. Diese Berechnung wird nun für alle Jahre, inklusive der Ablagerungsphase, durchgeführt. Abbildung 8 zeigt die jährliche Deponiegasbildung des Zeitraumes 1991–2054.

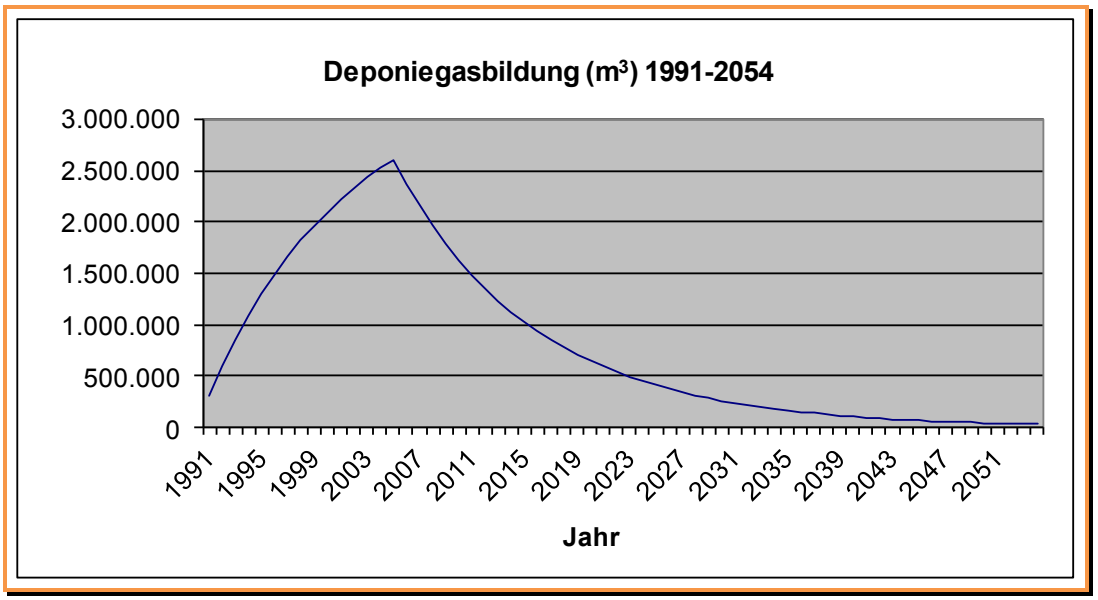


Abbildung 8: Deponiegasprognose für den Zeitraum 1991 – 2054 (eigene Berechnung nach Rettenberger und Mezger, 1992).

Im Bilanzierungszeitraum (2004 – 2054) würden insgesamt 3,16E+07 m^3 Deponiegas bzw. bei einem Methangehalt von 60 % 1,90E+07 m^3 Methan gebildet werden. Die in der Ablagerungsphase produzierte Gasmenge wird in der Bilanzierung nicht berücksichtigt, da die Bilanzierung erst nach der Ablagerungsphase mit dem Aufbringen der Abdeckschichten beginnt. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse der Gasprognose ist in Anhang A ersichtlich.

Berechnung nach IPCC Tier 2 Modell:

IPPC entwickelte eine Anleitung zur Erstellung von nationalen Treibhausgasinventuren, die „Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories (2000)“. Es beinhaltet das so genannte Tier 1- und das Tier 2-Modell. Beide Modelle können für die Berechnung von Emissionen aus Hausmülldeponien verwendet

werden. Für die Anwendung des Tier 2-Modells werden historische Daten bezüglich der deponierten Abfallmengen über Jahrzehnte hinweg benötigt. In manchen Staaten sind diese Daten jedoch nicht vorhanden, weshalb diese das Tier 1-Modell, das jedoch nur die aktuellen Emissionen berücksichtigt, anwenden (*SCHACHERMAYER,* o.J.). Für die Deponiegasprognose in dieser Arbeit wird das Tier 2-Modell verwendet, da es sich beim untersuchten System um ein Modelldeponiekompartiment handelt und sich somit die deponierten Abfallmengen aus dem Deponievolumen und der Dichte der Abfälle ergeben. Mit folgender Gleichung wird die bis zum Inventurjahr gebildete Methanmenge berechnet:

$$\mathbf{CH_4\ gebildet\ im\ Jahr\ t\ [Gg/a] = \Sigma_x[(A*k*MSW_{feuchtT}(X)*L_o(X))*e^{-k(t-x)}]}$$

Für x = Anfangsjahr der Aufzeichnung bis t

t	Jahr der Inventur
X	Jahre, für die die Daten eingegeben werden sollen
A	(1 - e-k)/k; (0<A<1) Normalisierungsfaktor, der die Gesamtsumme korrigiert
K	Methanbildungs-Geschwindigkeitskonstante [a^{-1}], k = ln2/t*1/2
t*1/2	Halbwertszeit
$MSW_{feuchtT}(x)$	gesamter deponierter Restmüll (MSW_{feucht} im Jahr x [Gg/a]
$L_0(x)$	aufgrund des Kohlenstoffgehaltes maximal bildbare Methanmenge = [MCF (x) * DOC (x) * DOC_F * F * 16/12 [Gg CH4/Gg MSW_{feucht}]
MCF (x)	Methan-Korrektur-Faktor im Jahr x (Anteil)
DOC (x)	abbaubarer organischer Kohlenstoff im Jahr x (Anteil) [Gg C/Gg MSW_{feucht}]
DOC_F	dissimilierter Anteil des abbaubaren Kohlenstoffs
F	Volumenanteil von Methan im Deponiegas (60 %)
16/12	Umrechnung von C zu CH_4

(*SCHACHERMAYER,* o.J.)

Methan-Korrektur-Faktor (MCF): Dieser berücksichtigt, dass in offenen Deponien ohne Verdichtung und kontrollierter Ablagerung weniger Methan produziert wird als in technisch gut ausgerüsteten Deponien. Dies ist durch den aeroben Abbau organischer Verbindungen in den oberen Schichten bedingt. Folgende Werte schlägt das IPCC für den MCF vor:

- 1 (technisch gut ausgerüstete abgedeckte Deponien)
- 0,8 (offene Deponien, Höhe > 5 Meter)
- 0,4 (offene Deponien, Höhe < 5 Meter)
- 0,6 (nicht kategorisierte Deponien)

Für die Gasprognose in dieser Arbeit wird der Wert 0,8 verwendet (offene Deponiefläche; Mächtigkeit > 5 Meter;)

Dissimilierter Anteil des abbaubaren Kohlenstoffs (DOC_F): Dieser Faktor schätzt den tatsächlichen Anteil des Kohlenstoffs, der abgebaut und als Gas emittiert wird, ab. Dadurch

wird jener Anteil des abbaubaren organischen Kohlenstoffs berücksichtigt, der in Deponien nur sehr langsam bzw. nicht abgebaut wird. Folgen Werte schlägt das IPCC für den DOC_F vor:

- 0,77 wenn der Lignin Kohlenstoff nicht im abbaubaren Kohlenstoffgehalt inkludiert ist
- 0,5 – 0,6 wenn der Lignin Kohlenstoff im abbaubaren Kohlenstoffgehalt inkludiert ist

Die Gasprognose wird mit drei verschiedenen Parameterkombinationen durchgeführt. Anschließend wird der Mittelwert der Prognosen nach Tabasaran und Rettenberger und dem IPCC Tier 2-Modell berechnet und für die weitere Vorgehensweise verwendet. Die Parameterkombinationen sind in Tabelle 7 ersichtlich.

Tabelle 7: Parameterkombinationen für die Deponiegasprognose nach IPCC Tier 2 Modell.

Parameter	Variante A	Variante B	Variante C
k	0,099	0,077	0,058
t*1/2	7	9	12
MCF(x)	0,8	0,8	0,8
DOC_F	0,6	0,77	0,5
DOC	130	150	140

Abbildung 9 stellt die Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsmodelle bzw. der Varianten dar. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse der Gasprognose ist in Anhang A „Deponiegasprognose“ ersichtlich.

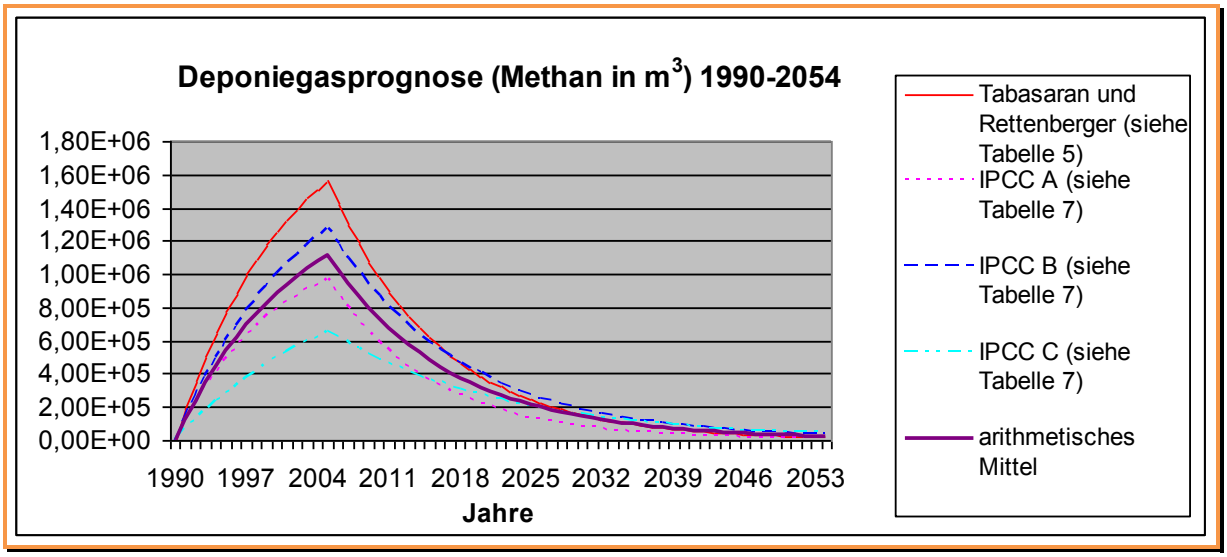


Abbildung 9: Vergleich der Deponiegasprognosen nach unterschiedlichen Berechnungsmodellen.

Die Methanbildung ist bei der Berechnung nach Tabasaran und Rettenberger mit ca. 1,90E+07 m^3 Methan am höchsten. Für die weitere Vorgehensweise wird das arithmetische Mittel der fünf Berechnungen herangezogen. Für die Bilanzierung relevant sind die Emissionen ab dem Jahr 2004. In Tabelle 8 sind die dafür benötigten Daten ersichtlich.

Tabelle 8: Arithmetisches Mittel der Gasprognosen im Bilanzierungszeitraum nach unterschiedlichen Berechnungsmodellen und Parameterkombinationen bei einer angenommenen Gesamtfläche des Modellkompartiments von 2 ha.

Jahr	gebildetes Methan in m^3/a	$kg/m^2/a$	Jahr	gebildetes Methan m^3/a	$kg/m^2/a$
2004	1,07E+06	38,56	2030	1,44E+05	5,16
2005	1,11E+06	39,94	2031	1,33E+05	*4,77
2006	1,02E+06	36,69	2032	1,23E+05	4,41
2007	9,40E+05	33,71	2033	1,14E+05	4,08
2008	8,64E+05	30,98	2034	1,05E+05	3,77
2009	7,94E+05	28,48	2035	9,73E+04	3,49
2010	7,30E+05	26,19	2036	9,01E+04	3,23
2011	6,72E+05	24,09	2037	8,34E+04	2,99
2012	6,18E+05	22,16	2038	7,72E+04	2,77
2013	5,69E+05	20,4	2039	7,15E+04	2,57
2014	5,23E+05	18,77	2040	6,63E+04	2,38
2015	4,82E+05	17,28	2041	6,14E+04	2,2
2016	4,44E+05	15,92	2042	5,69E+04	2,04
2017	4,09E+05	14,66	2043	5,28E+04	1,89
2018	3,77E+05	13,51	2044	4,89E+04	1,76
2019	3,47E+05	12,45	2045	4,54E+04	1,63
2020	3,20E+05	11,48	2046	4,21E+04	1,51
2021	2,95E+05	10,58	2047	3,91E+04	1,4
2022	2,72E+05	9,76	2048	3,63E+04	1,3
2023	2,51E+05	9,01	2049	3,37E+04	1,21
2024	2,32E+05	8,31	2050	3,13E+04	1,12
2025	2,14E+05	7,67	2051	2,91E+04	1,04
2026	1,97E+05	7,08	2052	2,70E+04	0,97
2027	1,82E+05	6,54	2053	2,51E+04	0,9
2028	1,68E+05	6,04	2054	2,33E+04	0,84
2029	1,56E+05	5,58	**Summe**	**1,49E+07**	

*Einhaltung des Grenzwertes laut DVO 2008 bei offener Deponiefläche.

Im Zeitraum 2004-2054 würden insgesamt 1,49E+07 m^3 bzw. 1,07E+07 kg CH_4 gebildet werden. Der Grenzwert der Methanemissionen laut Deponieverordnung (*DVO*, 2008) von < 5 kg $CH_4/m^2/a$ würde ohne Deponieoberflächenabdeckung ab dem Jahr 2031, also erst 27 Jahre nach Deponieabschluss, eingehalten werden.

3.2.2 Sickerwasserprognose

In dieser Arbeit wird keine detaillierte Sickerwasserprognose erstellt, sondern im Rahmen des Basisszenarios und der Sensitivitätsanalyse unterschiedliche Sickerwasseranfallsmengen und die durch den Transport und die Behandlung des Sickerwassers verursachten Auswirkungen auf den Treibhauseffekt berechnet.

3.3 Untersuchungsrahmen und Systemgrenzen

Die Bestimmung des Untersuchungsrahmens, der Systemgrenzen und des Detaillierungsgrades einer Ökobilanz ist vom Untersuchungsgegenstand und den spezifischen Forschungsfragen der Studie abhängig. In der Norm DIN EN ISO 14040ff

(2006) wird für die Festlegung der Systemgrenzen eine Reihe von Kriterien angegeben. Anhand dieser Kriterien wird beschrieben, welche Prozessmodule in das Produktsystem integriert werden. Die Systemgrenze ist dabei hinsichtlich zeitlicher, räumlicher und technischer Grenzen festzulegen. In dieser Arbeit sollen unterschiedliche Möglichkeiten der Abfallablagerung betrachtet werden. Daher befinden sich die Abfallentstehung und die Transporte der Abfälle zur Deponie außerhalb der Systemgrenzen. Folgende, für den Vergleich der Szenarien relevante Prozesse, werden in der Bilanzierung berücksichtigt:

- Herstellung der Materialien
- Transport der Materialien zur Deponie
- Aufbringung der Oberflächenabdeckungen
- Methanemissionen der Deponie
- Sickerwasser (Sickerwasserbehandlung, Sickerwasser- u. Konzentrattransport und Entsorgung d. Konzentrats)
- Monitoring

In Abbildung 10 sind die Systemgrenzen der Szenarien vereinfacht grafisch dargestellt.

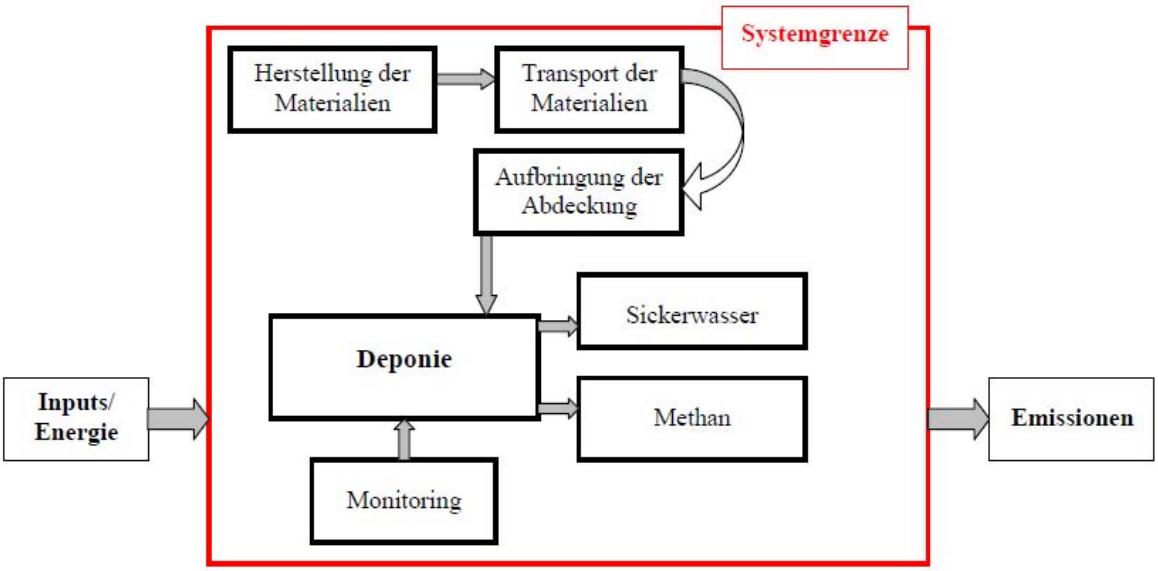


Abbildung 10: Vereinfachte Darstellung des Systems der Szenarien.

3.3.1 Zeitliche Charakterisierung

Der zeitliche Rahmen der Ökobilanzierung ist im Bereich der Abfallwirtschaft, vor allem bei der Bilanzierung von Deponienauswirkungen, mit gewissen Problemen behaftet. Besonders die sehr schwer zu quantifizierbaren Langzeitauswirkungen von Deponien, welche über Jahrhunderte messbar sein können, sind mit Unsicherheiten behaftet. In dieser Arbeit beginnt die Bilanzierung im Jahr 2004, also nach erfolgter Deponierung, mit der Aufbringung der temporären Deponieoberflächenabdeckung. Die temporäre Abdeckschicht ist für maximal 20 Jahre zugelassen. Der betrachtete Zeitraum wird daher in 20 Jahre der temporären Abdeckung und anschließend 30 Jahre (Mindestnachsorgezeitaum gemäß EU-Deponierichtlinie 1999/31/EG) der endgültigen Abdeckung unterteilt. Für das Szenario

„Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ werden auch die langfristigen Emissionen (Methanemissionen), welche außerhalb des Bilanzierungszeitraumes zu erwarten sind, berücksichtigt und in den Ergebnissen dargestellt.

3.3.2 Räumliche Charakterisierung

In dieser Diplomarbeit wird ein Kompartiment einer Siedlungsabfalldeponie modelliert. Durch die geografische Lage werden der mittlere Jahresniederschlag und die mittlere Jahrestemperatur bestimmt. Dafür werden die mittleren Werte für Ostösterreich (Raum Wien) gewählt. Anhand einer Zeitreihe für Klimadaten (1971-2000, gemessen auf der Hohen Warte in Wien) der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2012) werden die mittlere Jahrestemperatur mit 10°C und der mittlere Jahresniederschlag mit 650 mm festgelegt. Weitere Annahmen für die Modellierung des Deponiekompartiments sind:

- Fläche: 2 ha
- Schütthöhe: 15 m
- Volumen: 300.000 m^3
- Masse: 270.000 t (Dichte: 0,9 t/m^3)

Die Dichte der Abfälle wurde anhand einer Zusammenstellung unterschiedlicher Einbaudichten (für Restmülldeponien) verschiedener Autoren gewählt. Die Angaben variieren zwischen 0,8 und 1,0 t/m^3, die Dichte wird daher mit 0,9 t/m^3 angenommen (*BRUNNER et al.,* 2000).

3.3.3 Technische Charakterisierung

Mithilfe der in der Datenbank der Software GaBi 6.0 education (2012) (Ganzheitliche Bilanzierung) enthaltenen Dokumentationen wurden technisch geeignete Prozesse ausgewählt, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Da die Bilanzierung erst nach Beendigung der Ablagerung ansetzt, werden die Deponieeinrichtungen, die für die Bilanzierung der Abdeckschichten nicht relevant (wie z.B. Basisabdichtung, Basisentwässerung, Gaserfassung etc.) und für alle Szenarien gleich sind, als gegeben und für den Bilanzierungszeitraum als funktionstüchtig angesehen. Die genaue technische Beschreibung der Prozesse findet im Kapitel „Sachbilanz“ statt.

3.4 Funktionelle Einheit

Die Funktionen (Leistungsmerkmale) des untersuchten Systems müssen im Rahmen des Untersuchungsrahmens einer Ökobilanz eindeutig festgelegt werden (DIN EN ISO 14040ff, 2006). Die funktionelle Einheit hat als Hauptzweck die Angabe einer Bezugsgröße, auf die sich die Input- und Outputdaten beziehen und soll dem Zweck des untersuchten Systems Ausdruck verleihen. In dieser Arbeit wird die funktionelle Einheit als

ein m^2 abgedeckte Fläche des Modelldeponiekompartiments

definiert.

3.5 Szenarienbeschreibung

In diesem Kapitel werden die drei zu vergleichenden Szenarien beschrieben. Die für die Bilanzierung verwendeten Daten sind in der Sachbilanz detailliert dargestellt (siehe Kapitel 4). Prantl (2009) schlägt in einer Studie verschiedene Lösungsansätze für temporäre Deponieoberflächenabdeckungen sowie für den Übergang zur endgültigen Abdeckung vor. Die Szenarien in dieser Diplomarbeit sind in Anlehnung an diese Lösungsansätze konzipiert. Die temporäre Abdeckung ist bei allen drei Szenarien identisch. Sie besteht aus einer 1,5 m mächtigen Evapotranspirationsschicht, welche in der Lage sein soll, genügend Wasser für den biologischen Abbau zu infiltrieren und das im Deponiegas enthaltene Methan zu oxidieren. Es wird untersucht, wie sich die Emissionen bei Anwendung verschiedener Annahmen bis zum Jahr 2024 (20 Jahre nach der Aufbringung der Schicht) entwickeln und wie der Übergang zur endgültigen Abdeckung ökologisch und ökonomisch am sinnvollsten gestaltet werden kann.

Referenzszenario „Evapotranspirationsschicht – 1,5 m“: Dieses Szenario ist jene Variante, bei der der Übergang zur endgültigen Abdeckung durch das Belassen der Schicht erfolgt.

Szenario „Erhöhung der Schichtstärke auf 2,5 m“: Bei diesem Szenario erfolgt der Übergang zur endgültigen Abdeckung durch eine Erhöhung der Schichtstärke auf 2,5 m. Das für die temporäre Abdeckschicht verwendete Material wird dabei weiterhin verwendet.

Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“: Bei diesem Szenario wird als Übergang zur endgültigen Abdeckung die Evapotranspirationsschicht entfernt und eine Abdeckung mit Entwässerungsschicht und Kombinationsdichtung gemäß DVO installiert. Es wird angenommen, dass das Material der temporären Abdeckung für die Rekultivierungsschicht der Abdeckung weiterverwendet wird

3.6 Wirkungskategorien und -indikatoren

Laut DIN EN ISO 14040ff (2006) werden bei der Wirkungsabschätzung die Ergebnisse der Sachbilanz einzelnen Wirkungskategorien zugeordnet. Das Ziel der Wirkungsabschätzung ist die Evaluierung der Bedeutung der potenziellen Umweltauswirkungen. Dabei werden die Sachbilanzdaten mit den Wirkungskategorien und -indikatoren verknüpft.

In dieser Arbeit wird jedoch keine vollständige Bewertung aller Umweltaspekte vorgenommen, da nur die im Ziel und Untersuchungsrahmen festgelegten Umweltthemen behandelt werden. Verbindlich vorgegebene Bestandteile einer Wirkungsabschätzung sind die Auswahl von Wirkungskategorien und -indikatoren und Charakterisierungsmodellen, die Klassifizierung und die Charakterisierung.

Als Klassifizierung wird die *„Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den ausgewählten Wirkungskategorien“* verstanden. Dabei ist zu beachten, dass manche Sachbilanzergebnisse ausschließlich einer einzelnen, andere wiederum mehreren Wirkungskategorien zuzuordnen sind. So können beispielsweise NO_x (Stickoxide) sowohl zur Bildung von bodennahem Ozon als auch zur Versauerung beitragen.

Als Charakterisierung wird die Berechnung der Indikatorwerte bezeichnet. Dabei werden die Sachbilanzergebnisse vereinheitlicht (in gemeinsame Einheiten umgewandelt) und diese dann innerhalb derselben Wirkungskategorie zusammengefasst. Dies geschieht mithilfe von Charakterisierungsfaktoren, durch die die spezifische Schadwirkung der emittierten Stoffe Berücksichtigung finden (*DIN EN ISO 14040,* 2006). Als Beispiel können hier die unterschiedlichen Treibhauspotenziale der Treibhausgase Kohlendioxid, Methan und Lachgas angeführt werden, welche in derselben Reihenfolge 1, 25 und 298 betragen (*IPPC*, 2007). Bezugnehmend auf das Thema der Arbeit entstehen Emissionen einerseits durch Abbauprozesse in der Deponie und andererseits durch Produktion, Transport und Aufbringung der für die Abdeckschichten benötigten Materialen. Eine wichtige Aufgabe von Deponieabdeckschichten ist es, die Auswirkungen auf den Klimawandel in Form von Methanemissionen möglichst gering zu halten. Deshalb wird in dieser Arbeit ausschließlich die Wirkungskategorie „Treibhauspotenzial“ berücksichtig. Die Methode der Wirkungsabschätzung beruht auf der CML-Methode aus dem Jahr 2001 (CML 2001), welche vom Umweltinstitut der Universität Leiden (Niederlande) entwickelt wurde. Dabei werden die Ergebnisse der Sachbilanz in Kategorien (Treibhauseffekt, Ökotoxizität, etc.) gruppiert. So wird die in dieser Arbeit betrachtete Wirkungskategorie Treibhauseffekt durch das Charakterisierungsmodell GWP (Global Warming Potential) beschrieben und mit CO_2-Äqu. als Wirkungsindikator dargestellt. Die für diese Wirkungskategorie relevantesten Indikatoren sind in Tabelle 9 angeführt.

Tabelle 9: Beispiele für Wirkungsfaktoren für die Wirkungskategorie Treibhauspotenzial. Quelle: PE (2012).

Treibhauspotenzial (GWP 100, CML 2001, Nov. 10)	
Stoff	*** kg CO2-Äqv.**
Kohlendioxid (CO2) [kg]	1
Methan (CH4) [kg]	25
Lachgas (N2O) [kg]	298

4 Sachbilanz

In der Sachbilanz erfolgt eine genaue Darstellung der im Untersuchungsrahmen festgelegten Prozesse. Alle in der Sachbilanz beschriebenen Güterflüsse basieren auf den jeweiligen Hintergrunddatensätzen der GaBi 6.0 Education Software, die alle Vor- und Nachketten der betrachteten Güter berücksichtigt. Die ökologische Bewertung der Ergebnisse findet in der Wirkungsabschätzung statt. In der Sachbilanz sind folgende Punkte enthalten:

- Beschreibung der Prozesse
- Quantifizierung aller relevanten Güter- und Stoffflüsse (Ressourcen, Treibstoffe, etc.)
- Beschreibung der Datenerhebungs- und Berechnungsmethoden

In diesem Kapitel erfolgt die Berechnung der Szenarien. Die temporäre Oberflächenabdeckung ist für alle drei Szenarien identisch. Durch die verschiedenen Übergänge zur endgültigen Abdeckung unterscheiden sich die Ergebnisse ausschließlich in den letzten 30 Jahren des Bilanzierungszeitraumes. In Kapitel 5.6 wird im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht, welchen Einfluss die Variation der verwendeten Parameter auf die Ergebnisse hat bzw. wie groß die Schwankungsbreite der Ergebnisse ist.

4.1 Temporäre Abdeckung

Die temporäre Abdeckung besteht aus einer 1,5 m mächtigen Evapotranspirationsschicht und ist für alle drei Szenarien identisch. In Abbildung 11 ist der Aufbau der Abdeckung schematisch dargestellt.

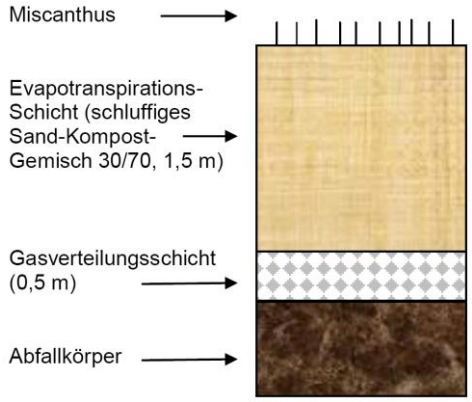


Abbildung 11: Schematische Darstellung der temporären Abdeckung.

4.1.1 Errichtung der temporären Abdeckung

Der Prozess „Errichtung der Evapotranspirationsschicht“ umfasst sämtliche Emissionen, die bei der Herstellung der Materialien, dem Transport der Materialien zur Deponie sowie bei der Aufbringung der Abdeckschicht entstehen.

4.1.1.1 Materialienherstellung

Für die temporäre Abdeckung werden die in Tabelle 10 aufgelisteten Materialien und Mengen benötigt.

Tabelle 10: Benötigte Materialmengen für die temporäre Abdeckung.

Schicht	Material	benötigte Menge für die gesamte Fläche (2 ha)
Gasverteilungsschicht (0,5 m)	kalkarmer Grobschotter Ø 16/32	10.000 m^3
Evapotranspirationsschicht (1,5 m)*	schluffiges Sand-Kompost-Gemisch (30/70)	34.000 m^3

*aufgrund von zu erwartenden Setzungen wird die Schichtstärke mit 1,7 m berechnet, um nach Setzungen eine Schichtstärke von ca. 1,5 m zu erreichen (WATTENDORF et al., 2002).

In die weitere Wirkungsabschätzung gehen nur die Umweltauswirkungen der primären Produktion von Schotter und Sand ein. Die Kompostherstellung wird in der Bilanzierung nicht berücksichtigt, da der Kompost nicht explizit für die Abdeckschicht, sondern ohnehin im Zuge der Behandlung von biogenen Abfällen hergestellt wird. Somit werden nur der Transport und die Aufbringung des Komposts auf die Deponieoberfläche in der Bilanzierung berücksichtigt.

4.1.1.2 Transport

Für den Materialtransport zur Deponie werden folgende Annahmen getroffen:

- Der Transport erfolgt per LKW mit 24,7 Tonnen Nutzlast (Abgasklasse EURO 5).
- Die Emissionen (kg CO_2-Äqu.) des Transportes werden mit einer Entfernung von 30 km (einfache Strecke) berechnet.

Tabelle 11 zeigt die Transportaufwendungen für die temporäre Abdeckung.

Tabelle 11: Transportaufwendungen für die temporäre Abdeckung - 30 km.

Transportaufwendungen für die temporäre Abdeckung - 30 km						
Materialien	**Volumen (m^3)**	**Schüttdichte***	**Masse (t)**	**benötigte LKW-Fahrten**	**Entfernung (km)**	**Diesel-verbrauch (kg)**
Schotter	10.000	2t/m^3	20.000	810	48.600	25.026
Kompost	23.800	0,7 t/m^3	16.660	675	40.500	20.847
Schluffiger Sand	10.200	1,5 t/m^3	15.300	620	37.200	19.145
Gesamt	**44.000**		**51.960**	**2.105**	**126.300**	**65.018**

*Schüttdichte laut BEWO Engineering GmbH (2013).

4.1.1.3 Aufbringen der temporären Abdeckung

In diesem Kapitel wird der Dieselverbrauch der Fahrzeuge und Maschinen, die zur Aufbringung der Abdeckung benötigt werden, dargestellt. Zuerst wird das Feinplanum (Begradigung der Fläche) des Abfallkörpers mittels einer Schubraupe hergestellt. Anschließend wird die Gasverteilungsschicht mittels Schubraupe und Walze aufgetragen.

Der Sand und der Kompost werden direkt auf der Deponieoberfläche abgeladen und mit einem Radschlepper und einer Anhängerfräse vermischt. Anschließend werden zur Verhinderung von Verdichtungen die Fahrwege mit einer Raupe mit Aufreißer aufgelockert. Die für alle drei Szenarien verwendeten Daten für die Aufbringung der Abdeckungen wurden von Schneider (2013) zur Verfügung gestellt. Tabelle 12 zeigt den Dieselverbrauch für die Aufbringung der gesamten temporären Abdeckung.

Tabelle 12: Dieselverbrauch bei der Aufbringung der temporären Abdeckung (20.000 m^2).

Dieselverbrauch bei der Aufbringung der temporären Abdeckung				
Leistung	**Maschinen**	**Leistung/Std.**	**Dieselverbrauch (l/Std.)**	**gesamter Dieselverbrauch (l)**
Herstellung Feinplanum (20.000 m^2)	Raupe	300 m^2	25	1.667
	Walze	300 m^2	15	1.000
Einbau Gasverteilungs-schicht (10.000 m^3)	Raupe	75 m^3	25	3.333
	Walze	75 m^3	15	2.000
Einbau Evapotranspirations-schicht (34.000 m^3)	Raupe	50 m^3	25	17.000
	Radschlepper mit Anhängefräse	100 m^3	25	8.500
	Raupe mit Aufreißer	250 m^3	25	3.400
gesamter Dieselverbrauch: 36.900 l (pro funktioneller Einheit: ~ 1,85 l)				

4.1.2 Emissionen der Deponie

Der Prozess „Emissionen der Deponie“ umfasst die Methanemissionen und die Emissionen, die unter getroffenen Annahmen durch den Transport und die Behandlung des Sickerwassers entstehen. Um die Werte, die in dieser Arbeit bzgl. der Methanoxidationsrate und des Sickerwasseranfalls angenommen werden, erreichen zu können, muss die temporäre Abdeckung technisch optimal ausgeführt sein. Wäre dies nicht der Fall, und würden somit die in der Deponieverordnung vorgegebenen Grenzwerte nicht eingehalten werden, müsste schon vor Ablauf der für eine temporäre Abdeckung maximal zugelassene Zeitraum von 20 Jahren die Abdeckung dementsprechend verändert werden.

4.1.2.1 Deponiegas

An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass in dieser Arbeit nicht das gesamte Deponiegas, sondern nur das darin enthaltene Methan betrachtet wird. Das im Deponiegas enthaltene Kohlendioxid ist biogenen Ursprungs und wird daher als klimaneutral angesehen.

Methanoxidation:

Huber-Humer et al. (2008) geben im „Technischen Leitfaden Methanoxidationsschichten“ an, dass durch den Einsatz von geeignetem Material eine Methanflächenbelastung von < 4 l $CH_4/m^2/h$ meist problemlos abgebaut werden kann. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen im Labor (siehe Anhang A „Methanoxidation“) zeigen, dass mit einem

Gemisch aus 70 % Klärschlammkompost und 30 % Sand bei einer CH_4-Zufuhr von 250 l/m^2/d (~ 10,4 l CH_4/m^2/h) Methanoxidationsraten von 75 – 100 % erreicht werden können. Bei Feldversuchen mit Methanoxidationsschichten aus Kompost-Sand-Gemischen (70/30) konnten Methanoxidationsraten von ca. 65 bis 75 % erreicht werden. Huber-Humer (2004) stellte bei einem Feldversuch mit einer 1,2 m mächtigen Methanoxidationsschicht, bestehend aus einer 0,3 m mächtigen Gasverteilungsschicht aus Schotter und einer darüber aufgebrachten 0,9 m mächtigen Schicht aus Klärschlammkompost, eine Emissionsreduktion von über 99 % im Vergleich zu einer Fläche ohne Oberflächenabdeckung fest. Gründe für geringere Oxidationsraten können z.B. eine zu hohe Verdichtung der Abdeckschicht, ein zu geringes Nährstoffangebot, schlechte Sauerstoffversorgung oder ein zu geringer Wassergehalt sein. Für den Fall, dass die Oberflächenabdeckung aufgrund eben genannter Gründe nicht optimal ausgeführt ist, werden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse 4 weitere Methanoxidationsraten betrachtet. Im Referenzszenario wird angenommen, dass die Evapotranspirationsschicht technisch optimal ausgeführt ist und eine Methanoxidationsrate von 90 % erreicht wird.

Aktive Entgasung:

Stegmann et al. (2006, zitiert in *KÜHLE-WEIDEMEIER und BOGON,* 2008) schlagen vor, bis zu einer Deponiegasproduktion von > 25 m^3 CH_4/h für die gesamte Fläche bzw. > 5 m^3 CH_4/h/ha (0,5 l CH_4/h/m^2) eine aktive Erfassung und Behandlung des Deponiegases zu bevorzugen. Erst bei Unterschreitung dieses Wertes soll die Erfassung und Behandlung hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Möglichkeit bzw. Zumutbarkeit überprüft werden. Das LfU Sachsen-Anhalt (2007, zitiert in *KÜHLE-WEIDEMEIER und BOGON,* 2008) empfiehlt demgegenüber eine Umstellung von aktiver auf passive Entgasung ab einer flächenspezifischen Deponiegasproduktionsrate von < 15 m^3 CH_4/h/ha (1,5 l CH_4/h/m^2) bzw. wie Stegmann et al. (2006) ab < 25 m^3 CH_4/h für die gesamte Fläche. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass vom Richtwert (1,5 l CH_4/h/m^2) abgewichen werden kann, sofern das Methan durch die Methanoxidation effektiv zu jeder Jahreszeit zu Kohlendioxid umgesetzt wird. In dieser Arbeit wird die Annahme getroffen, dass bis zum Jahr 2010 (Methanemissionen in diesem Jahr ~ 4,17 l CH_4/h/m^2) eine aktive Entgasung stattfindet. Die Herstellung und Errichtung der Anlagen zur aktiven Entgasung sowie deren Betrieb werden in der Bilanzierung nicht berücksichtigt. Die Gaserfassungsraten bei abgedeckten Deponien liegen laut Schachermayer und Lampert (2010) in der Regel zwischen 40 und 60 %. Die Art der Abdeckung hat insofern einen Einfluss auf die Gaserfassungsrate, da bei geringeren Gasdurchlässigkeiten der Schichten größere Mengen an Deponiegas unterhalb der Schicht erfasst werden können. Laut Krümpelbeck (2000) kann im Allgemeinen, in Abhängigkeit von der Dichtwirkung des Oberflächenabdichtungssystems, von einer Erfassungsrate von 30 – 90 % ausgegangen werden. Hinsichtlich der Methanoxidation muss die Abdeckschicht eine ausreichende Gasdurchlässigkeit aufweisen. So soll laut Huber-Humer et al. (2008) der

Mindestanteil an luftgefüllten Poren bei 100 % Wasserhaltekapazität 15 – 20 % betragen. In dieser Arbeit wird für die temporäre Abdeckung angenommen, dass bis zum Jahr 2010 50 % des Gases aktiv erfasst werden und im Zeitraum der temporären Abdeckung eine konstante Methanoxidationsrate von 90 % erreicht wird. Das erfasste Gas wird über eine Fackel verbrannt. Die Treibhausgasemissionen (CO_2) aus der Verbrennung werden in der Bilanzierung ebenfalls nicht berücksichtigt, da, wie bereits erwähnt, das entstehende Kohlendioxid biogenen Ursprungs ist und somit als klimaneutral angesehen wird. Unter den getroffenen Annahmen betragen die Methanemissionen in den Jahren 2004 – 2025 insgesamt 652.336 kg Methan (pro FE: 32,6 kg CH_4). Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden weitere Gaserfassungs- und Methanoxidationsraten untersucht.

4.1.2.2 Sickerwasserbehandlung

In der vorliegenden Arbeit werden für die Sickerwasserbehandlung folgende Aufwände berücksichtigt: Transport des Sickerwassers zu einer Behandlungsanlage, Transport des Konzentrats zur Entsorgung und der Energieverbrauch der Behandlungsanlage. Die Vorgehensweise für die Berechnungen der Sickerwasserbehandlung in dieser Arbeit ist an Strimitzer (2011) angelehnt. Der wesentlichste Faktor bei der Abschätzung der Sickerwassermenge ist die Niederschlagsmenge. Diese wird aufgrund einer Zeitreihe der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2012) für den Raum Wien mit 650 mm mittlerer Jahresniederschlag festgelegt. Laut Huber-Humer et al. (2008) kann der Sickerwasseranfall bei den in Ostösterreich herrschenden Klimabedingungen (Jahresniederschlag < 700 mm) mit einer 1 m mächtigen Methanoxidationsschicht auf Kompostbasis in Kombination mit einem entsprechenden Bewuchs (z.B. Miscanthus) auf < 10% des Jahresniederschlages reduziert werden. Laut DVO (2008) müssen die Sickerwasseremissionen bei Deponien mit einer Oberflächenabdichtung < 5% des mittleren Jahresniederschlages spätesten fünf Jahre nach Aufbringung der Abdichtung sein. Bei dem in dieser Arbeit gewählten Jahresniederschlag von 650 mm sind dies < 32,5 mm/m^2. Auf die gesamte Fläche des Modelldeponiekompartiments hochgerechnet ergibt sich somit ein jährlicher Sickerwasseranfall von 650 m^3. Für das Referenzszenario wird angenommen, dass durch die Evapotranspirationsschicht die Sickerwassermenge auf knapp unter 5% des jährlichen Niederschlags (645 m^3 = 4,96%) reduziert werden kann. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden für den Fall, dass der in der Deponieverordnung vorgegebene Grenzwert nicht erreicht werden kann, drei weitere Sickerwassermengen betrachtet.

Des Weiteren wird angenommen, dass das gesamte gefasste Sickerwasser zu einer Sickerwasserreinigungsanlage transportiert und dort behandelt wird (Biologie: Nitrifikation, Denitrifikation; Mikrofiltration; pH-Korrektur; Umkehrosmose). Die durchschnittlich behandelte Sickerwassermenge der Anlage beträgt 20.500 m^3/Jahr. Jährlich fallen in der Reinigungsanlage 4.427 m^3 Konzentrat an. Das anfallende Permeat wird direkt in ein

Fließgewässer eingeleitet (*SCHACHERMAYER und LAMPERT*, 2010). Bspw. hat bei einem Sickerwasseranfall von 645 m^3/Jahr das Modelldeponiekompartiment einen Anteil von ca. 3,14% an der jährlich behandelten Sickerwassermenge der Anlage. Bezogen auf das Konzentrat wären dies 139 m^3 (2.780 m^3 in 20 Jahren). Die Berechnungen sind im Kapitel 4.5 Basisinventar ersichtlich. In Österreich ist es laut Schachermayer und Lampert (2010), neben der Verbrennung und der chemisch-physikalischen Behandlung, mitunter üblich, anfallende Rückstände (Konzentrat) der Sickerwasserbehandlung zu deponieren (in der Bilanzierung berücksichtigt). In dieser Arbeit wird angenommen, dass das gesamte Konzentrat deponiert wird. In der Regel erfolgt bei steigendem Sickerwasseranfall ein gewisser Verdünnungseffekt, wodurch der Konzentratanfall nicht 1:1 mit dem erhöhten Sickerwasseranfall einhergeht. Da in dieser Arbeit der Konzentratanfall jedoch anteilsmäßig an der jährlichen Konzentratmenge der herangezogenen Behandlungsanlage berechnet wird, steigt der Anfall analog zur Sickerwassermenge. Der Transport des Sickerwassers und des Konzentrats erfolgt mit einem LKW mit 24,7 t Nutzlast, Abgasklasse EURO 5 (siehe Kapitel 4.5 Basisinventar). Das Sickerwasser wird über eine Strecke von 100 km zur Behandlungsanlage, das Konzentrat 35 km (regional) zur Deponie transportiert (jeweils einfache Strecke).

Die Berechnungsmethode des Energieverbrauchs der Sickerwasserbehandlung ist in Kapitel 4.5 Basisinventar ersichtlich. Tabelle 13 zeigt die Transportaufwendungen und den Energieverbrauch der Sickerwasserbehandlung.

Tabelle 13: Aufwände der Sickerwasserbehandlung (gesamtes Modelldeponiekompartiment) in der Phase der temporären Abdeckung.

Aufwände der Sickerwasserbehandlung in der Phase der temporären Abdeckung				
	Menge	Transportaufwendungen		Energieverbrauch
		Kilometerleistung	Dieselverbrauch	
Sickerwasser	12.900 m^3	104.600 km	53.806 kg	901.108 kWh
Konzentrat	2.780 m^3	7.879 km	4.058 kg	-

4.1.3 Monitoring

Der Prozess „Monitoring“ enthält sämtliche Fahrten, die in Zusammenhang mit der Deponiegas- und Sickerwasserkontrolle stehen. Bei einer Methanoxidationsschicht ist laut Huber-Humer et al. (2008) eine Abnahmeprüfung innerhalb des ersten Jahres nach Fertigstellung der Methanoxidationsschicht zu beginnen. Dabei handelt es sich um eine Erstüberprüfung der Funktionstüchtigkeit. Die Abnahmeprüfung beinhaltet eine qualitative Überprüfung der gesamten relevanten Fläche mittels FID-Rastermessung (Flammen-Ionisations-Detektor) mindestens einmal/Quartal. Zusätzlich zu der FID-Messung müssen zwei CH_4- und CO_2-Massenstrom-Messungen durchgeführt werden (im 1. Jahr). In den Folgejahren nach der Abnahmeprüfung muss wiederum einmal jährlich eine großflächige FID-Rastermessung durchgeführt werden. Die Methodik der FID-Begehungen wird hier nicht

näher beschrieben. Laut DVO (2008) sind die in Tabelle 14 aufgelisteten Maßnahmen für die Kontrolle der Emissionen und Immissionen des Deponiekörpers während der Nachsorgephase zu setzen.

Tabelle 14: **Kontrollmaßnahmen in der Nachsorgephase (DVO, 2008).**

Maßnahmen	Durchführungsintervall
Deponiesickerwasservolumen	halbjährlich
Zusammensetzung des Deponiesickerwassers	halbjährlich
Volumen und Zusammensetzung des Oberflächenwassers	halbjährlich
Zusammensetzung des Grundwassers	jährlich
Grundwasserspiegel	vierteljährlich
Potenzielle Gasemissionen und atmosphärischer Druck	halbjährlich
Setzungsverhalten des Deponiekörpers	jährlich

Es wird angenommen, dass die Überprüfungsmaßnahmen gemeinsam im Rahmen einer Fahrt durchgeführt werden. Das heißt, dass bei der Kontrolle des Deponiesickerwasservolumens auch die Zusammensetzung des Sickerwassers, das Volumen und die Zusammensetzung des Oberflächenwassers, die Zusammensetzung des Grundwassers und der Grundwasserspiegel kontrolliert werden. Für den Grundwasserspiegel sind zusätzlich 2 Fahrten/Jahr notwendig, da dieser vierteljährlich kontrolliert werden muss. Die Fahrstrecke wird mit 40 km (Hin- und Rückfahrt; Kontrolle durch regionale Überprüfungsorgane) festgelegt. In Tabelle 15 sind die Aufwände des Prozesses „Monitoring“ dargestellt.

Tabelle 15: Aufwände des Prozesses „Monitoring“ in der Phase der temporären Abdeckung.

Aufwände des Prozesses "Monitoring" in der Phase der temporären Abdeckung				
Maßnahme		**Häufigkeit**	**Kilometer-leistung**	**Diesel-verbrauch**
Abnahmeprüfung im ersten Jahr nach der Aufbringung	FID-Messungen	4x im 1.Jahr	**Gesamt: 3440 km**	**213 kg**
	CH_4- und CO_2-Massenstrom Messungen	zusätzlich 2x im 1.Jahr		
Monitoring in den Folgejahren	Überprüfungfahrten und Kontrolle des Grundwasserspiegels	insg. 4x/Jahr		

4.2 Referenzszenario „Evapotranspirationsschicht – 1,5 m“

Das Referenzszenario stellt jene Variante dar, bei der die 1,5 m mächtige Evapotranspirationsschicht nach Ablauf der 20 Jahre, für die die temporäre Abdeckung laut DVO 2008 maximal zugelassen ist, auf der Deponieoberfläche unverändert belassen wird. Der Sickerwasseranfall und die Methanemissionen werden daher für die restlichen 30 Jahre des Bilanzierungszeitraumes mit denselben wie für die temporäre Abdeckung verwendeten Annahmen berechnet.

4.2.1 Emissionen der Deponie

Die Methan- u. Sickerwasseremissionen für die restlichen 30 Jahre des Bilanzierungszeitraumes (endgültige Abdeckung) werden wie in der Phase der temporären Abdeckung mit einer Methanoxidationsrate von 90 % und einem Sickerwasseranfall von 4,96 % berechnet.

4.2.1.1 Deponiegas

Die Methanemissionen des Referenzszenarios betragen bei einer Oxidationsrate von 90 % im Zeitraum 2025-2054 184.706 kg CH_4. Die detaillierten Daten sind in Anhang A „Gasprognose und Methanoxidation“ ersichtlich.

4.2.1.2 Sickerwasserbehandlung

Der Sickerwasseranfall wird weiterhin mit 4,96 % des mittleren jährlichen Niederschlags berechnet. Der Konzentratanfall und der Energieverbrauch werden wiederum anteilsmäßig an der gesamten behandelten Sickerwassermenge/Jahr der Anlage berechnet (siehe Kapitel 4.5 Basisinventar). In Tabelle 16 sind die Aufwände der Sickerwasserbehandlung in diesem Szenario dargestellt.

Tabelle 16: Aufwände der Sickerwasserbehandlung des Referenzszenarios in der Phase der endgültigen Abdeckung.

Aufwände der Sickerwasserbehandlung des Referenzszenarios in der Phase der endgültigen Abdeckung				
	Menge	Transportaufwendungen		Energieverbrauch
		Kilometerleistung	Dieselverbrauch	
Sickerwasser	19.350 m^3	156.680 km	80.708 kg	1.351.770 kWh
Konzentrat	4.170 m^3	11.817 km	6.088 kg	-

4.2.2 Monitoring

Der Prozess „Monitoring“ unterscheidet sich im Zeitraum der endgültigen Abdeckung hinsichtlich des Fehlens der Abnahmeprüfung der Methanoxidationsschicht. Die jährlichen Überprüfungsfahrten sind identisch mit jenen in der Phase der temporären Abdeckung. Bei vier Überprüfungsfahrten/Jahr und einer Fahrstrecke von 40 km (Hin- und Rückfahrt) ergibt sich in 30 Jahren eine Gesamtstrecke von 4.800 km. Dafür werden 298 kg Diesel benötigt.

4.3 Szenario „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“

Das Szenario „Evaportranspirationsschicht - 2,5 m“ unterscheidet sich zum Referenzszenario durch ein verändertes Emissionsverhalten und erhöhte Aufwendungen bei der Errichtung der Abdeckung (Erhöhung auf 2,5 m). In Abbildung 12 ist der Aufbau der Abdeckung (endgültige Abdeckung) schematisch dargestellt.

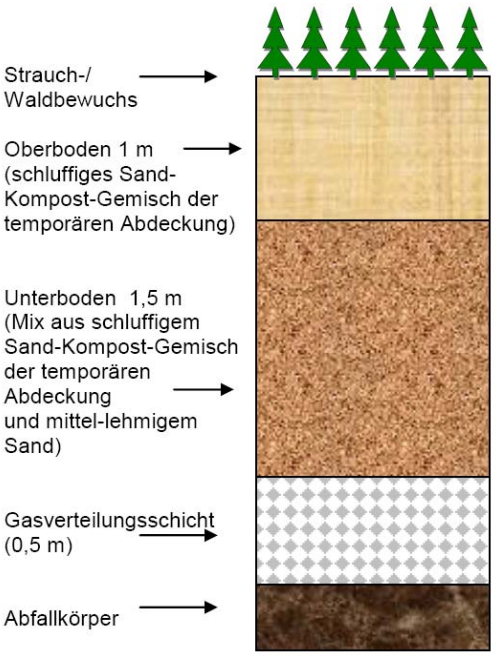


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Übergangs zur endgültigen Abdeckung des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“.

4.3.1 Errichtung einer 2,5 m mächtigen Evapotranspirationsschicht

An dieser Stelle erfolgt die Darstellung der benötigten Prozesse für die Erhöhung der Schicht. Dazu zählen die Herstellung und der Transport der zusätzlich benötigten Materialien sowie deren Aufbringung auf die Deponieoberfläche.

4.3.1.1 Materialienherstellung

Die Emissionen der Materialienherstellung werden an dieser Stelle nicht gesondert dargestellt. In den Ergebnissen (siehe Kapitel 5 Wirkungsbilanz) sind die Emissionen der Produktionsvorketten (Gewinnung der Rohstoffe etc.) enthalten. Für die Erhöhung der Abdeckschicht werden lediglich 20.000 m^3 mittel-lehmiger Sand für den Unterboden benötigt, da das Material der temporären Abdeckung (0,5 m für den Unterboden, 1 m für den Oberboden) weiterverwendet wird.

4.3.1.2 Transport

Der Transport des Bewuchses wird als vernachlässigbar angesehen (eine Fahrt) und daher nicht berücksichtigt. Der gesamte Transport für dieses Szenario setzt sich aus dem Transport der Materialien der temporären Abdeckung und den zusätzlich benötigten Materialien für den Übergang zur endgültigen Abdeckung zusammen. Tabelle 17 zeigt die Transportaufwendungen des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“.

Tabelle 17: Transportaufwendungen für die Erhöhung der Abdeckung – 30 km.

Transportaufwendungen für die Erhöhung der Abdeckung - 30 km						
Materialien	**Volumen (m^3)**	**Schüttdichte***	**Masse (t)**	**benötigte LKW-Fahrten**	**Entfernung (km)**	**Diesel-verbrauch (kg)**
mittel-lehmiger Sand	20.000	2t/m^3	40.000	1.619	**97.166**	**50.052**
temp. Abdeckung	44.000		51.960	2.105	**126.300**	**65.018**
Gesamt (temp. und endg. Abdeckung)					**223.466**	**115.070**

*Schüttdichte laut BEWO Engineering GmbH (2013).

4.3.1.2.1 Dieselverbrauch der Aufbringung der 2,5 m mächtigen Abdeckung

Beim Prozess „Aufbringung“ sind neben dem Abtragen der temporären Evapotranspirationsschicht der Einbau des Unterbodens und des Oberbodens erforderlich. Die Entfernung des Bewuchses wird nicht berücksichtigt. Für die Erhöhung der Mächtigkeit wird lediglich das Material für den Unterboden benötigt. Im Sinne der Schonung natürlicher Ressourcen werden zwei Drittel des Materials der temporären Abdeckung (1,0 m) für den Oberboden der Evapotranspirationsschicht verwendet, das restliche Drittel (0,5 m) wird mit dem Material des Unterbodens, mittel-lehmigem Sand, vermischt. Das schluffige Sand-Kompost-Gemisch der temporären Abdeckung wird zunächst abgetragen und zwischengelagert. Anschließend werden der mittel-lehmige Sand und 0,5 m des zwischengelagerten Materials aufgebracht und wie beim Einbau der temporären Abdeckung eingefräst. Tabelle 18 zeigt den Dieselverbrauch der Aufbringung der 2,5 m mächtigen Abdeckung.

Tabelle 18: Dieselverbrauch bei der Erhöhung der Schichtstärke auf 2,5 m (20.000 m^2).

Dieselverbrauch bei der Erhöhung der Schichtstärke auf 2,5 m				
Leistung	**Maschinen**	**Leistung/Std.**	**Dieselverbrauch (l/Std.)**	**gesamter Dieselverbrauch (l)**
Abtragung d. Evapotranspirationsschicht (30.000 m^3)	Bagger	80 m^3	20	7.500
	2 Dumper	je 40 m^3	20	15.000
Einbau des Unterbodens (20.000 m^3)	Raupe	50 m^3	25	10.000
	Radschlepper mit Anhängefräse	100 m^3	25	5.000
	Raupe mit Aufreißer	250 m^3	25	2.000
Einbau des Oberbodens (34.000 m^3)	Bagger	100 m^3	25	8.500
	2 Dumper	je 50 m^3	20	13.600
	Raupe	75 m^3	25	11.334
	Raupe mit Aufreißer	250 m^3	25	3.400
gesamter Dieselverbrauch: 76.334 l (pro funktioneller Einheit: ~ 3,82 l)				

4.3.2 Emissionen der Deponie

In diesem Kapitel wird darauf eingegangen, wie sich durch die Erhöhung der Evapotranspirationsschicht das Emissionsverhalten der Deponie verändert.

4.3.2.1 Methanemissionen nach Erhöhung der Schichtstärke

Für den Zeitraum nach der Erhöhung der Schichtstärke auf 2,5 m, also in den Jahren 2024 – 2054, wird wie im Referenzszenario ein „Idealer Ablauf“ angenommen. Das bedeutet, dass 90 % des Methans in der Evapotranspirationsschicht oxidiert werden. Somit ergeben sich für den Zeitraum der endgültigen Abdeckung dieselben Restmethanemissionen (pro FE: 9,24 kg CH_4) wie im Referenzszenario.

4.3.2.2 Sickerwasser

Für den Zeitraum nach der Erhöhung der Abdeckschicht um einen Meter und der dadurch erhöhten Speicherkapazität wird auch ein niedrigerer Wert für die Sickerwassermenge herangezogen. Es wird angenommen, dass durch die endgültige Abdeckung der Sickerwasseranfall auf 2% des mittleren Jahresniederschlages reduziert werden kann. Der Sickerwasseranfall der gesamten Fläche würde demnach 260 m^3/Jahr bzw. 7.800 m^3 (pro FE: 0,39 m^3) in den Jahren 2025-2054 betragen. Der gesamte Sickerwasseranfall wird per Tanklaster mit 24,7 t Nutzlast zu einer Sickerwasserreinigungsanlage transportiert. Die Berechnungen für diesen Prozess erfolgen identisch mit jenen des Referenzszenarios, d.h. das Konzentrat wird anteilig an der behandelten Sickerwassermenge/Jahr der Anlage berechnet. Bei einer jährlich behandelten Sickerwassermenge von 20.500 m^3 hat der Sickerwasseranfall des Modelldeponiekompartiments (260 m^3/Jahr) einen Anteil von 1,268 %. In Tabelle 19 sind die Aufwände der Sickerwasserbehandlung dargestellt.

Tabelle 19: Aufwände der Sickerwasserbehandlung des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ in der Phase der endgültigen Abdeckung.

Aufwände der Sickerwasserbehandlung im Szenario "Evapotranspirationsschicht - 2,5 m" in der Phase der endgültigen Abdeckung				
	Menge	Transportaufwendungen		Energieverbrauch
		Kilometerleistung	Dieselverbrauch	
Sickerwasser	7.800 m^3	63.158 km	32.534 kg	545.874 kWh
Konzentrat	1.684 m^3	4.773 km	2.459 kg	-

4.3.3 Monitoring

Der Prozess „Monitoring“ unterscheidet sich in diesem Szenario durch die erneute Abnahmeprüfung im ersten Jahr nach der Erhöhung der Schicht. Es kommen also zu den insgesamt 4.800 km nochmals 240 km dazu. Der gesamte Input des Prozesses „Monitoring“ für das Szenario „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ in der Phase der endgültigen Abdeckung beträgt demnach 313 kg Diesel (5.040 km).

4.4 Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“

Beim Szenario „Abdichtung mit Dichtelement gemäß DVO“ erfolgt der Übergang zur endgültigen Abdeckung durch die Entfernung der Evapotranspirationsschicht und anschließender Aufbringung einer Kombinationsdichtung gemäß Deponieverordnung 2008. Durch die Abdichtung der Deponieoberfläche ergeben sich hinsichtlich der Gasbildung bzw. dem Verbleib des Gaspotenziales im Deponiekörper einige Schwierigkeiten bzw. Fragen, die im Kapitel 4.4.2 behandelt werden. Abbildung 13 stellt den Aufbau der „Abdichtung mit Dichtelement gemäß DVO“ schematisch dar.

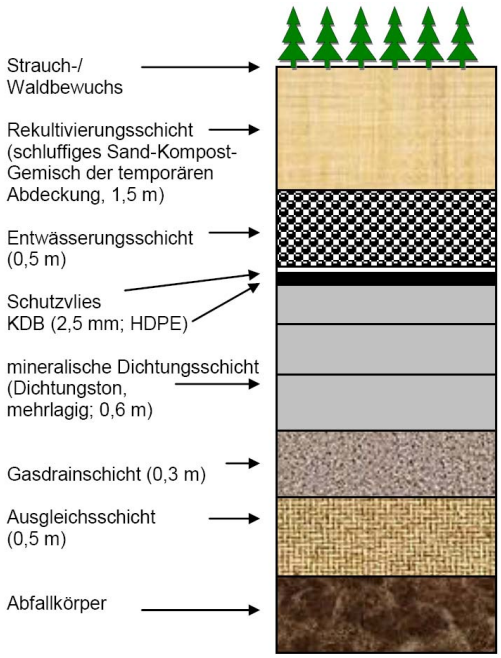


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Übergangs zur endgültigen Abdeckung des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“.

4.4.1 Errichtung einer Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO.

Die Errichtung der Abdeckung beinhaltet die Herstellung der Materialien, den Transport ebenjener zur Deponie sowie die Aufbringung der Abdeckung auf die Deponieoberfläche.

4.4.1.1 Materialienherstellung

In den Ergebnissen der Ökobilanzierung werden die einzelnen Materialien nicht gesondert aufgelistet, sondern ausschließlich der gesamte Prozess „Herstellung“ dargestellt. Bei den für dieses Szenario benötigten Materialien sind die Produktionsvorketten ebenfalls in der Bilanzierung enthalten. Folgende Materialien werden für die Abdeckung dieses Szenarios benötigt:

Tabelle 20: Benötigte Materialien für die Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO.

Schicht	Material	benötigte Menge für die gesamte Fläche (2 ha)
mineralische Dichtungsschicht	Dichtungston	12.000 m^3
Kunststoffdichtungsbahn (KDB)*	PE-HD	20.000 m^2
Schutzvlies für KDB*	Polypropylen	20.000 m^2
Entwässerungsschicht	Schotter 16/32	10.000 m^3

* Überlappungen bei der Verlegung werden nicht berücksichtigt.

4.4.1.2 Transport

Die zuvor abgetragene Evapotranspirationsschicht wird in diesem Szenario als Rekultivierungsschicht weiterverwendet. Tabelle 21 zeigt die Transportaufwendungen des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“.

Tabelle 21: Transportaufwendungen des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“.

Transportaufwendungen für die "Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO" - Basisszenario (30 km)						
Materialien	**Volumen (m^3)**	**Schüttdichte***	**Masse (t)**	**benötigte LKW-Fahrten**	**Entfernung (km)**	**Diesel-verbrauch (kg)**
Ton für die mineralische Dichtung	12.000	2 t/m^3	24.000	972	58.320	30.031
Schotter für die Entwässerungsschicht (Rundkorn 16/32)	10.000	2 t/m^3	20.000	810	48.600	25.026
PE-HD Dichtungsbahnen		2,25 kg/m^2	45	2	120	57
Schutzvlies		1 kg/m^2	20	1	60	25
Gesamt (endg. Abdeckung)					**107.100**	**55.139**
Gesamt (temp. und endg. Abdeckung)					**233.400**	**120.157**

*Schüttdichte Ton und Schotter laut BEWO Engineering GmbH (2013).

4.4.1.3 Aufbringen der Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO

Beim Übergang zur Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO muss zuerst die Evapotranspirationsschicht abgetragen und zwischengelagert werden. Dieses schluffige Sand-Kompost-Gemisch wird anschließend für die Rekultivierungsschicht weiterverwendet. Das Aufbringen einer Ausgleichs- bzw. Gasdrainageschicht ist nicht notwendig, da jene der temporären Abdeckung auf der Deponie belassen wird. Darüber wird die mineralische Dichtungsschicht aufgebracht. Das Aufbringen der Kunststoffdichtungsbahn (KDB) und des Schutzvlieses wird aufgrund vernachlässigbarer Emissionen nicht berücksichtigt. In Tabelle 22 sind die Arbeitsschritte mit den dafür benötigten Fahrzeugen/Maschinen, die jeweiligen Leistungen/Std. und der sich daraus ergebende Dieselverbrauch dargestellt.

Tabelle 22: Dieselverbrauch beim Aufbringen der „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ (20.000 m²).

Dieselverbrauch bei der Aufbringung der "Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO"				
Leistung	**Maschinen**	**Leistung/Std.**	**Dieselverbrauch (l/Std.)**	**gesamter Dieselverbrauch (l)**
Abtragung der Evapotranspirationsschicht (30.000 m³)	Bagger	80 m³	20	7.500
	2 Dumper	je 40 m³	20	15.000
Herstellung Feinplanum und Verdichtung der Gasdrainschicht (20.000 m²)	Raupe	300 m²	25	1.667
	Walze	300 m²	15	1.000
Einbau d. mineralischen Dichtungsschicht (12.000 m³)	Raupe	40 m³	25	7.500
	Radschlepper mit Anhängefräse	40 m³	25	7.500
	Walze	40 m³	15	4.500
	Walze	200 m²	15	1.500
	Walze	200 m²	10	1.000
Einbau der Entwässerungsschicht (10.000 m³)	Bagger	30 m³	20	6.667
	Dumper	30 m³	20	6.667
	Raupe	200 m²	25	2.500
Einbau der Rekultivierungsschicht (30.000 m³)	Bagger	100 m³	25	7.500
	2 Dumper	je 50 m³	20	12.000
	Raupe	75 m³	25	10.000
	Raupe mit Aufreißer	250 m³	25	3.000
gesamter Dieselverbrauch: 95.501 l (pro funktioneller Einheit: ~ 4,78 l)				

4.4.2 Emissionen der Deponie

Die Sickerwasser- und Methanemissionen während der Phase der temporären Abdeckung sind für alle drei Szenarien identisch. Für den Zeitraum nach der Aufbringung der Abdichtung nach Regelaufbau laut DVO 2008 ergeben sich aufgrund der Dichtwirkung dieser Abdeckung andere Voraussetzungen. Dies wird in den folgenden Kapiteln erörtert.

4.4.2.1 Deponiegas

Die Abschätzung der zu erwartenden Methanemissionen aus abgedichteten Deponien ist insofern problematisch, da der Zeitpunkt des Nachlassens der Dichtwirkung nicht vorhergesagt werden kann. Durch Deponieoberflächenabdichtungen wird der Wassereintritt in den Deponiekörper weitgehend unterbunden. Dadurch werden die Deponiegasbildung und somit auch potenzielle Gasemissionen auf nicht vorhersagbare Zeiträume verschoben. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Dichtwirkung früher oder später nachlassen wird, Wasser in den Deponiekörper zumindest lokal wieder eindringen kann (meist an bevorzugten Wegigkeiten), bereichsweise der mikrobielle Abbau der Abfallorganik und damit die Deponiegasbildung wieder startet und das gebildete Methan dann in die Atmosphäre entweichen kann. Zum Zeitpunkt der Abdichtung der Deponieoberfläche ist im

Deponiekörper noch Wasser enthalten, wodurch auch die Deponiegasbildung nicht sofort zum Erliegen kommt. Das gebildete Gas muss daher noch gezielt abgeleitet werden. Eine Möglichkeit stellt dabei die Integration von Methanoxidationsfenstern in die Oberflächenabdichtung dar. Dies ermöglicht, je nach Größe der Fenster, auch die Infiltration einer gewissen Wassermenge in den Deponiekörper und somit die Bildung von Deponiegas in den Umgebungsbereichen der Fenster. Deponiegas, das infolge des erneuten Wassereintritts durch Schäden in der Abdichtung entsteht, kann bei entsprechender Ausführung einer Gasverteilungsschicht ebenfalls passiv in die Methanoxidationsfenster strömen und abgebaut werden. Ein Teil des Gases wird vermutlich auch an bevorzugten Austrittsstellen („hot spots“, bevorzugte Wegigkeit an Rissbildungen etc.) erfolgen und nicht in den Methanoxidationsfenstern bzw. der Rekultivierungsschicht abgebaut werden können. Laut Huber-Humer et al. (2008) soll die in der Praxis angestrebte Flächenbelastung eines Oxidationsfensters mit Deponiegas (Methan) 50 % der im Laborversuch gemessenen Oxidationsleistung des Trägermaterials betragen. Bei einer Methanoxidationskapazität des Materials von ca. 213 l CH_4/m^2d (siehe Tabelle 57; MIX 1: mittlere Oxidationsleistung von 85 % bei einer CH_4-Zufuhr von 250 l/m^2d) bzw. ca. 8,9 l CH_4/m^2h sollte demnach die tatsächliche Flächenbelastung max. 4,5 l CH_4/m^2h betragen. Unter der Annahme, dass im ersten Jahr nach Aufbringung der Abdichtung noch genügend Wasser im Deponiekörper enthalten ist, um den biologischen Abbau weitgehend aufrecht zu erhalten, beträgt die Methanproduktion in diesem Jahr (2025) 24,4 m^3 CH_4/h für die gesamte Fläche des Modelldeponiekompartiments (20.000 m^2). Die Fläche der Methanoxidationsfenster müsste demnach zumindest ~ 0,5 ha (585,6 m^3 CH_4 d / 0,1062 m^3 CH_4/m^2d = 5.514 m^2) betragen, um die Vorgaben des Leitfadens (*HUBER-HUMER et al.*, 2008) zu erfüllen und das gesamte im ersten Jahr nach der Aufbringung der Abdichtung gebildete Methan abbauen zu können. Da die Gesamtfläche des Deponiekompartiments nur 2 ha beträgt, müsste somit mehr als ein Viertel der Fläche als Methanoxidationsfenster ausgelegt sein. Bei der Berechnung der Mindestgröße der Fenster mit der oben erwähnten, im Laborversuch festgestellten Oxidationsleistung von ca. 8,9 l CH_4/m^2h müsste die Fläche immerhin noch mindestens ~ 0,3 ha (585,6 m^3 CH_4 d / 0,2124 m^3 CH_4/m^2d = 2.757 m^2) betragen. Es erscheint nicht sehr effizient, die temporäre Abdeckung nach 20 Jahren zu entfernen, um anschließend eine Abdichtung aufzubringen, bei der mehr als ein Viertel der Fläche wiederum als Methanoxidationsfenster ausgelegt sein müsste. Bisherige Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass nachträglich angelegte Oxidationsflächen zur passiven Entgasung oft aus Kostengründen deutlich unterdimensioniert ausgeführt werden. Argumentiert wird dies auch mit dem Umstand, dass nach der Aufbringung einer Abdichtung die Deponiegasbildung meist deutlich und rasch zurückgeht (*BURKHARDT* und *EGLOFFSTEIN*, 2008). In dieser Arbeit wird daher der „realistische“ Ansatz angenommen, dass für die passive Entgasung sechs Methanoxidationsfenster mit einer Fläche von je 10 x 10 m in die

Abdichtung integriert werden. Somit erfolgt auf einer Fläche von 600 m^2 auch weiterhin eine Wasserinfiltration in den Deponiekörper. Des Weiteren wird angenommen, dass sich das eindringende Niederschlagswasser lokal im Umkreis der Methanoxidationsfenster im Deponiekörper ausbreiten kann und daher für die weitere Deponiegasbildung ein befeuchtetes Abfallvolumen von etwa 12.900 m^3 (Abfallmaterial im Umkreis der Oxidationsfenster) zur Verfügung steht. Unter diesen Annahmen ist im Jahr 2025 die höchste Methanmenge (während der 30 Jahre der endgültigen Abdeckung) mit ca. 153 t CH_4/a zu erwarten. Die Oxidationsleistung der Fenster beträgt bei einer Oxidationskapazität von 8,9 l CH_4/m^2h ~ 33,5 t CH_4/a (auf einer Fläche von 600 m^2). Somit emittieren im ersten Jahr nach der Aufbringung der Abdichtung noch etwa 120 t CH_4 durch die Methanoxidationsfenster bzw. entlang von bevorzugten Wegigkeiten. Unter der stark vereinfachten Annahme, dass die Deponiegasbildung im zweiten Jahr nach der Aufbringung der Abdichtung weitgehend zum Erliegen kommt, kann die Restgasmenge (v.a. das im Umkreis der Methanoxidationsfenster gebildete Methan - im Jahr 2026 etwa 6 t CH_4/a) vollständig in den Oxidationsfenstern abgebaut werden. Das im Deponiekörper verbleibende Gaspotenzial v.a. der restlichen, abgedichteten Fläche beträgt dann allerding noch etwa 1.727 t CH_4. Hier wird wiederum angenommen, dass ein Großteil dieses Potenzials erst außerhalb des Bilanzierungszeitraumes (durch das Nachlassen der Dichtwirkung) entsteht und freigesetzt wird. In der Bilanzierung wird daher für den Prozess „Methan“ die Emissionsmenge von 120 t CH_4 für den Zeitraum der endgültigen Abdeckung berücksichtigt. Das verbleibende Restmethanpotenzial wird in den Ergebnissen der Ökobilanz explizit dargestellt. Durch die Integration der Methanoxidationsfenster in die Oberflächenabdichtung ergeben sich andere Mengen bzgl. der benötigten Materialien (Dichtungston, etc.) und damit einhergehend auch veränderte Aufwendungen den Transport und die Aufbringung betreffend. Diese Änderungen sind jedoch so gering (bspw. ist der Dieselverbrauch der Aufbringung der Abdichtung mit Methanoxidationsfenster beinahe identisch mit jenem ohne Methanoxidationsfenster), dass sie als vernachlässigbar angesehen und daher in der Bilanzierung nicht berücksichtigt werden.

4.4.2.2 Sickerwasser

Die Abschätzung des Sickerwasseranfalls bei abgedichteten Deponien ist wie bei der Abschätzung der gasförmigen Emissionen insofern problematisch, da nicht genau vorausgesagt werden kann, wann die Dichtwirkung der Abdichtung nachlässt und somit erneut Niederschlagswasser in den Deponiekörper eindringen kann. Heinke (2010) untersuchte den Sickerwasseranfall von abgedichteten Deponien im Freistaat Sachsen, Deutschland. Die in Sachsen anfallende durchschnittliche jährliche Niederschlagsmenge ist in etwa gleich hoch wie im Nordosten Österreichs und kann daher gut zum Vergleich herangezogen werden. Aufgrund der Ergebnisse der von Heinke untersuchten Deponien mit

Kombinationsdichtung erscheint ein Sickerwasseranfall von 2 % der jährlichen Niederschlagsmenge als plausibel. Die Berechnung der Emissionen des Prozesses „Sickerwasser“ erfolgt daher analog zum Szenario „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ mit diesem Wert.

4.4.3 Monitoring

Die Aufwendungen des Prozesses „Monitoring“ sind identisch mit jenen des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ (313 kg Diesel; 5.040 km).

4.5 Basisinventar

In diesem Kapitel wird das Treibhauspotenzial (GWP 100, nach CML 2001, Nov. 10)) für die Bereitstellung elektrischer Energie, die Bereitstellung und Verbrennung von Diesel und die Berechnungsmethode für den Energieverbrauch der Sickerwasserbehandlung dargestellt. Die in diesem Kapitel dargestellten Daten basieren auf den Datenbanken der Software GaBi 6.0 education.

4.5.1 Bereitstellung elektrischer Energie

Für die Bereitstellung elektrischer Energie wird der österreichische Verbraucherstrommix verwendet. Den größten Anteil an diesem Strommix nimmt die Wasserkraft mit 49,33 % ein, gefolgt von den Stromimporten (22,07 %) und Erdgas (13,94 %). Im verwendeten Datensatz sind die Vorketten der Strombereitstellung enthalten, von der Erkundung der Energieträger, der Produktion bis zum Transport der Energieträger zu den Kraftwerken. Die Modellierung des österreichischen Strommixes beinhaltet auch den Import elektrischer Energie aus dem Ausland, Transport-/Verbreitungsverluste und den Eigenverbrauch der Kraftwerke. Die detaillierte Zusammensetzung des Strommixes ist in Abbildung 14 dargestellt.

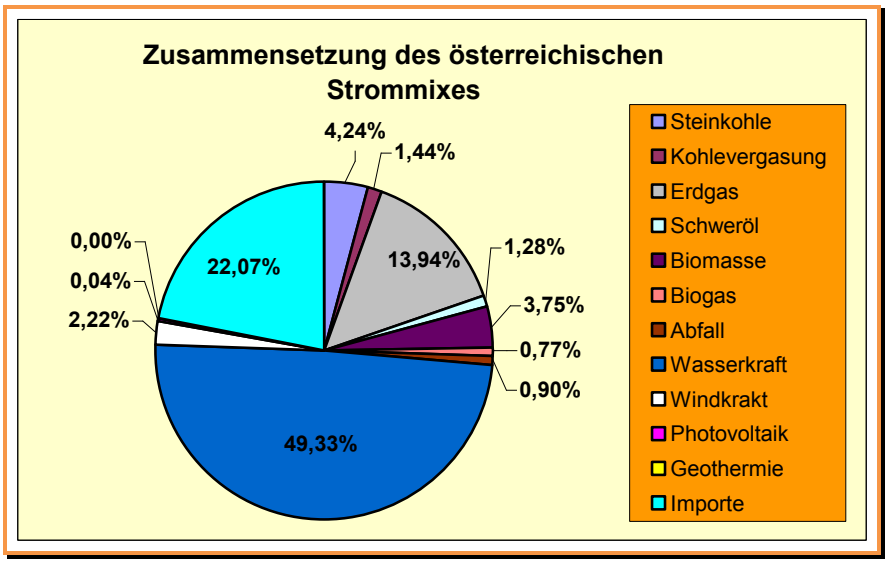


Abbildung 14 : Zusammensetzung des österreichischen Strommixes. AT: Electricity grid mix; Quelle: PE International GmbH (2012).

Das Treibhauspotenzial (GWP 100, nach CML 2001, Nov. 10) für die Bereitstellung von 1.000 mWh des österreichischen Verbraucherstrommixes beträgt 326 t CO_2-Äqu (*PE INTERNATIONAL GMBH*, 2012).

4.5.2 Dieselbereitstellung und Verbrennung

Bereitstellung:

Für die Bereitstellung des Diesels wird in der Bilanzierung der „EU-27: Diesel mix at refinery" verwendet. Der Kraftstoff wird aus Erdöl und biologischen Bestandteilen (5,75 Masse-%) erzeugt. Im verwendeten Datensatz sind die Vorketten wie Exploration, Förderung, Rohöl-Transport, Raffinerieprozesse sowie der Produktimport und die Regionalverteilung enthalten. Das Treibhauspotenzial (GWP 100, nach CML 2001, Nov. 2010) für die Bereitstellung von einer Tonne Diesel beträgt **477 kg CO_2-Äqu**. (*PE INTERNATIONAL GMBH*, 2012).

Verbrennung:

Folgende Fahrzeuge werden für den Materialtransport, die Aufbringung der Abdeckungen und das Monitoring herangezogen:

Materialtransport:	LKW mit 24,7 t Nutzlast, Abgasklasse EURO 5
Aufbringung der Abdeckungen:	Excavator (Bagger)
Monitoring:	PKW, Abgasklasse EURO 4

Um mit genanntem **LKW eine Tonne** über eine Strecke von **100 km** zu transportieren, werden **1,42 kg Diesel** verbraucht. Dies entspricht einem Treibhauspotenzial (GWP 100, CML 2001, Nov. 10) von **4,28 kg CO_2-Äqu.** (*PE INTERNATIONAL GMBH*, 2012).

Der verwendete **PKW** benötigt für eine Entfernung von **100 km 6,2 kg Diesel**. Dies entspricht einem Treibhauspotenzial (GWP 100, CML, Nov. 2010) von **18,9 kg CO_2-Äqu**. (*PE INTERNATIONAL GMBH*, 2012).

Das für die Aufbringung der Abdeckungen verwendete **Baufahrzeug (Bagger)** benötigt für die **„Bewegung" einer Tonne 0,17 kg Diesel**. Dies entspricht einem Treibhauspotenzial (GWP 100, CML, Nov. 2010) von **0,55 kg CO_2-Äqu**. (*PE INTERNATIONAL GMBH*, 2012).

4.5.3 Energieverbrauch der Sickerwasserbehandlung

Der Energieverbrauch der Sickerwasserbehandlung wird in dieser Arbeit von den Stromkosten/m^3 behandeltem Sickerwasser einer Sickerwasserreinigungsanlage nach Stand der Technik (Verfahrenskombination: Denitrifikation, Nitrifikation, Mikrofiltration, pH-Korrektur, Umkehrosmose) rückgerechnet, da keine direkten Energiewerte gefunden werden konnten. Laut Budischowsky (2011; zitiert in Strimitzer, 2011) betragen die Energiekosten der Sickerwasserbehandlung 4,41 €/m^3. Bei Preisen laut Energie-Control GmbH (2012) von durchschnittlich 6,3 Cent/kWh (eigene Einschätzung nach Daten der Industriestrompreiserhebung im 1.Halbjahr 2012 der Energie-Control GmbH) wird der für die

Behandlung des Sickerwassers erforderliche Energieverbrauch bei einer behandelten Sickerwassermenge von durchschnittlich 20.500 m^3/a folgendermaßen berechnet:

4,41 € / 0,063 € * 20.500 m^3 = 1.435.000 kWh (1.435 mWh)

Der jährliche Energieverbrauch der Sickerwasserbehandlungsanlage beträgt nach dieser Berechnungsmethode 1.435 mWh. Die Energiemenge, die für die Behandlung der in den Szenarien anfallenden Sickerwassermengen benötigt wird, wird anteilsmäßig an der jährlichen Behandlungsmenge der Anlage berechnet. Die Anteile der jeweiligen Sickerwassermengen an der jährlichen Behandlungsmenge der Anlage ergeben sich folgendermaßen:

Sickerwasseranfall **4,96 %** des mittleren NS/a (645 m^3/Jahr): 645 * 100 / 20.500 = **3,14 %**
Sickerwasseranfall **10 %** des mittleren NS/a (1.300 m^3/Jahr): 1.300 * 100 / 20.500 = **6,34 %**
Sickerwasseranfall **15 %** des mittleren NS/a (1.950 m^3/Jahr): 1.950 * 100 / 20.500 = **9,51 %**
Sickerwasseranfall **20 %** des mittleren NS/a (2.600 m^3/Jahr): 2.600 * 100 / 20.500 = **12,68 %**
Sickerwasseranfall **2 %** des mittleren NS/a (260 m^3/Jahr): 260 * 100 / 20.500 = **1,268 %**

Die Berechnung des Konzentratanfalls erfolgt ebenfalls anhand dieser Anteile (jährlicher Konzentratanfall der Behandlungsanlage = 4.427 m^3).

5 Wirkungsbilanz

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen mit der Software GaBi 6.0 Education hinsichtlich der Wirkungskategorie „GWP (Global Warming Potential)“ in kg CO_2-Äq. dargestellt. Kapitel 5.1 zeigt die Ergebnisse der temporären Abdeckung. In den Kapiteln 5.2 – 5.4 werden die Emissionen der Szenarien nach der Aufbringung der endgültigen Abdeckung bzw. bei Belassen der Schicht (Referenzszenario) dargestellt. In Kapitel 5.5 erfolgt ein Vergleich der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum.

5.1 Temporäre Abdeckung

Das Treibhauspotenzial (GWP 100, CML 2001, Nov. 10) im Zeitraum der temporären Abdeckung beträgt ca. 17.496 t CO_2-Äqu. (874,8 kg CO_2-Äqu./funktionelle Einheit). Die Ergebnisse der einzelnen Prozesse bzw. deren Anteil am gesamten Treibhauspotenzial sind in Tabelle 23 ersichtlich.

Tabelle 23: Treibhauspotenzial (GWP 100, in kg CO_2-Äqu., CML 2001 - Nov. 2010) der temporären Abdeckung.

Treibhauspotenzial (GWP 100, in kg CO_2-Äqu., CML 2001, Nov. 10)			
Prozesse	**Gesamt**	**pro FE**	**%-Anteil**
Herstellung	320.000	16,0	1,8%
Transport	228.000	11,4	1,3%
Aufbringung	112.800	5,6	0,6%
Methan	16.300.000	815,0	93,2%
Sickerwasser	534.700	26,7	3,1%
Monitoring	751	0,0	0,0%
Gesamt	**17.496.251**	**874,8**	**100%**

Der Transport der Materialien für die temporäre Abdeckung hat lediglich einen Anteil von 1,3 % an den Auswirkungen auf den Treibhauseffekt. Den größten Anteil haben die CH_4-Emissionen der Deponie mit 93,2 %. Der Prozess „Sickerwasser“ (bei einer Sickerwasserbildung von 4,96 % des jährlichen Niederschlages) hat einen Anteil von 3,1 % an den Auswirkungen auf den Treibhauseffekt. Die Prozesse „Aufbringung“ und „Monitoring“ haben keinen merkbaren Anteil. Abbildung 15 zeigt die Anteile der einzelnen Prozesse am Treibhauspotenzial.

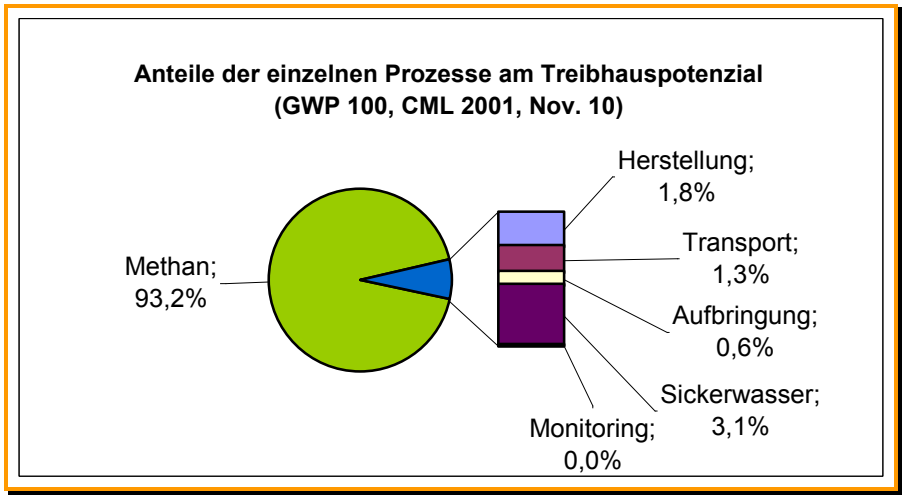


Abbildung 15: Anteile der einzelnen Prozesse am Treibhauspotenzial (GWP 100, CML 2001, Nov. 10) der temporären Abdeckung.

5.2 Referenzszenario „Evapotranspirationsschicht – 1,5 m“

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen des Referenzszenarios auf den Treibhauseffekt in der Phase der endgültigen Abdeckung dargestellt. Da bei diesem Szenario die Abdeckung unverändert auf der Deponie belassen wird, fallen die Prozesse „Herstellung“, „Aufbringung“ und „Transport“ für die endgültige Abdeckung weg. Das gesamte Treibhauspotenzial (GWP 100, CML 2001, Nov. 2010) des Referenzszenarios beträgt im Zeitraum der endgültigen Abdeckung ca. 5.421 t kg CO_2-Äqu. Tabelle 24 zeigt das Treibhauspotenzial (GWP 100, CML 2001, Nov. 10; in kg CO_2-Äqu.) des Referenzszenarios im Zeitraum der endgültigen Abdeckung.

Tabelle 24: Treibhauspotenzial (GWP 100, in kg CO_2-Äqu., CML 2001, Nov. 10) des Referenzszenarios im Zeitraum der endgültigen Abdeckung.

Treibhauspotenzial (GWP 100, in kg CO_2-Äqu., CML 2001, Nov. 10)			
Prozesse	**Gesamt**	**pro FE**	**%-Anteil**
Methan	4.617.650	231	85,2%
Sickerwasser	802.000	40	14,8%
Monitoring	1.048	0,1	0,0%
Gesamt	**5.420.698**	271	**100%**

In Abbildung 16 sind die Anteile der einzelnen Prozesse am Treibhauspotenzial (GWP 100; CML 2001, Nov. 10) des Referenzszenarios „Evapotranspirationsschicht – 1,5 m“ grafisch dargestellt.

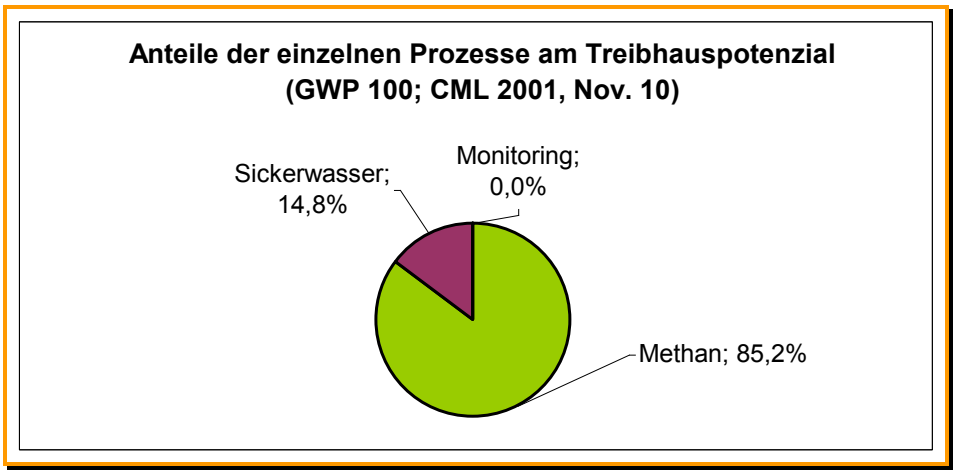


Abbildung 16: Anteile der einzelnen Prozesse am Treibhauspotenzial (GWP 100; CML 2001, Nov. 10) des Referenzszenarios „Evapotranspirationsschicht – 1,5 m“ im Zeitraum der endgültigen Abdeckung.

5.3 Szenario „Evapotranspirationsschicht - 2,5 m“

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m “ dargestellt. Tabelle 25 zeigt die Emissionen (in kg CO_2-Äqu.) für die gesamte Fläche (2 ha), pro funktionelle Einheit sowie die Anteile der einzelnen Prozesse an den Gesamtemissionen. In Abbildung 17 sind diese nochmals grafisch dargestellt.

Tabelle 25: Treibhauspotenzial (GWP 100, in kg CO_2-Äqu., CML 2001, Nov. 10) des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ im Zeitraum der endgültigen Abdeckung.

Treibhauspotenzial (GWP 100, in kg CO2-Äqu., CML 2001, Nov. 10)			
Prozesse	**Gesamt**	**Pro FE**	**%-Anteil**
Herstellung	171.600	8,58	3,1%
Transport	175.000	8,75	3,2%
Aufbringung	232.000	11,60	4,2%
Methan	4.617.650	230,88	83,6%
Sickerwasser	322.900	16,15	5,8%
Monitoring	1.100	0,06	0,0%
Gesamt	**5.520.250**	**276,01**	**100%**

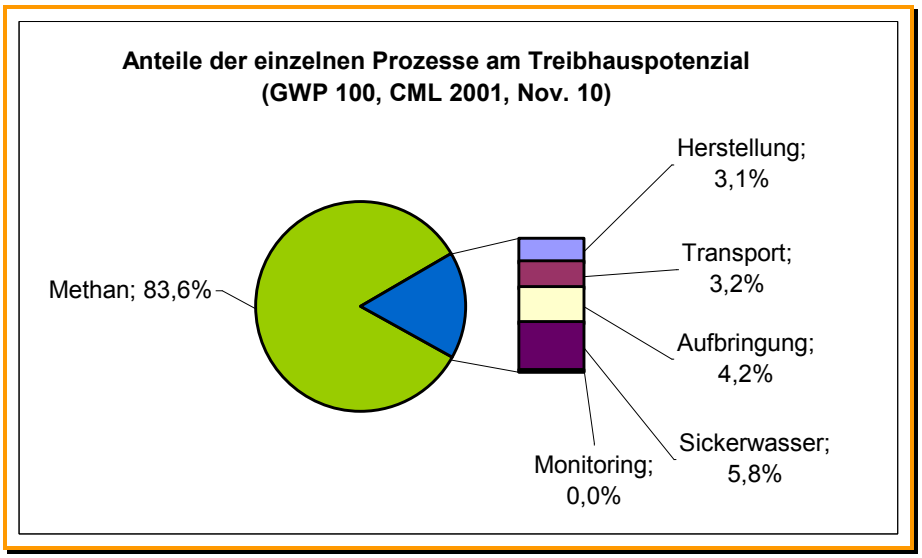


Abbildung 17: Anteile der einzelnen Prozesse am Treibhauspotenzial (GWP 100; CML 2001, Nov. 10) des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ im Zeitraum der endgültigen Abdeckung

5.4 Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“

Tabelle 26 zeigt die Ergebnisse der Ökobilanzierung des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ in der Phase der endgültigen Abdeckung. Das Treibhauspotenzial (GWP 100, CML 2001, Nov. 10) dieses Szenarios im gesamten Bilanzierungszeitraum beträgt 4.477 t CO_2-Äqu.

Tabelle 26: Treibhauspotenzial (GWP 100, in kg CO_2-Äqu., CML 2001, Nov. 10) des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ im Zeitraum der endgültigen Abdeckung.

Treibhauspotenzial (GWP 100, in kg CO_2-Äqu., CML 2001, Nov. 10)			
Prozesse	**Gesamt**	**Pro FE**	**%-Anteil**
Herstellung	672.000	336,0	15,0%
Transport	193.000	96,5	4,3%
Aufbringung	292.000	146,0	6,5%
Methan (im Bilanzierungszeitraum)	2.995.750	1.497,9	66,9%
Sickerwasser	322.900	161,5	7,2%
Monitoring	1.048	0,5	0,0%
Gesamt	**4.476.698**	**2.238,3**	100,0%
Methan (außerhalb des Bilanzierungszeitraums)	Restmethanpotenzial: 1.727.000 kg CH4 (= 43.175.000 kg CO2-Äqu.; pro FE: ~ 2.159)		

In Abbildung 18 sind die Anteile der einzelnen Prozesse am Treibhauspotenzial (GWP 100; CML 2001, Nov. 10) des Szenarios “Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ in den letzten 30 Jahren des Bilanzierungszeitraums grafisch dargestellt.

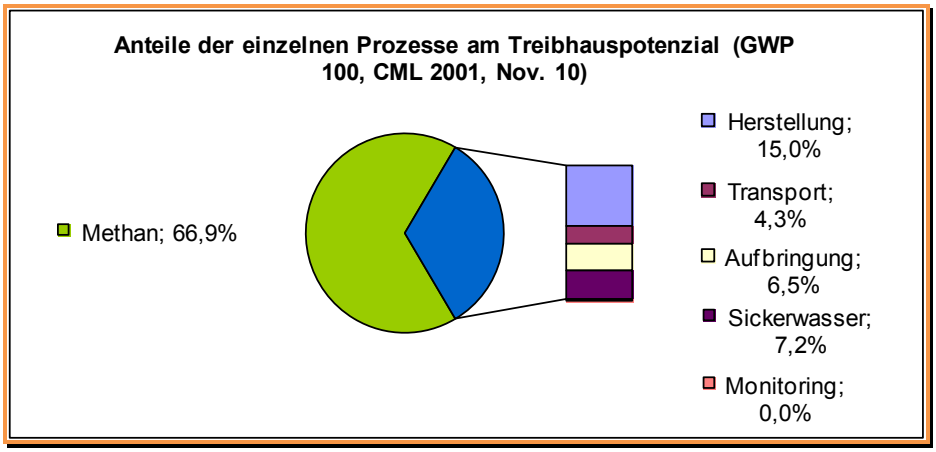


Abbildung 18: Anteile der einzelnen Prozesse am Treibhauspotenzial (GWP 100; CML 2001, Nov. 10) des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ im Zeitraum der endgültigen Abdeckung.

5.5 Gegenüberstellung der Szenarien

In diesem Kapitel werden die Szenarien hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Treibhauseffekt (GWP 100, CML 2001, Nov. 10) miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ im Bilanzierungszeitraum aufgrund der geringen Methanemissionen in der Phase der endgültigen Abdeckung die geringsten Auswirkungen auf den Treibhauseffekt verursacht. Unter Berücksichtigung des Restmethanpotenzials (außerhalb des Bilanzierungszeitraums) verursacht dieses Szenario jedoch die mit Abstand größten Auswirkungen auf den Treibhauseffekt. Bei Betrachtung der Ergebnisse der Szenarien inkl. des im Deponiekörper verbleibenden Restmethanpotenzials des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ verursacht das Referenzszenario die geringsten Auswirkungen auf den Treibhauseffekt, im Vergleich mit dem Szenario „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ jedoch lediglich um ca. 100 t CO_2-Äqu. weniger. Der Grund für diese geringe Differenz sind die höheren Emissionen des Prozesses „Sickerwasser“ im Referenzszenario, wodurch die zusätzlichen Emissionen durch die Erhöhung der Abdeckung des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ beinahe ausgeglichen werden.

Tabelle 27: Gegenüberstellung der Treibhauspotenziale (GWP 100, CML 2001, Nov. 10) der Szenarien in kg CO_2-Äqu.

Treibhauspotenziale (GWP 100, CML 2001, Nov. 10) der Szenarien			
Szenarien	**kg CO_2-Äquivalente**		
	temporär	**endgültig**	**Gesamt**
Evapotranspirationsschicht - 1,5 m	17.496.151	5.420.698	**22.916.849**
Evapotranspirationsschicht - 2,5 m	17.496.151	5.520.250	**23.016.401**
Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO (im Bilanzierungszeitraum)	17.496.151	4.476.698	**21.972.849**
Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO (inkl. Restmethanpotenzial außerhalb des Bilanzierungszeitraums)	17.496.151	47.651.698	**65.147.849**

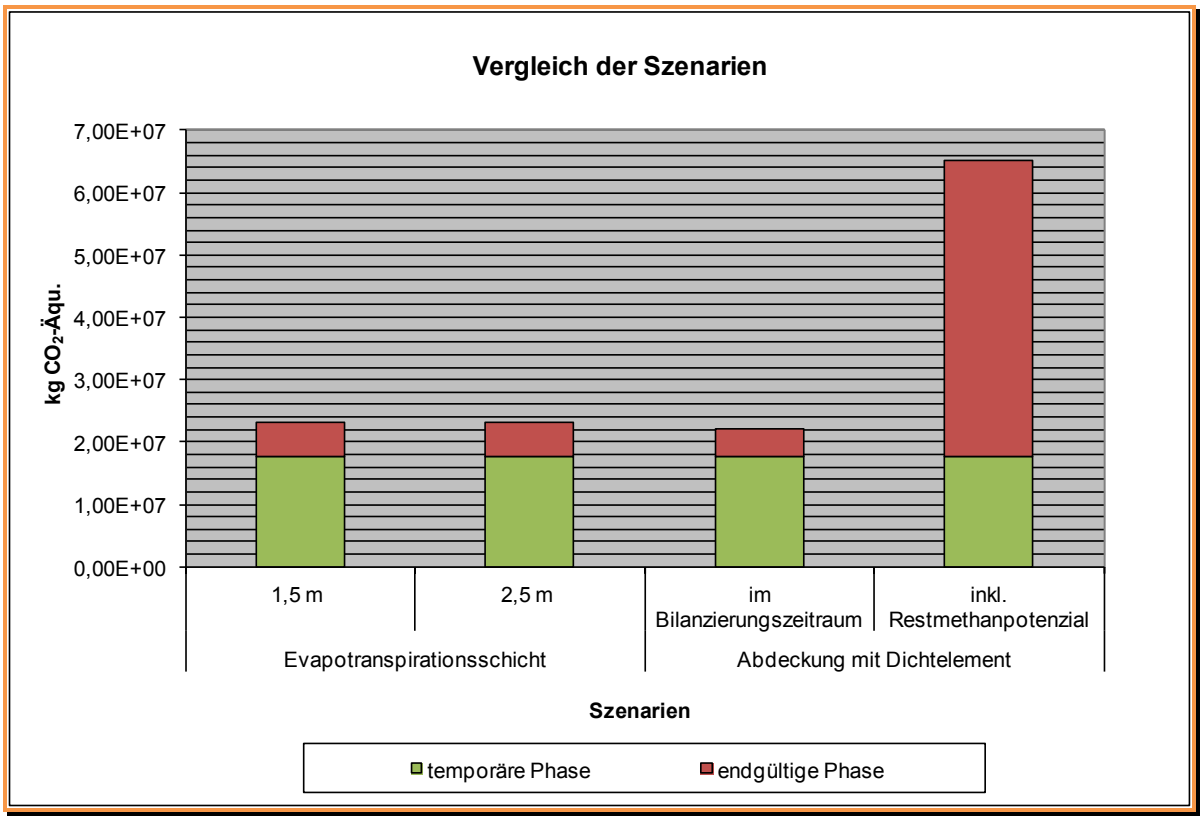


Abbildung 19: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum.

5.6 Sensitivitätsanalyse - Ökobilanz

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird untersucht, welchen Einfluss die Veränderung bestimmter Prozesse auf das Gesamtergebnis hat. Folgende Prozesse werden einer Sensitivitätsanalyse unterzogen:

- Transport
- Methan
- Sickerwasser

5.6.1 Sensitivitätsanalyse - Transport

In den Szenarien wird für den Transport der Materialien zur Deponie eine Entfernung von 30 km angenommen. An dieser Stelle wird dargestellt, wie sich die Auswirkungen des Transportes auf den Treibhauseffekt bei einer geringeren bzw. weiteren Distanz (15 bzw. 50 km) verändern. Die Ergebnisse der beiden Vergleichsszenarien beinhalten sowohl den Materialtransport der temporären als auch der endgültigen Abdeckung. In den Tabellen 28-30 sind die Transportaufwendungen der Szenarien im Rahmen der Sensitivitätsanalyse dargestellt.

Tabelle 28: Transportaufwendungen für die temporäre Abdeckung (analog zum Referenzszenario „Evapotranspirationsschicht – 1,5 m“) im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.

Transportaufwendungen für die temporäre Abdeckung (analog zum Referenzszenario "Evapotranspirationsschicht - 1,5m") im Rahmen der Sensitivitätsanalsye				
Materialien	15 km		50 km	
	Entfernung (km)	Dieselverbrauch (kg)	Entfernung (km)	Dieselverbrauch (kg)
Schotter	24.300	12.513	81.000	41.710
Kompost	20.250	10.423	67.500	34.744
Schluffiger Sand	18.600	9.572	62.000	31.908
Gesamt	**63.150**	**32.508**	**210.500**	**108.362**

Tabelle 29: Transportaufwendungen für das Szenario „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.

Transportaufwendungen für das Szenario "Evapotranspirationsschicht - 2,5m" im Rahmen der Sensitivitätsanalsye				
Materialien	15 km		50 km	
	Entfernung (km)	Dieselverbrauch (kg)	Entfernung (km)	Dieselverbrauch (kg)
mittel-lehmiger Sand	**48.583**	**25.026**	**161.943**	**83.420**
temp. Abdeckung	63.150	32.508	210.500	108.362
Gesamt	**111.733**	**57.534**	**372.443**	**191.782**

Tabelle 30: Transportaufwendungen für das Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.

Transportaufwendungen für das Szenario "Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO" im Rahmen der Sensitivitätsanalsye				
Material	15 km		50 km	
	Entfernung (km)	Dieselverbrauch (kg)	Entfernung (km)	Dieselverbrauch (kg)
Ton für die mineralische Dichtung	29.160	15.016	97.200	50.052
Schotter für die Entwässerungs-schicht	24.300	12.513	81.000	41.710
PE-HD Dichtungsbahnen	60	28	200	94
Schutzvlies	30	13	100	42
Gesamt	**53.550**	**27.570**	**178.500**	**91.898**
temp. Abdeckung	63.150	32.508	210.500	108.362
Gesamtes Szenario	**116.700**	**60.078**	**389.000**	**200.260**

Tabelle 31 zeigt die Emissionen (in kg CO_2-Äqu.) der Szenarien pro funktionelle Einheit bei veränderten Transportdistanzen im gesamten Bilanzierungszeitraum. In der Abbildung 20 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse - Transport (für die gesamte Fläche) ebenfalls für den gesamten Bilanzierungszeitraum grafisch dargestellt. Um die Unterschiede besser veranschaulichen zu können, wird nur die Phase der endgültigen Abdeckung angezeigt.

Tabelle 31: Treibhauspotenzial (pro funktionelle Einheit; GWP 100, CML 2001, Nov. 10) der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum im Rahmen der Sensitivitätsanalyse – Transport.

Treibhauspotenzial (GWP 100, CML 2001, Nov. 10) der Szenarien bei veränderter Transportstrecke (pro funktionelle Einheit)			
Szenarien	**kg CO_2-Äqu./funktionelle Einheit**		
	30 km	**15 km**	**50 km**
Evapotranspirations-schicht - 1,5 m	1.146	1.140	1.153
Evapotranspirations-schicht - 2,5 m	1.151	1.141	1.164
Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO	1.099	1.088	1.113

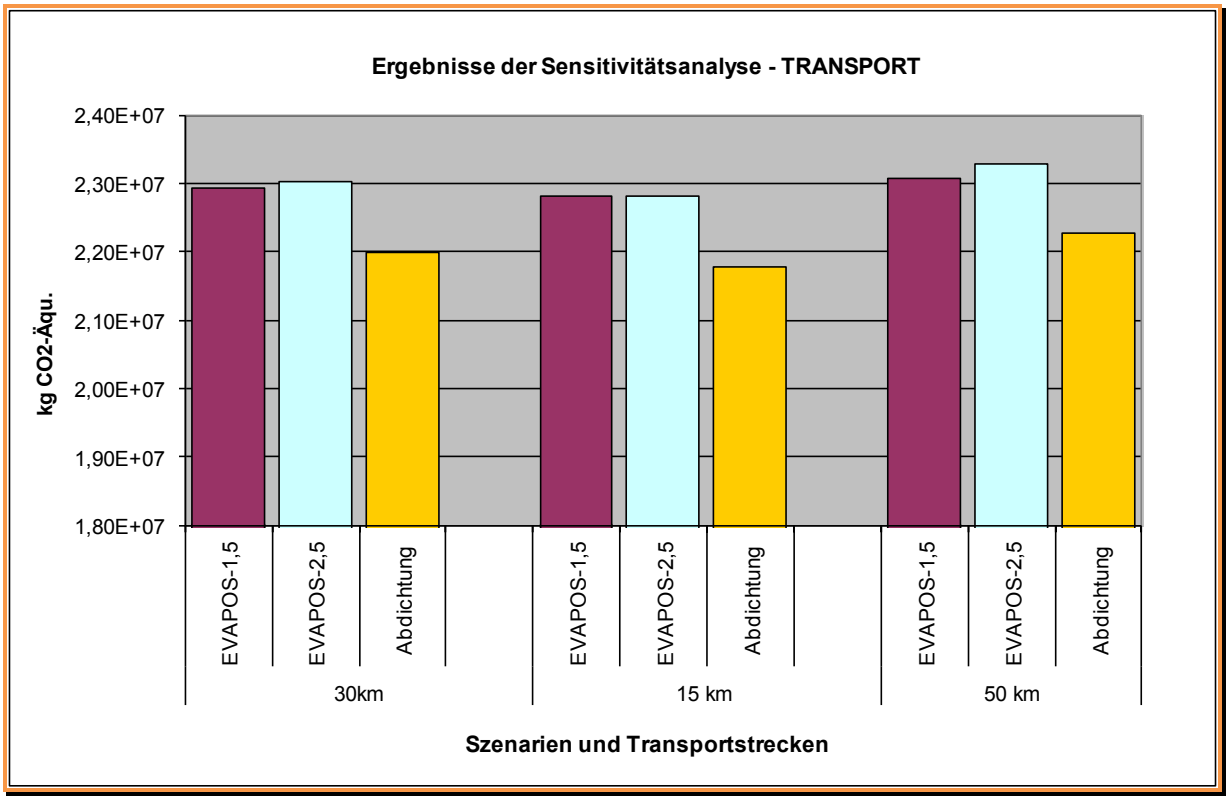


Abbildung 20: Treibhauspotenzial (gesamte Fläche [2 ha]; GWP 100, CML 2001, Nov. 10) der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum im Rahmen der Sensitivitätsanalyse – Transport.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Transport der Materialien keine Auswirkungen auf das Gesamtergebnis hat. So verursacht das Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“, bei Nichtbeachtung der außerhalb des Bilanzierungszeitraums auftretenden Methanemissionen dieses Szenarios, auch bei einer Transportstrecke von 15 bzw. 50 km die geringsten Auswirkungen auf den Treibhauseffekt.

5.6.2 Sensitivitätsanalyse - Methan

Für die temporäre Abdeckung wurde eine Gaserfassungsrate (bis einschließlich zum Jahr 2010) von 50 % und eine Methanoxidationsrate von 90 % angenommen. Dies stellt eine sehr optimierte Variante dar. Für den Fall, dass die temporäre Abdeckung (Evapotranspirationsschicht – 1,5 m) technisch nicht optimal ausgeführt ist, werden vier

weitere Gaserfassungs- und Methanoxidationsraten herangezogen, um den Einfluss auf das Gesamtergebnis darstellen zu können. Die in den Szenarien „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ und „Evapotranspirationsschicht - 2,5 m“ getroffenen Annahmen bzgl. der Methanemissionen im Zeitraum der endgültigen Abdeckung werden nicht verändert. In den Tabellen 32-33 sind die für die Sensitivitätsanalyse - Methan (SA-CH_4) veränderten Annahmen ersichtlich.

Tabelle 32: Angenommene Gaserfassungs- und Methanoxidationsraten im Rahmen der Sensitivitätsanalyse und die daraus resultierenden Methanemissionen im Zeitraum der temporären Abdeckung.

Gaserfassung- und Methanoxidationsraten und die daraus resultierenden CH_4-Emissionen im Rahmen der Sensitivitätsanalyse - temporäre Abdeckung				
Varianten	**[1]SA-CH_4-1**	**[1]SA-CH_4-2**	**[1]SA-CH_4-3**	**[1]SA-CH_4-4**
[2]GER	20%	30%	40%	keine
[3]MOX	75%	65%	50%	30%
CH_4-Emissionen (2 ha) in kg CO_2-Äqu.	**49.504.500**	**65.201.500**	**87.281.025**	**155.031.825**
pro FE in kg CO_2-Äqu.	**2.475**	**3.260**	**4.364**	**7.752**

[1]SA-CH_4-1 = Sensitivitätsanalyse 1. Variante; SA-CH_4-2 = Sensitivitätsanalyse 2. Variante usw.
[2]GER: Gaserfassungsrate
[3]MOX: Methanoxidationsrate

Tabelle 33: **Angenommene Methanoxidationsraten im Rahmen der Sensitivitätsanalyse und die daraus resultierenden Methanemissionen im Zeitraum der endgültigen Abdeckung.**

Methanoxidationsraten und die daraus resultierenden CH_4-Emissionen im Rahmen der Sensitivitätsanalyse für das Referenzszenario - endgültige Abdeckung				
Varianten	**[1]SA-CH_4-1**	**[1]SA-CH_4-2**	**[1]SA-CH_4-3**	**[1]SA-CH_4-4**
[2]MOX	75%	65%	50%	30%
CH_4-Emissionen (2 ha) in kg CO_2-Äqu.	**11.544.150**	**16.161.825**	**23.088.300**	**32.323.625**
pro FE in kg CO_2-Äqu.	**577**	**808**	**1157**	**1616**

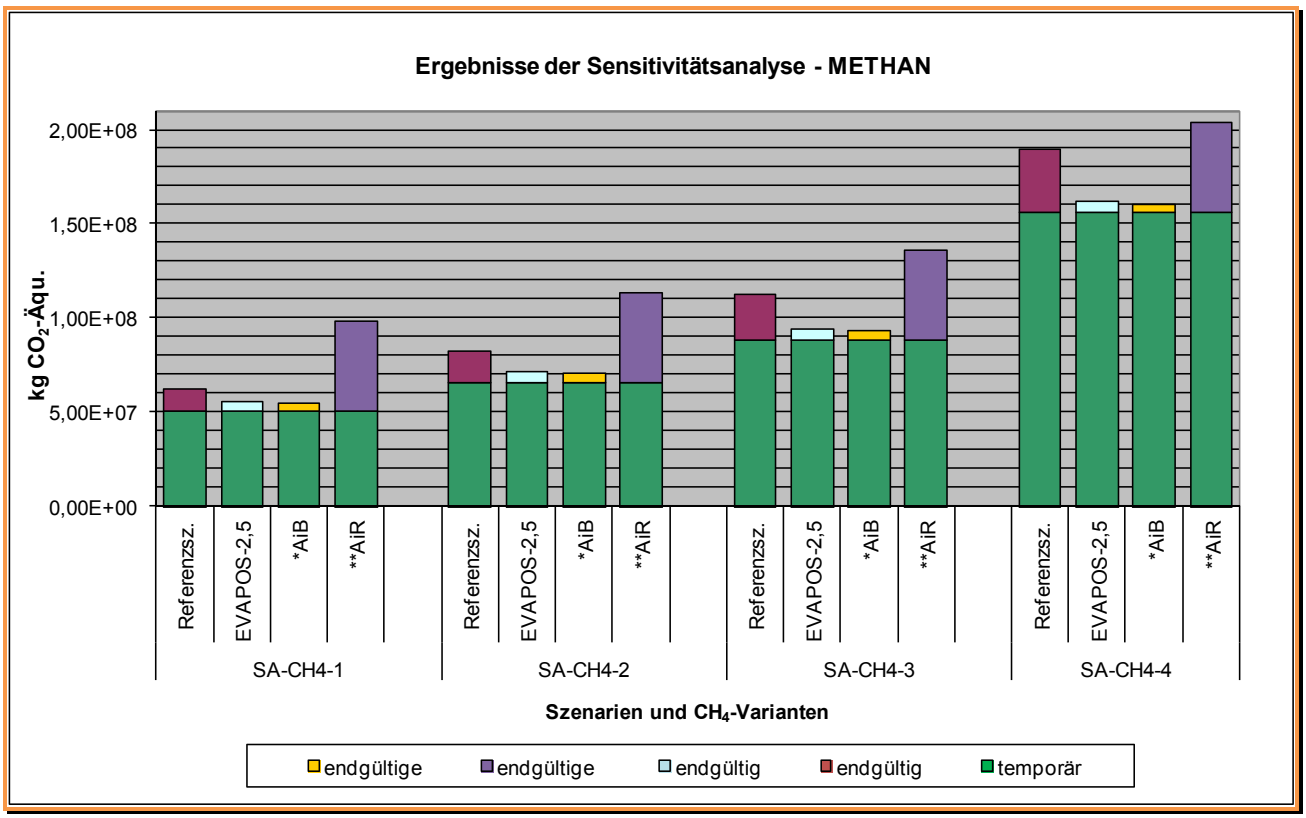
[1]SA-CH_4-1 = Sensitivitätsanalyse 1. Variante; SA-CH_4-2 = Sensitivitätsanalyse 2. Variante; usw.
[2]MOX: Methanoxidationsrate

Tabelle 34: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse - Methan (in kg CO_2-Äqu.)

Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse - METHAN (in kg CO_2-Äqu.)				
CH_4-Varianten / **Szenarien**	**[1]SA-CH_4-1**	**[1]SA-CH_4-2**	**[1]SA-CH_4-3**	**[1]SA-CH_4-4**
Referenzszenario	62.999.299	82.999.299	112.499.299	189.499.299
Evapotranspirationsschicht - 2,5 m	56.216.501	71.716.501	94.216.501	161.716.501
Abdichtung (im Bilanzierungszeitraum)	55.172.949	70.672.949	93.172.949	160.672.949
Abdichtung (inkl. Restmethanpotenzial)	98.347.949	113.847.949	136.347.949	203.847.949

[1]SA-CH_4-1 = Sensitivitätsanalyse 1. Variante; SA-CH_4-2 = Sensitivitätsanalyse 2. Variante; usw.

Aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse - Methan ist ersichtlich, dass bei der Variante SA-CH_4-1 (siehe Tabelle 32-33) die Auswirkungen auf den Treibhauseffekt des Referenzszenarios im Bilanzierungszeitraum bereits höher sind als jene der beiden Vergleichsszenarien. Bei Betrachtung der Ergebnisse ausschließlich im Bilanzierungszeitraum verursacht das Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ jeweils die geringsten Auswirkungen auf den Treibhauseffekt. Bei Berücksichtigung des im Deponiekörper verbleibenden Methanpotenzials im Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ schneidet jedoch das Szenario „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ hinsichtlich der Auswirkungen auf den Treibhauseffekt jeweils am besten ab. In Abbildung 21 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse - Methan inklusive des Restmethanpotenzials des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ grafisch dargestellt.



*AiB: Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO im Bilanzierungszeitraum.
**AiR: Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO inkl. Restmethanpotenzial
Abbildung 21: Treibhauspotenzial (gesamte Fläche [2 ha]; GWP 100, CML 2001, Nov. 10) der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum im Rahmen der Sensitivitätsanalyse – Methan.

5.6.3 Sensitivitätsanalyse - Sickerwasser

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse „Sickerwasser“ werden neben den in den Szenarien getroffenen Annahmen drei weitere Sickerwasseranfallsmengen und deren Einfluss auf das Gesamtergebnis untersucht. Der Sickerwasseranfall der beiden Vergleichsszenarien im Zeitraum der endgültigen Abdeckung wird unverändert mit 2 % berechnet. Es wird ausschließlich der Sickerwasseranfall im Zeitraum der temporären Abdeckung sowie für das

Referenzszenario im Zeitraum der endgültigen Abdeckung variiert. Folgende Sickerwasseranfälle werden dafür herangezogen:

- 10 % des mittleren Jahresniederschlages
- 15 % des mittleren Jahresniederschlages
- 20 % des mittleren Jahresniederschlages

In den Tabellen 35-36 sind die Aufwände des Prozesses „Sickerwasser“ im Rahmen der Sensitivitätsanalyse ersichtlich.

Tabelle 35: Aufwände der Sickerwasserbehandlung der temporären Abdeckung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.

Aufwände der Sickerwasserbehandlung der temporären Abdeckung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse					
Sickerwasseranfall		Menge (m^3)	Transportaufwendungen		Energieverbrauch
			Kilometerleistung (km)	Dieselverbrauch (kg)	
10%	Sickerwasser	26.000	210.527	108.445	1.819.580 kWh
	Konzentrat	5.614	15.910	8.196	-
15%	Sickerwasser	39.000	315.790	162.668	2.729.370 kWh
	Konzentrat	8.420	23.862	12.292	-
20%	Sickerwasser	52.000	421.053	216.890	3.639.160 kWh
	Konzentrat	11.230	31.826	16.394	-

Tabelle 36: Aufwände der Sickerwasserbehandlung des Referenzszenarios im Rahmen der Sensitivitätsanalyse im Zeitraum der endgültigen Abdeckung.

Aufwände der Sickerwasserbehandlung des Referenzszenarios im Rahmen der Sensitivitätsanalyse (endg. Abdeckung)					
Sickerwasseranfall		Menge (m^3)	Transportaufwendungen		Energieverbrauch
			Kilometerleistung (km)	Dieselverbrauch (kg)	
10%	Sickerwasser	39.000	315.790	162.668	2.729.370 kWh
	Konzentrat	8.410	23.834	12.277	-
15%	Sickerwasser	58.500	473.684	244.002	4.094.055 kWh
	Konzentrat	12.630	35.794	18.438	-
20%	Sickerwasser	78.000	631.579	325.336	5.458.740 kWh
	Konzentrat	16.846	47.742	24.593	-

Abbildung 22 stellt das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse – Sickerwasser grafisch dar. Um die Veränderungen gegenüber den Szenarien ersichtlich zu machen, sind diese ebenfalls in der Abbildung enthalten. An dieser Stelle sei erwähnt, dass in der Abbildung 22 und der Tabelle 37 das Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ ausschließlich im Bilanzierungszeitraum enthalten ist. Das im Deponiekörper verbleibende Restmethanpotenzial wird hier nicht angezeigt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem Sickerwasseranfall von 10 % das Szenario „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ (aufgrund der Reduktion des Sickerwasseranfall auf 2 % des jährlichen Niederschlages nach der Erhöhung der Abdeckung) bereits weniger Auswirkungen auf den Treibhauseffekt verursacht als das Referenzszenario.

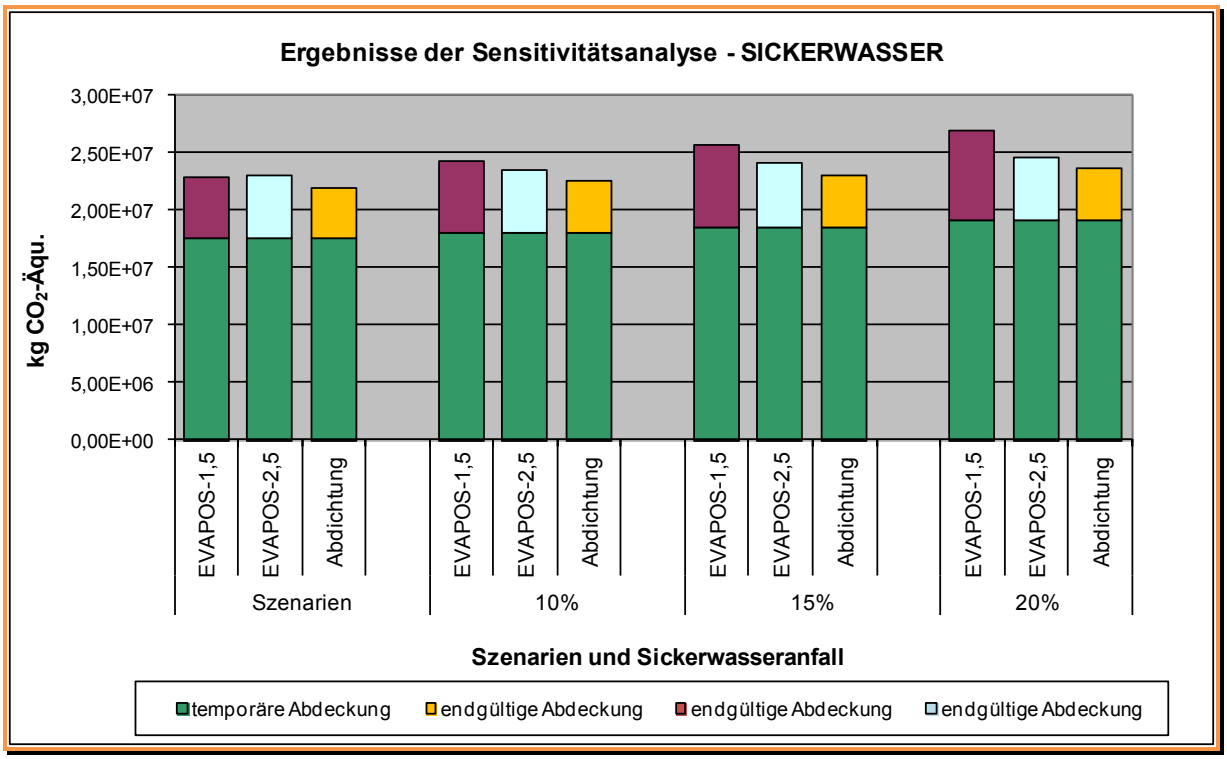


Abbildung 22: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse – Sickerwasser.

In Tabelle 37 sind die Ergebnisse (gesamte Szenarien; in kg CO_2-Äqu.) pro funktionelle Einheit im gesamten Bilanzierungszeitraum dargestellt.

Tabelle 37: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse – Sickerwasser in kg CO_2-Äqu. pro funktionelle Einheit im gesamten Bilanzierungszeitraum.

Treibhauspotenzial (GWP 100, CML 2001, Nov. 10) der Szenarien bei verändertem Sickerwasseranfall (pro funktionelle Einheit)				
Szenarien	Sickerwasseranfall in der Phase der temporären Abdeckung (im Referenzszenario: gesamter Bilanzierungszeitraum)			
	Szenarien	10% SiWa-Anfall	15% SiWa-Anfall	20% SiWa-Anfall
Referenzszenario	1.146	1.214	1.281	1.349
Evapotranspirationsschicht - 2,5 m	1.151	1.178	1.205	1.232
Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO (im Bilanzierungszeitraum)	1.099	1.126	1.153	1.180

6 Betrachtung ausgewählter Kosten

In diesem Kapitel erfolgt eine grobe Betrachtung von ausgewählten Kosten, die in den Szenarien anfallen, d.h. es werden nicht die Gesamtkosten der Szenarien betrachtet, sondern nur gewisse Kostenstellen. Folgende Prozesse/Kostenstellen sind in der Betrachtung enthalten:

- Kosten der Abdeckungen (Anschaffung der Materialien und Herstellung der Abdeckungen)
- Sickerwasser (Transport und Behandlung).

6.1 Kosten der Abdeckungen

Dieser Kostenpunkt beinhaltet die Anschaffungskosten für die benötigten Materialien und die Mietpreise der Fahrzeuge/Maschinen, die für die Aufbringung der Abdeckungen benötigt werden. Nicht enthalten sind bspw. die Personalkosten oder die Transportkosten der Fahrzeuge/Maschinen zur Deponie.

6.1.1 Materialkosten

Die Preise für die Materialien wurden anhand aktueller Marktpreise ermittelt. Das Material der temporären Abdeckung wird für die endgültige Abdeckung weiterverwendet. Für den Transport wird angenommen, dass die Lieferung „Frei Baustelle“ (die Kosten des Transportes übernimmt der Verkäufer) erfolgt. In den Tabellen 38-40 sind die Materialkosten der unterschiedlichen Abdeckung dargestellt.

Tabelle 38: Materialkosten der temporären Abdeckung (analog zum Referenzszenario).

Materialkosten der temporären Abdeckung			
Materialien	**Preis in €/t**	**benötigte Menge**	**Kosten**
[1]Kompost	8,41 €	16.660 t	140.111
[2]Sand	3,25 €	15.300 t	49.725
[3]Schotter	12,50 €	20.000 t	250.000
Gesamt			**439.836**

[1]Kompostpreise laut Kompotec Kompostierungsanlagen GmbH (2014); NUA (2014); Hahn Kompost (2014); KRS (2014).
[2] Sandpreise laut Horstfelder Sand u. Kies GmbH (2014); Mitteldeutsche Baustoffe GmbH (2014).
[3] Schotterpreise laut Harrer Beton GmbH (2014); Chwala Kompost Erde Kies GmbH (2014); Arthofer Bau (2014); Cemex Austria AG (2014); Anton Pichler GmbH (2014).

Tabelle 39: Materialkosten des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“.

Materialkosten des Szenarios "Evapotranspirationsschicht - 2,5 m"			
Materialien	**Preis in €/t**	**benötigte Menge**	**Kosten**
[1]Sand für den Unterboden	3,25 €	40.000 t	€ 130.000
Gesamt			**€ 130.000**

[1] Preise laut Horstfelder Sand u. Kies GmbH (2014); Mitteldeutsche Baustoffe GmbH (2014).

Tabelle 40: Materialkosten des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“.

Materialkosten des Szenarios "Abdeckung mit Dichtelemente gemäß DVO"			
Materialien	**Preis in €/t**	**benötigte Menge**	**Kosten**
[1]Schotter	12,50 €	20.000 t	250.000
[2]Dichtungston	4 €	24.000 t	96.000
[3]KDB (Lieferung und Einbau)	8 €	20.000 m^2	160.000
[4]Schutzvlies (Lieferung und Einbau)	3,68 €/m2	20.000 m^2	73.680
Gesamt			**579.680**

[1]Preise laut Harrer Beton GmbH (2014); Chwala Kompost Erde Kies GmbH (2014); Arthofer Bau (2014); Cemex Austria AG (2014); Anton Pichler GmbH (2014).
[2] Preise laut Kieswerke Ohle & Lau GmbH (2007).
[3] Preise laut Sasse und Biener (2002).
[4] Preise laut Bracke und Klümpen (2005).

6.1.2 Herstellungskosten

Die Daten für die zur Aufbringung benötigten Maschinen/Fahrzeuge und deren Einsatzstunden wurden von Schneider (2013) zur Verfügung gestellt. Die angegebenen Preise für die jeweiligen Maschinen/Fahrzeuge wurden von Internetseiten verschiedener Baufirmen entnommen und stellen reine Mietpreise/h dar. Nicht enthalten sind die Transportkosten der Maschinen/Fahrzeuge zur Deponie und die Personalkosten. In den Tabellen 41 – 43 sind die Herstellungskosten der Abdeckungen dargestellt.

Tabelle 41: Herstellungskosten der temporären Abdeckung.

Herstellungskosten der temporären Abdeckung				
Maßnahmen	**Maschinen**	**Betriebsstunden (h)**	**€/h**	**Gesamt**
Feinplanie d. Abfallkörpers	[1]Raupe	67	98	€ 6.566
	[1]Walze	67	104	€ 6.968
Einbau Gasverteilungs-schicht	[1]Raupe	134	98	€ 13.132
	[1]Walze	134	104	€ 13.936
Einbau der Evapotranspirations-schicht - 1,5m	[1]Raupe	600	98	€ 58.800
	[1]Radschlepper mit Anhängefräse	300	63	€ 18.900
	[1]Raupe mit Aufreißer	120	98	€ 11.760
Begrünung und zusätzliche Bepflanzung	[2]3,22 €/m^2			€ 64.400
Gesamt				**€ 194.462**

[1] Preise laut Hans Zöchling GmbH (2013)
[2] Preise laut Bracke und Klümpen (2005)

Tabelle 42: **Herstellungskosten des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“.**

Herstellungskosten des Szenarios "Evapotranspirationsschicht 2,5 m"				
Maßnahmen	**Maschinen**	**Betriebsstunden (h)**	**€/h**	**Gesamt**
Abtragung der Evapotranspirationsschicht 1,5 m	[1]Bagger	375	92	€ 34.500
	[2]2 Dumper	je 375	je 57	€ 42.750
Einbau Unterboden	[1]Raupe	400	98	€ 39.200
	[1]Radschlepper	200	63	€ 12.600
	[1]Raupe mit Aufreißer	80	98	€ 7.840
Einbau Oberboden	[1]Bagger	300	92	€ 27.600
	[2]2 Dumper	je 300	je 57	€ 34.200
	[1]Raupe	400	98	€ 39.200
	[1]Raupe mit Aufreißer	120	98	€ 11.760
Begrünung und zusätzliche Bepflanzung	[3]3,22 €/m^2			€ 64.400
Gesamt				**€ 314.050**

[1] Preise laut Hans Zöchling GmbH (2013)
[2] Preise laut Bodo Freimuth GmbH & Co KG Tiefbau (2014).
[3] Preise laut Bracke und Klümpen (2005).

Tabelle 43: Herstellungskosten des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“.

Herstellungskosten des Szenarios "Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO"				
Maßnahmen	**Maschinen**	**Betriebsstunden (h)**	**€/h**	**Gesamt**
Abtragung der Evapotranspirations-schicht - 1,5 m	[1]Bagger	375	92	€ 34.500
	[2]2 Dumper	je 375	je 57	€ 42.750
Feinplanie und Verdichtung der Gasdrainschicht	[1]Raupe	67	98	€ 6.566
	[1]Walze	67	104	€ 6.968
Einbau mineralische Dichtung	[1]Raupe	300	98	€ 29.400
	[1]Radschlepper und Anhängerfräse	300	63	€ 18.900
	[1]Walze	300	104	€ 31.200
	[1]Walze	100	104	€ 10.400
	[1]Walze	100	59	€ 5.900
Einbau Entwässerungsschicht	[1]Bagger	334	92	€ 30.728
	[2]Dumper	je 334	je 57	€ 38.076
	[1]Raupe	100	98	€ 9.800
Einbau Rekultivierungsschicht	[1]Bagger	300	92	€ 27.600
	[2]2 Dumper	je 300	je 57	€ 34.200
	[1]Raupe	400	98	€ 39.200
	[1]Raupe mit Aufreißer	120	98	€ 11.760
Begrünung und zusätzliche Bepflanzung	[3]3,22 €/m^2			€ 64.400
Gesamt				**€ 442.348**

[1] Preise laut Hans Zöchling GmbH (2013)
[2] Preise laut Bodo Freimuth GmbH & Co KG Tiefbau (2014).
[3] Preise laut Bracke und Klümpen (2005).

Tabelle 44 zeigt die betrachteten Kosten der Abdeckungen.

Tabelle 44: Material- und Herstellungskosten der Abdeckungen (temporäre und endgültige Abdeckung).

Szenarien	Referenzszenario "Evapotranspirations-schicht - 1,5 m"	Szenario "Evapotranspirations-schicht - 2,5 m"	Szenario "Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO"
Materialien temporär	€ 439.836	€ 439.836	€ 439.836
Materialien endgültig	-	€ 130.000	€ 579.680
Materialien Gesamt	**€ 439.836**	**€ 569.836**	**€ 1.019.516**
Herstellung temporär	**€ 194.462**	**€ 194.462**	**€ 194.462**
Herstellung endgültig	-	€ 314.050	€ 442.348
Herstellung Gesamt	**€ 194.462**	**€ 508.512**	**€ 636.810**
Summe Material- und Herstellungskosten	**€ 634.298**	**€ 1.078.348**	**€ 1.656.326**
pro m^2	**€ 31,71**	**€ 53,92**	**€ 82,82**

In Abbildung 23 sind die Material- und Herstellungskosten der Szenarien grafisch dargestellt.

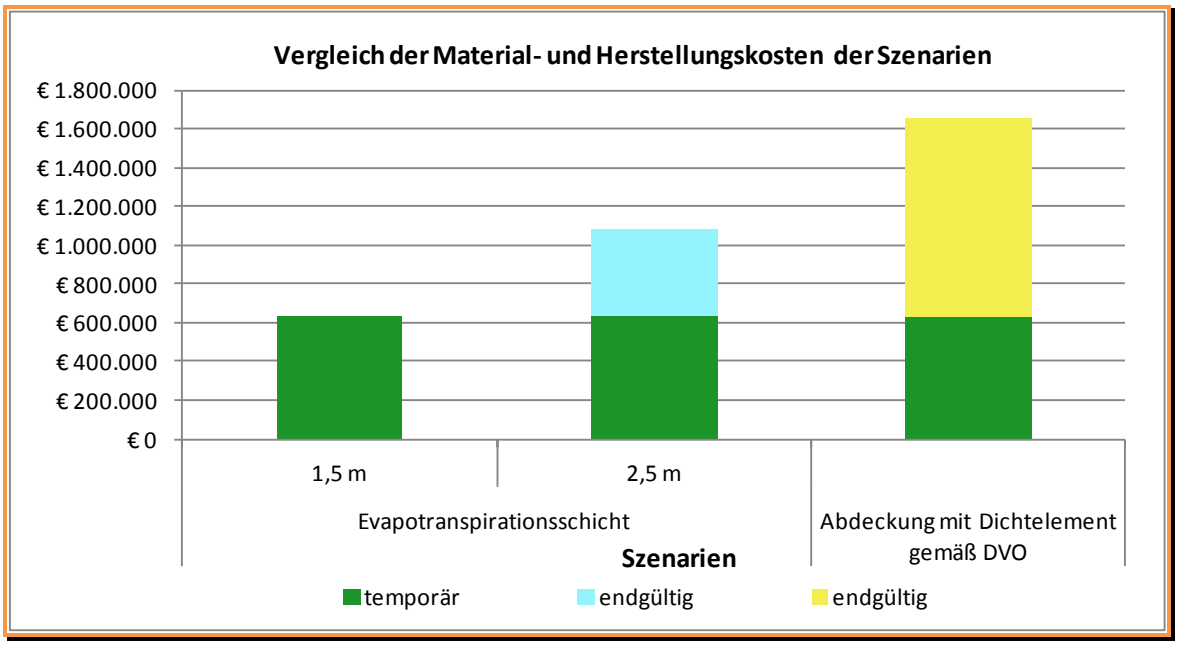


Abbildung 23: Vergleich der Material- und Herstellungskosten der Szenarien.

6.2 Sickerwasser

Die in dieser Arbeit betrachteten Kosten, die in Zusammenhang mit dem Sickerwasser stehen, sind die Transportkosten (Sickerwasser und Konzentrat) und die Sickerwasserbehandlungskosten.

6.2.1 Kosten der Sickerwasserbehandlung

Es wird die Annahme getroffen, dass der gesamte Sickerwasseranfall per Tanklaster in die Sickerwasserbehandlungsanlage Purgstall transportiert wird. Für die Berechnung der Behandlungskosten werden daher die Behandlungskosten dieser Anlage herangezogen. Diese liegen bei 35-40 €/m^3 (BUDISCHOWSKI, 2011; zitiert in STRIMITZER, 2011). Diese Werte

stellen Gesamtkosten dar und beinhalten somit alle Kosten für Betriebsmittel, Energie, etc. Für die Berechnung wird der Mittelwert von 37,50 €/m^3 verwendet. Die Behandlungskosten der beiden Vergleichszenarien sind identisch, da die Sickerwassermenge nach Aufbringung der endgültigen Abdeckung mit je 2 % des mittleren jährlichen Niederschlages berechnet wird. Tabelle 45 zeigt die Kosten der Sickerwasserbehandlung der Szenarien im Zeitraum der temporären und der endgültigen Abdeckung sowie im gesamten Bilanzierungszeitraum.

Tabelle 45: Kosten der Sickerwasserbehandlung der Szenarien.

Kosten der Sickerwasserbehandlung der Szenarien			
Szenarien	**Referenzszenario "Evapotranspirations-schicht - 1,5 m"**	**Szenario "Evapotranspirations-schicht - 2,5 m"**	**Szenario "Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO"**
temporäre Abdeckung	€ 438.750	€ 438.750	€ 438.750
endgültige Abdeckung	€ 725.625	€ 292.500	€ 292.500
Summe der Sickerwasserbehandlungskosten im gesamten Bilanzierungszeitraum	**€ 1.164.375**	**€ 731.250**	**€ 731.250**

6.2.2 Kosten des Sickerwassertransports

In dieser Arbeit werden die Transportkosten des Sickerwassers und des Konzentrats ausschließlich anhand des Kraftstoffverbrauchs berechnet. Die Transportdistanz für das Sickerwasser wurde in dieser Arbeit mit 100 km festgelegt, für die Entsorgung des Konzentrats wurde eine Strecke von 35 km festgelegt. Die Transportkosten ergeben sich aus dem Kraftstoffverbrauch x Preis (Annahme: konstanter Dieselpreis von 1,5€/l). In den Tabellen 46 und 47 sind die Siwa-Transportkosten während der Phase der temporären und der endgütigen Abdeckung sowie im gesamten Bilanzierungszeitraum dargestellt.

Tabelle 46: Kosten der Sickerwasser- und Konzentrattransporte der Szenarien.

Kosten der Sickerwasser- und Konzentrattransporte der Szenarien				
Szenarien		**Referenzszenario "Evapotranspirations-schicht - 1,5 m"**	**Szenario "Evapotranspirations-schicht - 2,5 m"**	**Szenario "Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO"**
Sickerwasser	temporäre Abdeckung	€ 97.240		
	endgültige Abdeckung	€ 145.858	€ 58.796	
	Summe der Sickerwassertransportkosten im gesamten Bilanzierungszeitraum	€ 243.098	€ 156.036	
Konzentrat	temporäre Abdeckung	€ 7.343		
	endgültige Abdeckung	€ 11.002	€ 4.444	
	Summe der Konzentrattransportkosten im gesamten Bilanzierungszeitraum	€ 18.345	€ 11.787	
Summe der Sickerwasser- und Konzentrattransportkosten		**€ 261.443**	**€ 167.823**	

6.3 Kostenvergleich der Szenarien

Die Ergebnisse der Betrachtung der ausgewählten Kosten zeigen, dass unter den in den Szenarien getroffenen Annahmen das Szenario „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ die geringsten Kosten verursacht. Das Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ verursacht aufgrund der hohen Material- und Aufbringungskosten die höchsten Kosten. Die Differenz der Kosten des Referenzszenarios und des Szenarios „Evapotranspirationsschicht - 2,5 m“ beträgt lediglich 82.695 €.

Tabelle 47: Vergleich der betrachteten Kosten der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum.

Vergleich der betrachteten Kosten der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum			
Szenarien	**Referenzszenario "Evapotranspirations-schicht - 1,5 m"**	**Szenario "Evapotranspirations-schicht - 2,5 m"**	**Szenario "Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO"**
Materialien	€ 439.836	€ 569.836	€ 1.019.516
Herstellung	€ 194.462	€ 508.512	€ 636.810
Transport (Sickerwasser u. Konzentrat)	€ 261.443	€ 167.823	€ 167.823
Sickerwasser-behandlung	€ 1.164.375	€ 731.250	€ 731.250
Summe	**€ 2.060.116**	**€ 1.977.421**	**€ 2.555.399**

In Abbildung 24 sind die Ergebnisse der Kostenbetrachtung grafisch dargestellt.

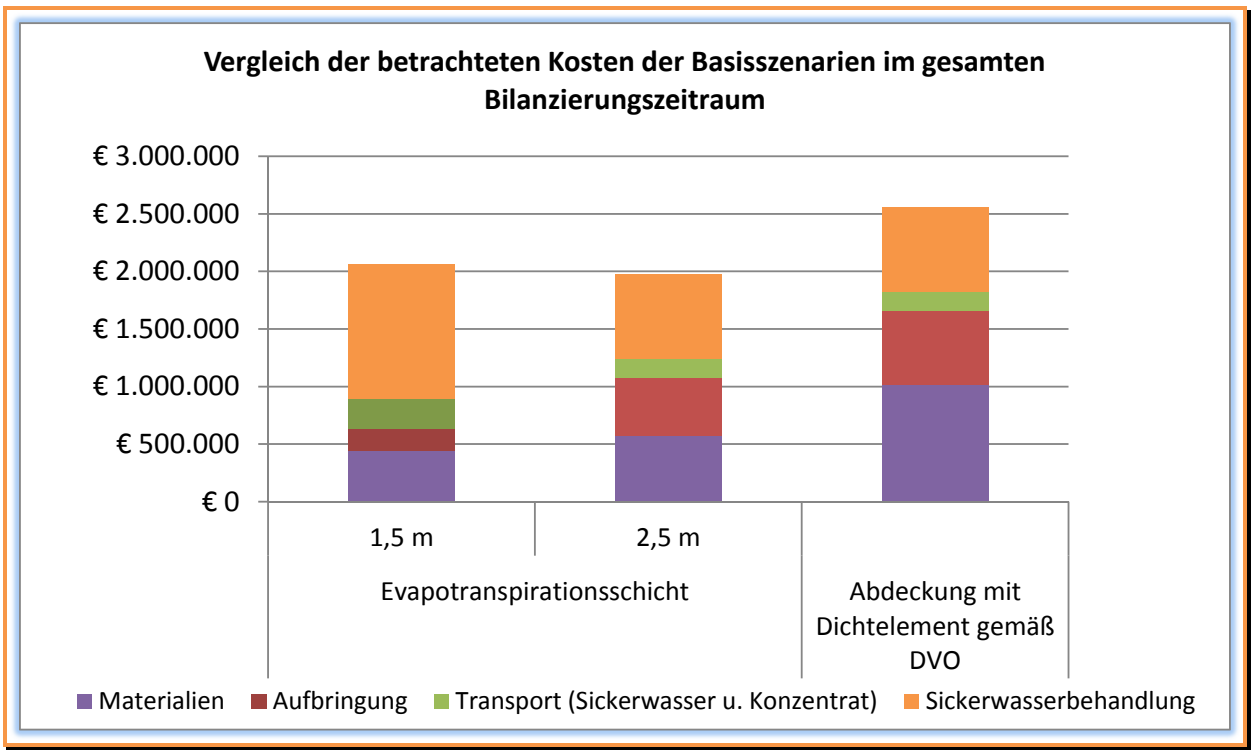


Abbildung 24: Vergleich der betrachteten Kosten der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum.

6.4 Betrachtung ausgewählter Kosten im Rahmen der Sensitivitätsanalyse

Bei der Betrachtung von ausgewählten Kosten im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden die Sickerwasserkosten (Konzentrat- und Sickerwassertransport; Sickerwasserbehandlung) sowie die Materialkosten (Min.-Max.-Werte) bei sich verändernden Sickerwasseranfällen bzw. Materialpreisen untersucht.

6.4.1 Sensitivitätsanalyse – Sickerwasserkosten

In Rahmen der Sensitivitätsanalyse – Sickerwasserkosten werden die Auswirkungen der Transportkosten (Sickerwasser und Konzentrat) und die Sickerwasserbehandlungskosten auf das Gesamtergebnis der betrachteten Kosten bei veränderten Sickerwasseranfällen untersucht. Die Transportkosten (Kraftstoffkosten) des Sickerwassers und des Konzentrats werden anhand der Transportaufwendungen der Sensitivitätsanalyse – Sickerwasser berechnet. In Tabelle 48 sind die kumulierten Kosten des Sickerwasser- und Konzentrattransports im gesamten Bilanzierungszeitraum ersichtlich. Tabelle 49 zeigt die Kosten der Sickerwasserbehandlung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse. Die in Tabelle 48-50 angegebenen Sickerwasseranfälle beziehen sich im Referenzszenario auf den gesamten Bilanzierungszeitraum, in den beiden Vergleichsszenarien nur auf die temporäre Abdeckung (endgültige Abdeckung der Vergleichsszenarien: 2 % des jährlichen Niederschlags).

Tabelle 48: Kosten des Sickerwasser- und Konzentrattransports im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.

Kosten des Sickerwasser- und Konzentrattransports im Rahmen der Sensitivitätsanalyse		
Sickerwasseranfall	**[1]Referenzszenario**	**[2]Vergleichsszenarien**
10%	€ 526.963	€ 274.037
15%	€ 790.482	€ 327.023
20%	€ 1.053.999	€ 484.834

[1] angegebener Sickerwasseranfall im gesamten Bilanzierungszeitraum.
[2] angegebener Sickerwasseranfall im Zeitraum der temporären Abdeckung; im Zeitraum der endgültigen Abdeckung 2 % des mittleren Jahresniederschlages.

Tabelle 49: Kosten der Sickerwasserbehandlung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.

Kosten der Sickerwasserbehandlung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse		
Sickerwasseranfall	**[1]Referenzszenario**	**[2]Vergleichsszenarien**
10%	€ 2.437.500	€ 1.267.500
15%	€ 3.656.250	€ 1.755.000
20%	€ 4.875.000	€ 2.242.500

[1] angegebener Sickerwasseranfall im gesamten Bilanzierungszeitraum.
[2] angegebener Sickerwasseranfall im Zeitraum der temporären Abdeckung; im Zeitraum der endgültigen Abdeckung 2 % des mittleren Jahresniederschlags.

Tabelle 50 zeigt die betrachteten Kosten des Prozesses „Sickerwasser“ im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.

Tabelle 50: Kumulierte Kosten der Transporte (Sickerwasser und Konzentrat) und der Sickerwasserbehandlung.

Kosten der Sickerwasserbehandlung und des Konzentrat- und Sickerwassertransports im Rahmen der Sensitivitätsanalyse				
Szenarien	Sickerwasseranfall	Behandlung	Transport	**Summe**
[1]Referenzszenario	10%	€ 2.437.500	€ 526.963	**€ 2.964.463**
	15%	€ 3.656.250	€ 790.482	**€ 4.446.732**
	20%	€ 4.875.000	€ 1.053.999	**€ 5.928.999**
[2]Vergleichsszenarien	10%	€ 1.267.500	€ 274.037	**€ 1.541.537**
	15%	€ 1.755.000	€ 327.023	**€ 2.082.023**
	20%	€ 2.242.500	€ 484.834	**€ 2.727.334**

[1] angegebener Sickerwasseranfall im gesamten Bilanzierungszeitraum.
[2] angegebener Sickerwasseranfall im Zeitraum der temporären Abdeckung; im Zeitraum der endgültigen Abdeckung 2 % des mittleren Jahresniederschlags.

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse der „Sensitivitätsanalyse – Sickerwasserkosten“ grafisch dargestellt. Die Min.-Max.-Werte stellen Schwankungsbreiten der Ergebnisse bei einem Sickerwasseranfall von 10 bzw. 20 % des mittleren Jahresniederschlages dar. Der in der Abbildung dargestellte grüne Säulenabschnitt (Sickerwasserkosten) gibt die Kosten bei einem Sickerwasseranfall von 15 % des mittleren Jahresniederschlages an. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Sickerwasserkosten einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der betrachteten Kosten der Szenarien haben. Die Schwankungsbreite der Sickerwasserkosten reicht im Referenzszenario von 1.425.818 € (Siwa-Anfall: 4,96 %) bis zu 5.928.999 € (Sickerwasseranfall: 20 % des mittleren Jahresniederschlages). In den beiden Vergleichsszenarien reicht die Schwankungsbreite von 899.073 € (Siwa-Anfall temporäre Phase: 4,96 %, endgültige Phase: 2 %) bis 2.727.334 € (Siwa-Anfall temporäre Phase: 20 %, endgültige Phase: 2 %).

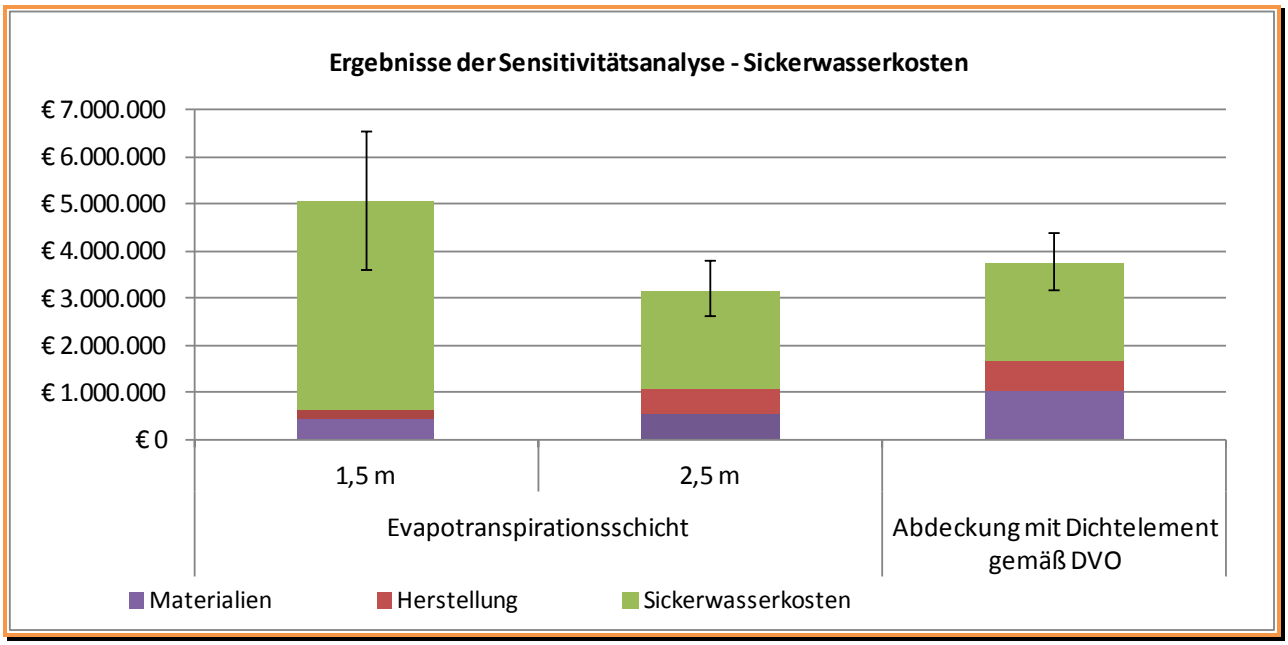


Abbildung 25: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse - Sickerwasserkosten.

6.4.2 Sensitivitätsanalyse – Materialkosten

Bei der Betrachtung der Materialkosten im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden die Min.-Max.-Werte der verwendeten Marktpreise im Vergleich zu den in den Basisszenarien untersuchten Materialkosten dargestellt. In den Tabellen 51-53 sind die Min.-Max.-Werte der Materialkosten der Szenarien im Zeitraum der endgültigen Abdeckung bzw. der temporären Abdeckung im gesamten Bilanzierungszeitraum ersichtlich.

Tabelle 51: Materialkosten der temporären Abdeckung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.

Sensitivitätsanalyse - Materialkosten - temporäre Abdeckung				
Materialien	**Preise (min.-max.)**	**benötigte Menge**	**Gesamt (Min.)**	**Gesamt (Max.)**
[1]**Kompost (n 4)**	5,81 - 11,69 €/t	16.660 t	€ 96.446	€ 194.054
[2]**Sand (n 2)**	2,00 - 4,50 €/t	15.300 t	€ 30.600	€ 68.850
[3]**Schotter (n 5)**	7,80 - 19,00 €/t	20.000 t	€ 156.000	€ 380.000
Summe			**€ 283.046**	**€ 642.904**

[1]Kompostpreise laut Kompotec Kompostierungsanlagen GmbH (2014); NUA (2014); Hahn Kompost (2014); KRS (2014).
[2] Sandpreise laut Horstfelder Sand u. Kies GmbH (2014); Mitteldeutsche Baustoffe GmbH (2014).
[3] Schotterpreise laut Harrer Beton GmbH (2014); Chwala Kompost Erde Kies GmbH (2014); Arthofer Bau (2014); Cemex Austria AG (2014); Anton Pichler GmbH (2014).

Tabelle 52: Materialkosten des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.

Sensitivitätsanalyse - Materialkosten - "Evapotranspirationsschicht - 2,5 m"				
Materialien	**Preise (min.-max.)**	**benötigte Menge**	**Gesamt (Min.)**	**Gesamt (Max.)**
[1]**Sand für den Unterboden (n 2)**	2,00 - 4,50 €/t	40.000 t	€ 80.000	€ 180.000
Summe			**€ 80.000**	**€ 180.000**

[1] Sandpreise laut Horstfelder Sand u. Kies GmbH (2014); Mitteldeutsche Baustoffe GmbH (2014).

Tabelle 53: Materialkosten des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.

Sensitivitätsanalyse - Materialkosten - "Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO"				
Materialien	**Preise (min.-max.)**	**benötigte Menge**	**Gesamt (Min.)**	**Gesamt (Max.)**
[1]**Schotter (n 5)**	7,80 - 19,00 €/t	20.000 t	€ 156.000	€ 380.000
[2]**Dichtungston**	4 €	24.000 t	€ 96.000	€ 96.000
[3]**KDB 2,5 mm**	7-9 €/m^2 (Lieferung und Einbau)	20.000 m^2	€ 140.000	€ 180.000
[4]**Schutzvlies**	3,68€/m^2 (Lieferung und Einbau)	20.000 m^2	€ 73.600	€ 73.600
Summe			**€ 465.600**	**€ 729.600**

[1]Schotterpreise laut Harrer Beton GmbH (2014); Chwala Kompost Erde Kies GmbH (2014); Arthofer Bau (2014); Cemex Austria AG (2014); Anton Pichler GmbH (2014).
[2] Preise laut Kieswerke Ohle & Lau GmbH (2007).
[3] Preise laut Sasse und Biener (2002).
[4] Preise laut Bracke und Klümpen (2005).

In Abbildung 26 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse – Materialkosten dargestellt. In der Darstellung sind die Materialkosten der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum (temporäre Abdeckung + Übergang zur endgültigen Abdeckung) enthalten. Die Schwankungsbreite der Materialkosten im gesamten Bilanzierungszeitraum reicht im Referenzszenario von 283.046 € bis 642.904 €. Im Szenario „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ von 363.046 € bis 822.904 €. Im Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ reicht die Schwankungsbreite der Materialkosten von 748.646 € bis 1.372.504 €.

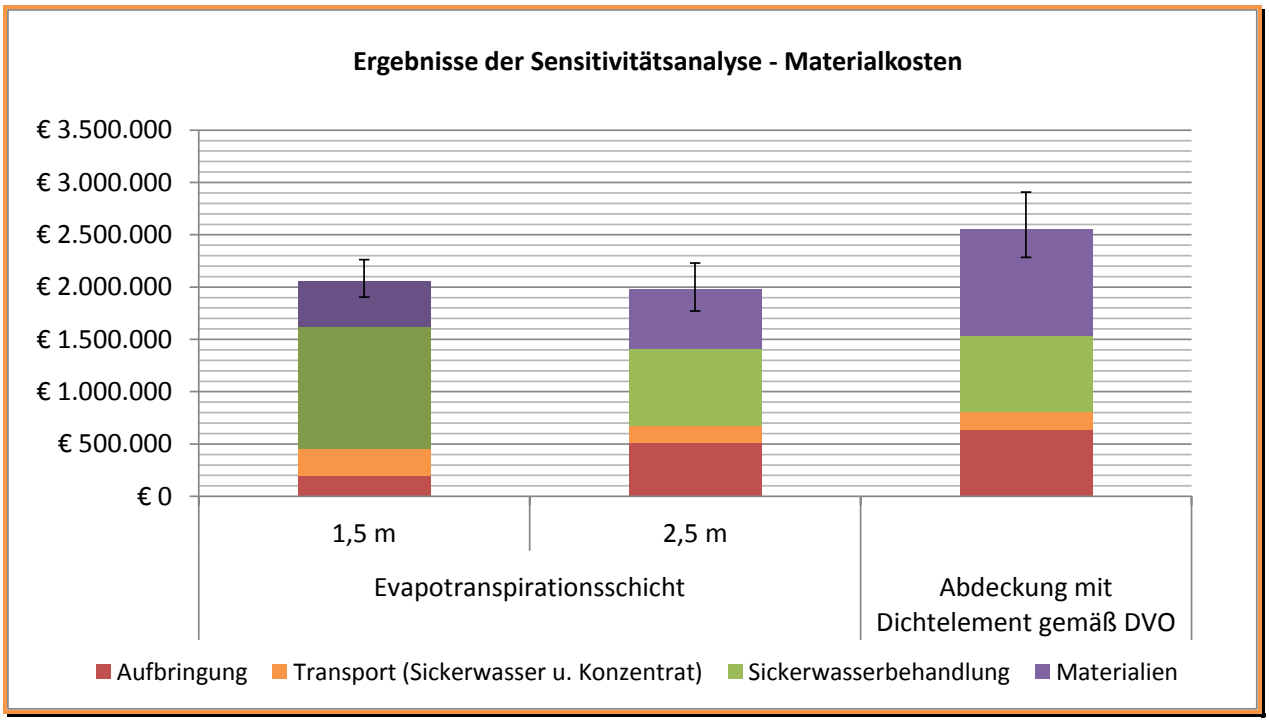


Abbildung 26: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse - Materialkosten.

Die Ergebnisse zeigen, dass unter den gewählten Annahmen die Schwankungsbreite der Materialkosten so groß ist, dass keine deutliche kostenmäßige Bevorzugung eines der beiden „Evapotranspirationsschicht-Szenarios“ möglich ist. Allerdings zeigen die Überlegungen, dass selbst bei Annahme der Maximalkosten im Referenzszenario und im Szenario „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ die Kosten geringer sind als im Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ bei Erwerb der Materialien zu Minimalpreisen.

7 Diskussion und Schlussfolgerungen

Diskussion der Ergebnisse der vergleichenden Ökobilanz:

Die Ergebnisse der Ökobilanzierung zeigen, dass das Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ die geringsten Emissionen hinsichtlich des Treibhauspotenzials verursacht, jedoch nur bei Betrachtung der Szenarien innerhalb des Bilanzierungszeitraumes. Unter dem Aspekt, dass bei einer Deponieoberflächenabdichtung ein gewisses Restmethanpotenzial im Deponiekörper verbleibt (in dieser Arbeit etwa 1,7 t CH_4), schneidet dieses Szenario hinsichtlich des Treibhauspotenzials mit Abstand am schlechtesten ab. Wird das Restmethanpotenzial des Szenarios „Abdichtung mit Dichtelement gemäß DVO“ berücksichtigt, was im Folgenden auch der Fall ist, verursacht das Referenzszenario „Evapotranspirationsschicht - 1,5 m“ die geringsten Emissionen hinsichtlich des Treibhauspotenzials, jedoch nur dann, wenn, wie in dieser Arbeit angenommen, die Evapotranspirationsschicht - 1,5 m technisch optimal ausgeführt (nach Stand der Technik) ist. Dies wurde angenommen, da im Referenzszenario die Abdeckung unverändert auf der Deponie belassen wird. Würden die Grenzwerte (Methanemissionen < 5 kg $CH_4/m^2/a$ als Mittelwert über alle Messwerte des Methanmassenstroms bzw. < 10 kg CH_4 Methanemissionen als Einzelwert über bevorzugte Wegigkeiten) der Deponieverordnung (2008) nicht eingehalten werden, müssten ohnehin Maßnahmen gesetzt werden, um die Einhaltung der Grenzwerte zu erreichen. Aufgrund der angenommenen technisch optimal ausgeführten 1,5 m mächtigen Evapotranspirationsschicht und der Annahme, dass in der 2,5 m mächtigen Evapotranspirationsschicht ebenfalls eine Methanoxidationsrate von 90 % erreicht wird, ist es schwierig, Unterschiede zum Szenario „Evapotranspirationschicht - 2,5 m“ auszumachen. In dieser Arbeit wurde angenommen, dass durch die Erhöhung der Abdeckung auf 2,5 m der Sickerwasseranfall auf 2 % des Jahresniederschlags reduziert werden kann. Dadurch sind die Emissionen des Prozesses „Sickerwasser“ (Transport und Behandlung) geringer als im Referenzszenario. Die Emissionen der Erhöhung der Abdeckschicht (zusätzliche Materialien, Transport und Arbeitsaufwand) sind jedoch höher als die Reduzierung der Sickerwasseremissionen. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass dies bereits bei einem Sickerwasseranfall von 10 % im Referenzszenario (im gesamten Bilanzierungszeitraum) nicht mehr der Fall ist und das Szenario „Evapotranspirationsschicht - 2,5 m“ unter diesen Annahmen die geringsten Auswirkungen auf den Treibhauseffekt verursacht. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse, dass der Transport der Materialien zur Deponie keine nennenswerten Auswirkungen auf die Ergebnisse hat. Den größten Anteil an den Auswirkungen auf den Treibhauseffekt haben die Methanemissionen. Bei allen im Rahmen der Sensitivitätsanalyse - Methan untersuchten Varianten schneidet das Szenario „Evapotranspirationsschicht - 2,5 m“ am besten ab (bei Berücksichtigung des Restemethanpotenzials im Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO). Dies ist

wiederum darin begründet, dass das Referenzszenario aufgrund des unveränderten Belassens der 1,5 m Evapotranspirationsschicht in den letzten 30 Jahren des Bilanzierungszeitraumes mit den im Rahmen der Sensitivitätsanalyse angenommenen geringeren Methanoxidationsraten, das Szenario „Evapotranspirationsschicht - 2,5 m“ jedoch weiterhin mit einer Methanoxidationsrate von 90 % berechnet wurde.

Diskussion der Ergebnisse der Betrachtung ausgewählter Kosten :

Bei der Betrachtung der ausgewählten Kosten zeigt sich, dass das Szenario „Evapotranspirationsschicht - 2,5 m“ unter den getroffenen Annahmen die kostengünstigste Variante darstellt. An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass die in dieser Arbeit betrachteten Kosten keine Gesamtkosten darstellen. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der betrachteten Kosten zeigen, dass die Sickerwasserkosten (Sickerwasser- und Konzentrattransport, Sickerwasserbehandlung) den größten Anteil an den Kosten haben. Die großen Schwankungsbreiten der Sickerwasserkosten sowie der Materialkosten lassen keine klaren Aussagen bezüglich eines kostengünstigsten bzw. kostenintensivsten Szenarios zu. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse-Materialkosten zeigen jedoch, dass selbst bei Annahme der Maximalkosten im Referenzszenario und im Szenario „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ die Kosten geringer sind als im Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ bei Erwerb der Materialien zu Minimalpreisen

Handlungsempfehlungen:

Die Handlungsempfehlungen werden an dieser Stelle hinsichtlich der beiden Zielsetzungen „Reduzierung der Umweltauswirkungen“ und „Kostenminimierung“ formuliert.

Reduzierung der Umweltauswirkungen:

In Bezug auf das Treibhauspotenzial ist der wichtigste Aspekt die optimale technische Ausführung der temporären Abdeckung (Evapotranspirationsschicht – 1,5 m). Unter dieser Annahme verursacht das Referenzszenario nur minimal geringere Auswirkungen auf den Treibhauseffekt als das Szenario „Evapotranspirationsschicht - 2,5“. Bei Betrachtung der Ergebnisse innerhalb des Bilanzierungszeitraumes verursacht das Szenario „Abdichtung mit Dichtelement gemäß DVO“ die geringsten Auswirkungen auf den Treibhauseffekt. Aufgrund der Tatsache, dass jedoch ein gewisses Methanbildungspotenzial im Deponiekörper verbleibt, welches erst außerhalb des Bilanzierungszeitraumes freigesetzt werden kann und nachfolgende Generationen belasten könnte, kann dieses Szenario nicht als nachhaltige Alternative empfohlen werden.

Kostenminimierung:

Bei Betrachtung der ausgewählten Kosten kann das Szenario „Evapotranspirationsschicht-2,5 m“ als kostengünstige Alternative, verglichen mit den beiden anderen Szenarien empfohlen werden. Bei veränderten Annahmen bzgl. der Kosten (im Rahmen der

Sensitivitätsanalyse) ist es schwierig, eine allgemeine Empfehlung zu geben, da sowohl die Sickerwasserkosten (Konzentrat- und Sickerwassertransport, Sickerwasserbehandlung) als auch die Materialkosten einen entscheidenden Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Die betrachteten Kosten sind stark von den klimatischen Bedingungen (Jahresniederschlag) und den regional verfügbaren Materialien bzw. deren Preisen abhängig und sollten für jede Deponie im Einzelnen betrachtet werden.

Schlussfolgerungen:

Folgende Schlussfolgerungen können aus den Ergebnissen der Ökobilanzierung und der Betrachtung der ausgewählten Kosten formuliert werden:

- Das Belassen der temporären Abdeckung aus 1,5 m Evapotranspirationsschicht als endgültige Oberflächenabdeckung ist nur bei einer technisch optimalen Ausführung (hinsichtlich der Methanoxidation und der Reduzierung der Sickerwassermenge) zu empfehlen.
- Das Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ ist bei Berücksichtigung des im Deponiekörper verbleibenden Methanbildungspotenzials die Variante mit den deutlich höchsten Auswirkungen auf den Treibhauseffekt.
- Aufgrund der großen Schwankungsbreiten der Sickerwasser- und Materialkosten kann hinsichtlich der betrachteten Kosten keine eindeutige Empfehlung zu Gunsten eines bestimmten Szenarios gegeben werden. Allerdings sind die betrachteten Kosten des Referenzszenarios und des Szenarios „Evapotranspirationsschicht - 2,5 m“ selbst bei Annahme der Maximalkosten (Materialien) geringer als im Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ bei Erwerb der Materialien zu Minimalpreisen.

8 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Masterarbeit war, eine vergleichende Ökobilanzierung von unterschiedlichen Szenarien bzw. Handlungsalternativen für Deponieoberflächenabdeckungen auf Siedlungsabfalldeponien zu erstellen. Da das untersuchte System keine reale Deponie war, wurde ein Deponiekompartiment modelliert. Es wurde angenommen, dass die Fläche des Kompartiments 2 ha beträgt. Die Schütthöhe wurde mit 15 m angenommen, wodurch sich aufgrund einer Dichte von 0,9 t/m^3 Abfall eine abgelagerte Menge von 270.000 t ergab. Um die gasförmigen Emissionen unter getroffenen Annahmen berechnen zu können, wurde dafür eine Deponiegasprognose erstellt. Der mittlere Jahresniederschlag wurde für den Osten Österreichs mit 650 mm gewählt.

Es wurden drei Hauptszenarien hinsichtlich der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial miteinander verglichen. Die Deponieverordnung (*DVO*, 2008) schreibt vor, auf Deponien, die mit Abfällen mit hohen Anteilen an biologisch abbaubarem Material verfüllt sind, eine temporäre Oberflächenabdeckung herzustellen, um den Wasserzutritt zu ermöglichen und die langfristige Stabilisierung der Abfälle zu fördern. Spätestens nach 20 Jahren muss allerdings eine endgültige Abdichtung aufgebracht werden.

Die temporäre Abdeckung, in dieser Arbeit eine 1,5 m mächtige Evapotranspirationsschicht, ist für alle drei Szenarien identisch (Basisszenario). Das Referenzszenario stellt jene Variante dar, bei der der Übergang zur endgültigen Abdeckung durch das Belassen der Schicht (unter der Annahme, dass die in der DVO geforderte „Dichtwirkung“ [Sickerwasseranfall < 5 % des Jahresniederschlages]) erfolgt und somit die restlichen 30 Jahre des Bilanzierungszeitraumes mit denselben Annahmen weiterberechnet wurden. Bei den beiden Vergleichsszenarien erfolgt der Übergang zur endgültigen Abdeckung einerseits durch eine Erhöhung der Abdeckschicht auf 2,5 m und andererseits durch Abtragen der Evapotraspirationsschicht mit anschließender Herstellung einer Abdeckung mit Dichtelement gemäß Deponieverordnung. Des Weiteren wurden ausgewählte Kosten betrachtet, um auch ökonomische Vor- bzw. Nachteile aufzeigen zu können.

Die Ökobilanzierung wurde nach der internationalen Normenreihe DIN-EN-ISO 14040 ff (2010) erstellt. Nach dieser Normenreihe besteht eine Ökobilanz immer aus vier iterativen Phasen. Diese sind die Festlegung des Zieles und des Untersuchungsrahmen, die anschließende Phase der Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung und schlussendlich die Auswertungsphase. Die Ökobilanzierung in dieser Arbeit wurde mit der Software GaBi 6.0 Education durchgeführt.

Aus den Ergebnissen der Ökobilanzierung ist ersichtlich, dass das Referenzszenario unter getroffenen Annahmen (Gaserfassungsrate 50 % bis einschließlich zum Jahr 2010; Methanoxidationsrate 90 %; Sickerwasseranfall 4,96 % [< 5 % des jährlichen Niederschlags]) die geringsten Emissionen an kg CO_2-Äqu. (ca. 23.000 t) verursacht. Wird jedoch das nach

der Abdichtung der Deponieoberfläche im Deponiekörper verbleibende Methanbildungspotenzial, welches erst außerhalb des Bilanzierungszeitraumes freigesetzt werden kann, nicht berücksichtigt, verursacht das Szenario „Abdichtung mit Dichtelement gemäß DVO“ die geringsten Auswirkungen auf den Treibhauseffekt (ca. 22.000 t). Die Differenz der Emissionen des Referenzszenarios und des Szenarios „Evapotranspirationsschicht - 2,5 m“ ist mit knapp 100 t CO_2-Äqu. relativ gering.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurden die Methanemissionen bei veränderten Annahmen untersucht. Bei Berücksichtigung des Restmethanpotenzials des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ zeigen die Ergebnisse, dass bei der Variante SA-CH_4-1 (= Sensitivitätsanalyse-Methan-1; Gaserfassungsrate bis einschließlich zum Jahr 2010: 20 %, Methanoxidationsrate: 75 %) das Szenario „Evapotranspirationsschicht-2,5 m“ bereits weniger Auswirkungen auf den Treibhauseffekt verursacht als das Referenzszenario.

Die Ergebnisse der „Sensitivitätsanalyse - Sickerwasser“ zeigen, dass die Emissionen des Prozesses „Sickerwasser“ (Sickerwasserbehandlung, Konzentrat- und Sickerwassertransport, Entsorgung Konzentrat) die Gesamtergebnisse der Szenarien entscheidend beeinflussen können. Fallen im Referenzszenario anstatt 4,96 % (< 5 % laut Deponieverordnung, 2008) 10 % des jährlichen Niederschlags (im gesamten Bilanzierungszeitraum) als Sickerwasser an, übersteigen die Auswirkungen auf den Treibhauseffekt des Referenzszenarios bereits jene des Szenarios „Evapotranspirationsschicht - 2,5 m“ (temporäre Phase: 10 %; endgültige Phase: 2 %).

Bei der Betrachtung der ausgewählten Kosten in den Szenarien zeigt sich, dass das Szenario „Evapotranspirationsschicht - 2,5 m“ die kostengünstigste Variante darstellt, wenn durch die Erhöhung der Abdeckschicht der Sickerwasseranfall auf 2 % des Jahresniederschlags reduziert werden kann. Selbst wenn die temporäre Abdeckung technisch optimal ausgeführt (4,96 % Sickerwasseranfall) ist, übersteigen die Kosten des Prozesses „Sickerwasser“ im Referenzszenario die zusätzlichen Material- und Herstellungskosten der erhöhten Abdeckung und den dadurch verminderten Sickerwasseranfall und die damit einhergehenden geringeren Sickerwasserkosten.

Das Fazit dieser Arbeit lautet, dass das Referenzszenario hinsichtlich der Auswirkungen auf den Treibhauseffekt ausschließlich bei technisch optimaler Ausführung als mögliche Handlungsalternative empfohlen werden kann. Hinsichtlich der Kosten kann keine klare Empfehlung gegeben werden. Aufgrund der vielen Unsicherheitsfaktoren und der großen Schwankungsbreiten bzgl. der Material- und Sickerwasserkosten (Materialpreise, Sickerwasseranfall etc.) sollte jede Deponie im Einzelnen betrachtet werden.

9 Literaturverzeichnis

ALTLASTENSANIERUNGSGESETZ (1989): BGBl. 1989/299 idF BGBl. L 2010/211: Bundesgesetz vom 7. Juni 1989 zur Finanzierung und Durchführung der Altlastensanierung (ALSAG). Österreich.

ABFALLWIRTSCHAFTSGESETZ (2002): BGBl I 2002/102 idF BGBl. I. 2012/9: Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002 – AWG 2002). Österreich.

ANTON PICHLER GMBH **(**2014): Preisliste Schotterwerk Glashütten. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.unitedbrains.at/ap/Preislisten/2012-13%20Preisliste%20Schotterwerk%20Glashuetten.pdf, (Datum der Abfrage: 18.01.2014)

ARTHOFER BAU (2014): Homepage. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.arthofer-bau.at/de/Kies-und-Sand, (Datum der Abfrage: 18.01.2014).

BAWP (2006): Bundesabfallwirtschaftsplan 2006. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien, 2006.

BEWO ENGINEERING GMBH (2013): Schüttguttabelle. Internetpublikation, verfügbar unter: http://www.bv-net.de/deutsch/080_service/08600_schuettguttabelle.htm (Datum der Abfrage: 23.04.2013).

BMU-/LAGa (2002): Hinweise und Erläuterungen zu Anhang 51. Abwasserverordnung: Oberirdische Ablagerung von Abfällen, 2002. Internetpublikation, verfügbar unter: http://www.umwelt-online.de/recht/wasser/abw_vo/an51e.htm (Datum der Abfrage: 16.07.2012).

BODO FREIMUTH GMBH & CO KG (2014): Homepage. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.freimuth-abbruch.de/baumaschinenvermietung/preise.html#c292, (Datum der Abfrage: 18.01.2014).

BRACKE, R. UND KLÜMPEN, C. (2005): Leistungsbuch Altlasten und Flächenentwicklung 2004/2005. In: Materialien zur Altlastensanierung und zum Bodenschutz. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen. Essen, 2005. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/malbo/malbo20/malbo20sIs20.pdf, (Datum der Abfrage: 18.01.2014).

BRUNNER, P. H., DÖBERL, G., EDER, M., FRÜHWIRT, W., HUBER, R., HUTTERER, H., PIERRARD, R., SCHÖNBÄCK, W., WÖGINGER, H. (2000): Bewertung abfallwirtschaftlicher Maßnahmen mit dem Ziel der nachsorgefreien Deponie (BEWEND). Endbericht Version 3. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.wien.gv.at/umweltschutz/pool/pdf/bewend-2.pdf, (Datum der Abfrage: 03.07.2012)

BURKHARDT, G. EGLOFFSTEIN, T. (2008): Technische und wirtschaftliche Betrachtungen von Alternativen zum Deponieabschluss. In: Kranert, M. (Hrsg.): Zeitgemäße Deponietechnik – Klimaschutz in der Stilllegungs- und Nachsorgephase - Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft 2008. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München.

CHWALA KOMPOST ERDE KIES GMBH (2014): Preisliste. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.kompost-erde-kies.at/media/file/14_Chwala_Kompost-Erde_Kies_Preisliste_2013_Web.pdf, (Datum der Abfrage: 18.01.2014).

CEMEX AUSTRIA AG (2014): Homepage. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.cemex.at/1442_DE-Unternehmen-Kontakt.htm, (Datum der Abfrage: 18.01.2014).

CML (2001): GUINEE, J.B., GORREE, M., HEIJUNGS, R., HUPPES, G., KLEIJN, R., DE KONING, A., VAN OERS, L., WEGENER SLEESWIJK, A., SUH, S., UFO DE HAES, H.A., DE BUIJN, H., VAN DUIN, R. HUIJBREGTS, M.A.J. (2001): Life cycle assessment – An Operational Guide to the ISO Standard, Centre of Environmental Science, Leiden University, Leiden (CML, Niederlande.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, E. V. (2006): DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Deutsche und englische Fassung EN ISO 14040:2006

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG; E. V. (2006): DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Deutsche und englische Fassung EN ISO 14044:2006

DVO (2008): Deponieverordnung 2008. BGBl. II. Nr. 39/2008 idF BGB. II. Nr. 178/2010. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien. Österreich.

ENERGIE-CONTROL GMBH (2012): Marktbericht 2012 – Nationaler Bericht an die Europäische Kommission. Internetpublikation, verfügbar unter: http://www.e-control.at/portal/page/portal/medienbibliothek/publikationen/dokumente/pdfs/EC12_042_MB_gesamt_D.pdf (Datum der Abfrage: 12.08.2013).

EUROPÄISCHE DEPONIERICHTLINIE (1999): Richtlinie über Abfalldeponien (1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999). Internetpublikation, verfügbar unter: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:01999L0031-20111213&rid=1 (Datum der Abfrage: 16.07.2014)

GaBi (2012): GaBi 6.0 education: Software and Databases for Life-Cycle-Assessment and Life-Cycle-Engineering, LBP University of Stuttgart and PE International GbmH, Leinfelden-Echterdinge, 2012.

HAHN KOMPOST (2014): Homepage. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.hahn-kompost.de/produkte.php, (Datum der Abfrage: 18.01.2014).

HANS ZÖCHLING GMBH (2014): Homepage. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.zoechling-hainfeld.at/downloads/regiepreislistegeraete2013.pdf, (Datum der Abfrage: 18.01.2014).

HARRER BETON GMBH (2014): Internetpublikation, verfügbar unter: http://www.harrerbeton.at/index.php?option=com_content&task=view&id=17&Itemid=31, (Datum der Abfrage: 18.01.2014).

HEINKE, K. (2010): Entwicklung der Sickerwassermengen bei abgedichteten Deponien im Freistaat Sachsen. In: 6. Leipziger Deponiefachtagung (2010). Stilllegung, Sicherung, Nachsorge und Nachnutzung von Deponien. Veranstalter: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (FH). Internetpublikation, verfügbar unter: http://www.leipziger-deponiefachtagungen.de/pdf/pdf_tagung2010/2010leipziger_14_Katja_Heinke_Entwicklung der Sickerwassermengen.pdf

HEYER, K-U. (2003): Emissionsreduzierung in der Deponienachsorge. Verlag Abfall aktuell. Stuttgart, 2003.

HORSTFELDER SAND UND KIES GMBH (2014): Internetpublikation, verfügbar unter: http://www.hsk-horstfelde.de/files/hsk/Preisliste%20Web-Seite%202013.pdf, (Datum der Abfrage: 18.01.2014).

HUBER-HUMER, M., AMANN, A., BOGOLTE, T., DOS SANTOS, M., HAGENAUER, I., PAULINY, W., REICHENAUER, T., WATZINGER, A., WIMMER, B. (2008): Technischer Leitfaden „Methanoxidationsschichten", erstellt im Rahmen der ÖVA-Arbeitsgruppe „Leitfaden Methanoxidationsschichten", Leitung: Marion Huber-Humer, Wien, Mai 2009, 37 Seiten. Veröffentlicht auf der ÖVA-Homepage (http://www.altlastenmanagement.at/)

HUMER, M.; LECHNER, P. (1997): Grundlagen der biologischen Methanoxidation. Perspektiven für die Entsorgung von Deponiegas. Waste Reports. Universität für Bodenkultur Wien, 1997.

HUMER, M.; LECHNER, P. (1997): Deponiegasentsorgung mit Hilfe von Mikroorganismen. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 49. Jahrgang, Heft 7/8, pp. 164-171. Springer-Verlag KG, Wien, 1997.

HUMER, M.; LECHNER, P. (2001a): Technischer Aufbau eines Methanoxidationssystems für Deponien. In: KA Wasserwirtschaft – Abwasser – Abfall, 48. Jahrgang, Nr. 4 (April 2001), pp. 510-513, GFA – Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V., Hennef, 2001.

HUMER, M.; LECHNER, P. (2001b): Design of a Landfill Cover Layer to Enhance Methane Oxidation – Results of a Two Year Field Investigation, in Christensen T.H., Cossu R., Stegmann R. (Eds.): SARDINIA 2001 Eighth International Waste Management and Landfill Symposium, 1. – 5. Oktober 2001, S. Margherita die Pula/Cagliari, Sardinien, Italien. Proceedings, Vol II Leachate and Landfill Gas; p. 541 f.; CISA Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari/Italien, 2001.

HUPE, K., HEYER, K.-U., STEGMANN, R. (2002): Gezielte Befeuchtung/Bewässerung von Altdeponien zur Beschleunigung der biologischen Umsetzungsprozesse. In: R. Stegmann, G. Rettenberger, W. Bidlingmaier, H.-J. Ehrig (Hrsg.): Deponietechnik 2002, Hamburger Berichte 18, Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, 2002.

ILCD HANDBOOK (2010): General Guide for Life Cycle Assessment – Provisions and action steps. European Union, 2010. Internetpublikation, verfügbar unter: http://www.eurosfaire.prd.fr/7pc/doc/1286804198_lbna24378enc_002.pdf (Datum der Abfrage: 20.04.2013)

IPCC (2006): Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Japan, 2006.

IPPC (2007): Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). Internetpublikation, verfügbar unter: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml#1 (Datum der Abfrage: 26. 09. 2012).

KIESWERKE OHLE & LAU GMBH (2014): Preisliste. Internetpublikation, verfügbar unter www.kieswerke-ohle-lau.de/downloads/preisliste.doc, (Datum der Abfrage: 18.01.2014).

KRS (2014): Kompostwerke Rhein-Sieg GmbH & Co. KG. Preisliste 2014. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.krs.rsag.de/imperia/md/content/cms247krs/preisliste.pdf, (Datum der Abfrage: 18.01.2014)

KOMPOTEC GMBH (2014): Preisliste Kompostwerk Gütersloh. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.kompotec.de/db/docs/preisliste_guetersloh.pdf, (Datum der Abfrage: 18.01.2014).

KRÜMPELBECK, I. (2000): Untersuchungen zum langfristigen Verhalten von Siedlungsabfalldeponien. Dissertation and er Bergischen Universität – GS Wuppertal.

KÜHLE-WEIDEMEIER, M., BOGON, H. (2008): Methanemission aus passiv entgasten Deponien und der Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen – Emissionsprognose und Wirksamkeit der biologischen Methanoxidation – Schlussbericht. Internetpublikation, verfügbar unter: http://www.wasteconsult.de/Methanemissionen_Schlussbericht.pdf (Datum der Abfrage: 17.12.2011).

LEBENSMINISTERIUM (2009): Handlungsempfehlungen zu Abdeckschichten von Deponien in Österreich. Internetpublikation, verfügbar unter: http://www.lebensministerium.at/suchergebnisse.html?queryString=oberfl%C3%A4chenabdeckungen (Datum der Abfrage: 25.06.2012).

LECHNER, P. (HG.), BEIGL, P., BINNER, E., HEIß-ZIEGLER, C., HUBER-HUMER, M., IORDANOPOULUS-KISSER, M., LEBERSORGER, S., MOSTBAUER, P., SALHOFER, S., SMIDT, E., STUBENVOLL, J. UND WASSERMANN, G. (2004): Kommunale Abfallentsorgung. Facultas Universitätsverlag, Wien, 2004.

LECHNER, P.; HUBER-HUMER, M. (2008): Mikrobielle Methanoxidation in Deponieabdeckschichten. In: Zeitgemäße Deponietechnik 2008. Klimaschutz in der Stilllegungs- und Nachsorgephase. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 92. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München.

LODISH, H.; BALTIMORE, D.; BERK, A.; ZIPURSKY, S.L.; MATSUDEIRA, P.; DARNELL, J. (1995): Molekulare Zellbiologie. Übersetzung von Lothar Träger in Zusammenarbeit mit Ruth Träger – 2. Aufl. – Berlin; New York: De Gruyter, 1996.

MESSER AUSTRIA GMBH (2013): Internetpublikation, verfügbar unter: http://www.messer.at/datenblaetter_broschueren/datenblaetter/Methan_tech.pdf; (Datum der Abfrage: 03.05.2013).

MISCANTHUS VERMEHRUNGSBETRIEB HÖLLER (2012): Homepage, Internetpublikation, verfügbar unter: http://www.elefantengras.at/pdf/Anbau_Pflege_Elefantengras.pdf; (Datum der Abfrage: 17.11.2012).

MITTELDEUTSCHE BAUSTOFFE GMBH (2014): Internetpublikation, verfügbar unter: http://www.mdb-gmbh.de/webseiten/asp/preisliste.asp?werk=frose, (Datum der Abfrage: 18.01.2014).

NUA ABFALLWIRTSCHAFT GmbH (2014): Niederösterreichische Umweltschutz Abteilung. Internetpublikation, verfügbar unter http://mspwhs25.bon.at/brantner.com/Preisliste.pdf, (Datum der Abfrage: 18.01.2014).

PE INTERNATIONAL GMBH (2012): GaBi 6.0 education database und Software.

PRANTL, R. (2007): Entwicklung der organischen Substanz im Zuge der In-Situ Belüftung von Deponien. Dissertation am Institut für Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur, Wien.

RAMKE, H.-G., (2004): Modellierung des Wasserhaushalts und der Emissionen von Deponien. Technisches Kennblatt TKB IV/1-2 des Leitfadens Deponiestilllegung. Fachausschuss Deponien der ATV-DVWK/VKS, Höxter, 2004.

RETTENBERGER, G., MEZGER, H. (1992): Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen – Leitfaden Deponiegas. Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 10. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe 1992. Verfügbar unter: http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16851/deponiegashaushalt.pdf?command=downloadContent&filename=deponiegashaushalt.pdf (Datum der Abfrage: 15. 08. 2012).

SCHACHERMAYER, E. (o.J): Vergleich und Evaluierung verschiedener Modelle zur Berechnung der Methanemissionen aus Deponien.

SCHACHERMAYER, E.; LAMPERT, C. (2010): Aufkommen und Behandlung von Deponiesickerwasser. Bestandsaufnahme an ausgewählten österreichischen Deponien. Umweltbundesamt, Wien. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0249.pdf, (Datum der Abfrage: 07.11.2011)

SCHNEIDER, R. (2013): Persönliche Mitteilung. Ecosoil Süd GmbH. Nürnberg, 2013.

SIEGENTHALER, C.P. (2006): Ökologische Rationalität durch Ökobilanzierung. Eine Bestandsaufnahme aus historischer, methodischer und praktischer Perspektive. Metropolis Verlag, Marburg, 2006.

STRIMITZER, L. (2011): Ökobilanz der In-Situ Aerobisierung einer Altablagerung. Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Titels Diplomingenieur. Universität für Bodenkultur Wien. Department für Wasser, Atmosphäre und Umwelt. Institut Abfallwirtschaft. Wien, 2011.

TABASARAN, O. G., RETTENBERGER, G. (1987): Grundlagen zur Planung von Entgasungsanlagen. In Hösel, Schenkel, Schnurer (Hrsg.), in Müllhandbuch, Kennziffer 4547, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

UMWELTBUNDESAMT (2009): Emissionstrends 1990-2009. Ein Überblick über österreichischen Verursacher von Luftschadstoffen (Datenstand 2011). Internetpublikation, verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0338.pdf (Datum der Abfrage: 13.06.2012).

UMWELTBUNDESAMT (2010): Klimaschutzbericht 2010. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0267.pdf, (Datum der Abfrage: 07.11.2011).

VOGT, R., KNAPPE, F., GIEGRICH, J., DETZEL, A. (2002) Ökobilanz Bioabfallverwertung. Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit von Systemen zur Verwertung von biologisch-organischen Abfällen. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., Berlin 2002.

WATTENDORF, P.; BIEBERSTEIN, A.; BÖNECKE, B.; BRAUNS, J.; EHRMANN, O.; HAUBRICH, E.; KOSER, M.; REITH, H.; SCHACK-KIRCHNER, H.; (2002): Rekultivierung von Deponien mit Oberflächenabdichtungen: Untersuchungen zur Gestaltung von Rekultivierungsschichten

und Wurzelsperren. Forschungsbericht FZKA – BWPLUS. Baden-Württemberg, 2002. Internetpublikation, verfügbar unter: http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/40125/BWD99003SBer.pdf?command=downloadContent&filename=BWD99003SBer.pdf&FIS=161 (Datum der Abfrage: 17.08.2012).

WIMMER, B.; REICHENAUER, T. (2006): Technischer Leitfaden Evapotranspirationsschichten zur Sicherung/Sanierung von Altablagerungen; erstellt im Forschungsprojekt INTERLAND. Seibersdorf, 2006. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.publicconsulting.at/uploads/interland_leitfaden_2_evapotranspirationsschichten.pdf (Datum der Abfrage: 15.04.2012).

ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK (2012): Klimadaten von Österreich 1971 – 2000. Internetpublikation, verfügbar unter http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm (Datum der Abfrage 07.11.2012)

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anaerober Abbau (Lechner et al., 2004; zitiert in Strimitzer, 2011). 15

Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung der Gaszusammensetzung und der Gasbildung (Rettenberger, 2005; zitiert in Prantl, 2007). 16

Abbildung 3: Zeitliche Entwicklung der Deponiegas- und Sickerwasserzusammensetzung in Siedlungsabfalldeponien (nach Christensen/Kjeldsen, 1989; zitiert in Brunner et al., 2000) .20

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Einflussfaktoren auf die Methanoxidation bei passiver Entgasung (Kühle-Weidemeier und Bogon, 2008). 23

Abbildung 5: Empfohlener Regelaufbau für ein Methanoxidationssystem (Humer und Lechner, 2001a) 23

Abbildung 6: Aufbau einer Wasserhaushaltsschicht (Wimmer, 2006; zitiert in Lebensministerium, 2009). 28

Abbildung 7: Einflussfaktoren auf den Wasserhaushalt einer Deponie (schematische Darstellung nach Heyer et al., 2000; zitiert in Hupe et al., 2002) 28

Abbildung 8: Deponiegasprognose für den Zeitraum 1991 – 2054 (eigene Berechnung nach Rettenberger und Mezger, 1992). 33

Abbildung 9: Vergleich der Deponiegasprognosen nach unterschiedlichen 35

Abbildung 10: Vereinfachte Darstellung des Systems der Szenarien. 37

Abbildung 11: Schematische Darstellung der temporären Abdeckung. 41

Abbildung 12: Schematische Darstellung des Übergangs zur endgültigen Abdeckung des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“. 49

Abbildung 13: Schematische Darstellung des Übergangs zur endgültigen Abdeckung des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“. 52

Abbildung 14 : Zusammensetzung des österreichischen Strommixes. AT: Electricity grid mix; Quelle: PE International (2009). 57

Abbildung 15: Anteile der einzelnen Prozesse am Treibhauspotenzial (GWP 100, CML 2001, Nov. 10) der temporären Abdeckung. 61

Abbildung 16: Anteile der einzelnen Prozesse am Treibhauspotenzial (GWP 100; CML 2001, Nov. 10) des Referenzszenarios „Evapotranspirationsschicht – 1,5 m“ im Zeitraum der endgültigen Abdeckung. 62

Abbildung 17: Anteile der einzelnen Prozesse am Treibhauspotenzial (GWP 100; CML 2001, Nov. 10) des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ im Zeitraum der endgültigen Abdeckung 63

Abbildung 18: Anteile der einzelnen Prozesse am Treibhauspotenzial (GWP 100; CML 2001, Nov. 10) des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ im Zeitraum der endgültigen Abdeckung. 64

Abbildung 19: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum. 65

Abbildung 20: Treibhauspotenzial (gesamte Fläche [2 ha]; GWP 100, CML 2001, Nov. 10) der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum im Rahmen der Sensitivitätsanalyse – Transport. 67

Abbildung 21: Treibhauspotenzial (gesamte Fläche [2 ha]; GWP 100, CML 2001, Nov. 10) der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum im Rahmen der Sensitivitätsanalyse – Methan. 69

Abbildung 22: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse – Sickerwasser. 71

Abbildung 23: Vergleich der Material- und Herstellungskosten der Szenarien. 75
Abbildung 24: Vergleich der betrachteten Kosten der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum. 77
Abbildung 25: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse - Sickerwasserkosten. 79
Abbildung 26: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse - Materialkosten. 81

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: 9-Phasen-Modell der Deponiegasbildung (Rettenberger et al., 1992) 17

Tabelle 2: Beispiel für mittlere und maximale Sickerwasserkonzentrationen aus Hausmülldeponien (Werte für die saure Phase und die Methanphase, nach Stegmann und Spendlin, 1987, und maximal zulässige Konzentrationen für die Sickerwassereinleitung in Fließgewässer nach AbwasserVDeponie, zitiert in Brunner et al., 2000). 19

Tabelle 3: Methanoxidationsraten verschiedener Komposte in Laboruntersuchungen (Humer und Lechner, 1997a). 25

Tabelle 4: Anforderungen an die Kompostqualität zur Methanoxidation (Humer und Lechner, 2001b).....26

Tabelle 5: Parameterkombinationen für die Gasprognose nach Tabasaran und Rettenberger (1987).....32

Tabelle 6: Gesamtgasmenge (m^3) 50 Jahre nach Deponieabschluss (im Jahr 2054). 32

Tabelle 7: Parameterkombinationen für die Deponiegasprognose nach IPCC Tier 2 Modell. 35

Tabelle 8: Arithmetisches Mittel der Gasprognosen im Bilanzierungszeitraum nach unterschiedlichen Berechnungsmodellen und Parameterkombinationen bei einer angenommenen Gesamtfläche des Modellkompartiments von 2 ha. 35

Tabelle 9: Beispiele für Wirkungsfaktoren für die Wirkungskategorie Treibhauspotenzial. Quelle: PE (2012). 40

Tabelle 10: Benötigte Materialmengen für die temporäre Abdeckung. 42

Tabelle 11: Transportaufwendungen für die temporäre Abdeckung - 30 km. 42

Tabelle 12: Dieselverbrauch bei der Aufbringung der temporären Abdeckung (20.000 m^2). .43

Tabelle 13: Aufwände der Sickerwasserbehandlung im Basisszenario in der Phase der temporären Abdeckung. 46

Tabelle 14: Kontrollmaßnahmen in der Nachsorgephase (DVO, 2008). 47

Tabelle 15: Aufwände des Prozesses „Monitoring“ in der Phase der temporären Abdeckung. 47

Tabelle 16: Aufwände der Sickerwasserbehandlung des Referenzszenarios in der Phase der endgültigen Abdeckung. 48

Tabelle 17: Transportaufwendungen für die Erhöhung der Abdeckung – 30 km. 49

Tabelle 18: Dieselverbrauch bei der Erhöhung der Schichtstärke auf 2,5 m (20.000 m^2).....50

Tabelle 19: Aufwände der Sickerwasserbehandlung des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ in der Phase der endgültigen Abdeckung. 51

Tabelle 20: Benötigte Materialien für die Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO. 53

Tabelle 21: Transportaufwendungen des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“. 53

Tabelle 22: Dieselverbrauch beim Aufbringen der „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ (20.000 m^2). 54

Tabelle 23: Treibhauspotenzial (GWP 100, in kg CO_2-Äqu., CML, Nov. 2010) der temporären Abdeckung. 60

Tabelle 24: Treibhauspotenzial (GWP 100, in kg CO_2-Äqu., CML 2001, Nov. 10) des Referenzszenarios im Zeitraum der endgültigen Abdeckung. 61

Tabelle 25: Treibhauspotenzial (GWP 100, in kg CO_2-Äqu., CML 2001, Nov. 10) des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ im Zeitraum der endgültigen Abdeckung. ..62

Tabelle 26: Treibhauspotenzial (GWP 100, in kg CO_2-Äqu., CML 2001, Nov. 10) des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ im Zeitraum der endgültigen Abdeckung. 63
Tabelle 27: Gegenüberstellung der Treibhauspotenziale (GWP 100, CML 2001, Nov. 10) der Szenarien in kg CO_2-Äqu. 64
Tabelle 28: Transportaufwendungen für die temporäre Abdeckung (analog zum Referenzszenario „Evapotranspirationsschicht – 1,5 m“) im Rahmen der Sensitivitätsanalyse. 66
Tabelle 29: Transportaufwendungen für das Szenario „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ im Rahmen der Sensitivitätsanalyse. 66
Tabelle 30: Transportaufwendungen für das Szenario „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ im Rahmen der Sensitivitätsanalyse. 66
Tabelle 31: Treibhauspotenzial (pro funktionelle Einheit; GWP 100, CML 2001, Nov. 10) der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum im Rahmen der Sensitivitätsanalyse – Transport. 67
Tabelle 32: Angenommene Gaserfassungs- und Methanoxidationsraten im Rahmen der Sensitivitätsanalyse und die daraus resultierenden Methanemissionen im Zeitraum der temporären Abdeckung. 68
Tabelle 33: Angenommene Methanoxidationsraten im Rahmen der Sensitivitätsanalyse und die daraus resultierenden Methanemissionen im Zeitraum der endgültigen Abdeckung. 68
Tabelle 34: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse - Methan (in kg CO_2-Äqu.) 68
Tabelle 35: Aufwände der Sickerwasserbehandlung der temporären Abdeckung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse. 70
Tabelle 36: Aufwände der Sickerwasserbehandlung des Referenzszenarios im Rahmen der Sensitivitätsanalyse im Zeitraum der endgültigen Abdeckung. 70
Tabelle 37: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse – Sickerwasser in kg CO_2-Äqu. pro funktionelle Einheit im gesamten Bilanzierungszeitraum. 71
Tabelle 38: Materialkosten der temporären Abdeckung (analog zum Referenzszenario) 72
Tabelle 39: Materialkosten des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“. 72
Tabelle 40: Materialkosten des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“. 73
Tabelle 41: Herstellungskosten der temporären Abdeckung. 73
Tabelle 42: Herstellungskosten des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“. 74
Tabelle 43: Herstellungskosten des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“. 74
Tabelle 44: Material- und Herstellungskosten der Abdeckungen (temporäre und endgültige Abdeckung). 75
Tabelle 45: Kosten der Sickerwasserbehandlung der Szenarien. 76
Tabelle 46: Kosten der Sickerwasser- und Konzentrattransporte der Szenarien 76
Tabelle 47: Vergleich der betrachteten Kosten der Szenarien im gesamten Bilanzierungszeitraum. 77
Tabelle 48: Kosten des Sickerwasser- und Konzentrattransports im Rahmen der Sensitivitätsanalyse. 78
Tabelle 49: Kosten der Sickerwasserbehandlung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse. 78
Tabelle 50: Kumulierte Kosten der Transporte (Sickerwasser und Konzentrat) und der Sickerwasserbehandlung. 79
Tabelle 51: Materialkosten der temporären Abdeckung im Rahmen der Sensitivitätsanalyse. 80

Tabelle 52: Materialkosten des Szenarios „Evapotranspirationsschicht – 2,5 m“ im Rahmen der Sensitivitätsanalyse. 80

Tabelle 53: Materialkosten des Szenarios „Abdeckung mit Dichtelement gemäß DVO“ im Rahmen der Sensitivitätsanalyse. 80

Tabelle 54: Vergleich der Gasprognosen nach IPCC Tier 2-Modell und nach Tabasaran und Rettenberger: 99

Tabelle 55: Vergleich der CH_4-Restemissionen der temporären Abdeckung und des Referenzszenarios sowie jener im Rahmen der Sensitivitätsanalyse. 102

Tabelle 56: Emissionsreduktionen aus Feldversuchen und Praxisanwendungen unterschiedlich ausgeführter Oberflächenabdeckschichten und Methanoxidationsschichten (HUBER-HUMER et al., 2008). 103

Tabelle 57: Diverse Methanoxidationskapazitäten untersuchter Materialien mit einigen relevanten Charakterisierungsparametern; m = Median (Mittel), Min – max = Wertespanne vom kleinsten bis größten Messwert; LPV = luftgefülltes Grob-/Mittelporenvolumen ermittelt durch Wassereinstaumethode in den Versuchssäulen. Die genaue Vorgehensweise der Untersuchungen ist im Technischen Leitfaden Methanoxidationsschichten (HUBER-HUMER et al., 2008) nachzulesen. 104

12 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung	Abkürzung	Bezeichnung
AT_4	Atmungsaktivität in 4 Tagen	kCal	Kilokalorien
°C	Grad Celsius	KDB	Kunststoffdichtungsbahn
€	Euro	kg	Kilogramm
a	Jahr	kJ	Kilojoule
Ø	Durchschnitt	km	Kilometer
AOX	adsorbierbare organisch gebundene Halogene	kWh	Kilowattstunde
GB21	Gasbildung in 21 Tagen	l	Liter
BSB5	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen	LKW	Lastkraftwagen
C	Kohlenstoff	m	Meter
$C_6H_{12}O_6$	Glucose	M-%	Masseprozent
Ca	Calzium	m^2	Quadratmeter
CH_4	Methan	m^3	Kubikmeter
cm	Zentimeter	Mg	Magnesium; auch Megagramm
CO_2	Kohlendioxid	mm	Millimeter
CO_2-Äqv.	Kohlendioxid-Äquivalente	Mn	Mangan
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf	mol	Molekül
d	Tag	MOXR	Methanoxidationsrate
EVAPOS	Evapotranspirationsschicht	mWh	Megawattstunde
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe	N2O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
Fe	Eisen	Nl	Normliter
FE	Funktionelle Einheit	NS	Niederschlag
FID	Flammen-Ionisations-Detektor	O_3	Ozon
FS	Feuchtsubstanz	pH-Wert	potentia hydrogenii (Wasserstoffionenkonzentrations-Wert)
g	Gramm	PKW	Personenkraftwage
GER	Gaserfassungsrate	ppm	part per million
GS21	Gasspendensumme in 21 Tagen	Siwa	Sickerwasser
GWP	Global Warming Potential	SO_4	Sulfat
H0	Oberer Heizwert, entspricht Brennwert	t	Tonne
H_2O	Wassermolekül	TM	Trockenmasse
ha	Hektar	TOC	Total Organic Carbon
HDPE	High Density Polyethylen	TS	Trockensubstanz
idF	in der Fassung	Zn	Zink

13 Anhang: Gasprognose und Methanoxidation

Gasprognose:

Tabelle 54: Vergleich der Gasprognosen nach IPCC Tier 2-Modell und nach Tabasaran und Rettenberger:

	Tier 2 Variante A		Tier 2 Variante B		Tier 2 Variante C		Tabasaran und Rettenberger		Arithmetisches Mittel	
Jahr	gebildetes Methan m^3/a	$kg/m^2/a$	gebildetes Methan m^3/a	$kg/m^2/a$	gebildetes Methan m^3/a	$kg/m^2/a$	gebildetes Methan m^3/a	$kg/m^2/a$	gebildetes Methan m^3/a	$kg/m^2/a$
1990	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
1991	118.067	4,24	137.461	4,93	63.080	2,26	185.751	6,66	126.090	4,52
1992	225.003	8,07	264.732	9,50	122.619	4,40	354.712	12,73	241.766	8,67
1993	321.857	11,55	382.570	13,72	178.817	6,42	508.418	18,24	347.916	12,48
1994	409.580	14,69	491.673	17,64	231.860	8,32	648.266	23,26	445.345	15,98
1995	489.034	17,54	592.688	21,26	281.927	10,11	775.521	27,82	534.792	19,19
1996	560.996	20,13	686.216	24,62	329.183	11,81	891.332	31,98	616.932	22,13
1997	626.174	22,46	772.811	27,72	373.788	13,41	996.741	35,76	692.378	24,84
1998	685.208	24,58	852.987	30,60	415.888	14,92	1.092.695	39,20	761.694	27,33
1999	738.676	26,50	927.220	33,26	455.626	16,35	1.180.054	42,33	825.394	29,61
2000	787.103	28,24	995.950	35,73	493.134	17,69	1.259.597	45,19	883.946	31,71
2001	830.964	29,81	1.059.586	38,01	528.536	18,96	1.332.034	47,79	937.780	33,64
2002	870.691	31,24	1.118.504	40,13	561.951	20,16	1.398.007	50,15	987.288	35,42
2003	906.672	32,53	1.173.056	42,08	593.491	21,29	1.458.102	52,31	1.032.830	37,05
2004	939.261	33,70	1.223.564	43,90	623.261	22,36	1.512.849	54,27	1.074.734	38,56
2005	968.778	34,75	1.270.327	45,57	651.360	23,37	1.562.732	56,06	1.113.299	39,94
2006	877.445	31,48	1.176.164	42,19	614.802	22,06	1.422.436	51,03	1.022.712	36,69
2007	794.723	28,51	1.088.980	39,07	580.295	20,82	1.294.901	46,45	939.725	33,71
2008	719.799	25,82	1.008.259	36,17	547.726	19,65	1.178.956	42,30	863.685	30,98
2009	651.939	23,39	933.522	33,49	516.985	18,55	1.073.530	38,51	793.994	28,48
2010	590.477	21,18	864.324	31,01	487.968	17,51	977.660	35,07	730.107	26,19

2011	534.809	19,19	800.256	28,71	460.581	16,52	890.467	31,95	671.528	24,09
2012	484.389	17,38	740.937	26,58	434.730	15,60	811.157	29,10	617.803	22,16
2013	438.723	15,74	686.015	24,61	410.331	14,72	739.007	26,51	568.519	20,40
2014	397.361	14,26	635.164	22,79	387.301	13,89	673.364	24,16	523.298	18,77
2015	359.900	12,91	588.082	21,10	365.563	13,11	613.633	22,01	481.795	17,28
2016	325.970	11,69	544.490	19,53	345.046	12,38	559.274	20,06	443.695	15,92
2017	295.238	10,59	504.130	18,09	325.680	11,68	509.797	18,29	408.711	14,66
2018	267.404	9,59	466.761	16,75	307.401	11,03	464.760	16,67	376.582	13,51
2019	242.195	8,69	432.162	15,50	290.148	10,41	423.757	15,20	347.065	12,45
2020	219.361	7,87	400.128	14,35	273.863	9,82	386.422	13,86	319.944	11,48
2021	198.681	7,13	370.468	13,29	258.492	9,27	352.424	12,64	295.016	10,58
2022	179.950	6,46	343.007	12,31	243.984	8,75	321.460	11,53	272.100	9,76
2023	162.985	5,85	317.582	11,39	230.290	8,26	293.255	10,52	251.028	9,01
2024	147.619	5,30	294.041	10,55	217.365	7,80	267.559	9,60	231.646	8,31
2025	133.702	4,80	272.245	9,77	205.165	7,36	244.150	8,76	213.816	7,67
2026	121.097	4,34	252.065	9,04	193.650	6,95	222.815	7,99	197.407	7,08
2027	109.681	3,93	233.380	8,37	182.782	6,56	203.373	7,30	182.304	6,54
2028	99.340	3,56	216.081	7,75	172.523	6,19	185.651	6,66	168.399	6,04
2029	89.975	3,23	200.064	7,18	162.840	5,84	169.497	6,08	155.594	5,58
2030	81.492	2,92	185.234	6,65	153.700	5,51	154.768	5,55	143.799	5,16
2031	73.810	2,65	171.504	6,15	145.074	5,20	141.338	5,07	132.931	4,77
2032	66.851	2,40	158.791	5,70	136.932	4,91	129.089	4,63	122.916	4,41
2033	60.549	2,17	147.020	5,27	129.246	4,64	117.918	4,23	113.683	4,08
2034	54.840	1,97	136.123	4,88	121.992	4,38	107.728	3,86	105.171	3,77
2035	49.670	1,78	126.032	4,52	115.145	4,13	98.430	3,53	97.319	3,49
2036	44.987	1,61	116.690	4,19	108.683	3,90	89.947	3,23	90.077	3,23
2037	40.746	1,46	108.041	3,88	102.583	3,68	82.205	2,95	83.394	2,99
2038	36.905	1,32	100.032	3,59	96.825	3,47	75.140	2,70	77.225	2,77
2039	33.426	1,20	92.617	3,32	91.391	3,28	68.690	2,46	71.531	2,57
2040	30.274	1,09	85.752	3,08	86.261	3,09	62.802	2,25	66.272	2,38

2041	27.420	0,98	79.395	2,85	81.420	2,92	57.426	2,06	61.415	2,20
2042	24.835	0,89	73.510	2,64	76.850	2,76	52.517	1,88	56.928	2,04
2043	22.494	0,81	68.061	2,44	72.537	2,60	48.033	1,72	52.781	1,89
2044	20.373	0,73	63.016	2,26	68.466	2,46	43.938	1,58	48.948	1,76
2045	18.452	0,66	58.345	2,09	64.623	2,32	40.196	1,44	45.404	1,63
2046	16.713	0,60	54.020	1,94	60.996	2,19	36.778	1,32	42.127	1,51
2047	15.137	0,54	50.016	1,79	57.573	2,07	33.655	1,21	39.095	1,40
2048	13.710	0,49	46.309	1,66	54.341	1,95	30.800	1,10	36.290	1,30
2049	12.418	0,45	42.876	1,54	51.291	1,84	28.192	1,01	33.694	1,21
2050	11.247	0,40	39.698	1,42	48.413	1,74	25.807	0,93	31.291	1,12
2051	10.187	0,37	36.755	1,32	45.695	1,64	23.626	0,85	29.066	1,04
2052	9.226	0,33	34.031	1,22	43.131	1,55	21.633	0,78	27.005	0,97
2053	8.356	0,30	31.508	1,13	40.710	1,46	19.810	0,71	25.096	0,90
2054	7.569	0,27	29.173	1,05	38.425	1,38	18.142	0,65	23.327	0,84
Summe	18.712.514		27.452.200		16.212.336		31.044.725		23.355.444	

bei Normbedingungen (Standarddruck von 1.013,25 hPa; Standardtemperatur von 273,15 K) beträgt die Dichte von CH_4 0,7175 g/l. Quelle: Messer (2013).

Tabelle 55: Vergleich der CH_4-Restemissionen der temporären Abdeckung und des Referenzszenarios sowie jener im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.

Gasprognose			Restemissionen (jeweils in kg $CH_4/m^2/a$)				
			temporäre Abdeckung und Referenzszenario - Basisszenario	SA-CH_4-1	SA-CH_4-2	SA-CH_4-3	SA-CH_4-4
Jahr	gebildetes Methan m^3/a	$kg/m^2/a$	50 % GE 90 % MOX	20 % GE 75 % MOX	30 % GE 65 % MOX	40 % GE 50 % MOX	keine GE 30 % MOX
2004	1.074.734	38,56	1,93	7,71	9,45	11,57	26,99
2005	1.113.299	39,94	2,00	7,99	9,79	11,98	27,96
2006	1.022.712	36,69	1,83	7,34	8,99	11,01	25,68
2007	939.725	33,71	1,69	6,74	8,26	10,11	23,60
2008	863.685	30,98	1,55	6,20	7,59	9,30	21,69
2009	793.994	28,48	1,42	5,70	6,98	8,55	19,94
*2010	730.107	26,19	1,31	5,24	6,42	7,86	18,33
2011	671.528	24,09	2,41	6,02	8,43	12,05	16,86
2012	617.803	22,16	2,22	5,54	7,76	11,08	15,51
2013	568.519	20,40	2,04	5,10	7,14	10,20	14,28
2014	523.298	18,77	1,88	4,69	6,57	9,39	13,14
2015	481.795	17,28	1,73	4,32	6,05	8,64	12,10
2016	443.695	15,92	1,59	3,98	5,57	7,96	11,14
2017	408.711	14,66	1,47	3,67	5,13	7,33	10,26
2018	376.582	13,51	1,35	3,38	4,73	6,75	9,46
2019	347.065	12,45	1,25	3,11	4,36	6,23	8,72
2020	319.944	11,48	1,15	2,87	4,02	5,74	8,03
2021	295.016	10,58	1,06	2,65	3,70	5,29	7,41
2022	272.100	9,76	0,98	2,44	3,42	4,88	6,83
2023	251.028	9,01	0,90	2,25	3,15	4,50	6,30
2024	231.646	8,31	0,83	2,08	2,91	4,16	5,82
Summe temp. Abdeckung	**12.346.986**	**443**	**33**	**99**	**130**	**175**	**310**
2025	213.816	7,67	0,77	1,92	2,68	3,84	5,37
2026	197.407	7,08	0,71	1,77	2,48	3,54	4,96
2027	182.304	6,54	0,65	1,64	2,29	3,27	4,58
2028	168.399	6,04	0,60	1,51	2,11	3,02	4,23
2029	155.594	5,58	0,56	1,40	1,95	2,79	3,91
2030	143.799	5,16	0,52	1,29	1,81	2,58	3,61
2031	132.931	4,77	0,48	1,19	1,67	2,38	3,34
2032	122.916	4,41	0,44	1,10	1,54	2,20	3,09
2033	113.683	4,08	0,41	1,02	1,43	2,04	2,85
2034	105.171	3,77	0,38	0,94	1,32	1,89	2,64
2035	97.319	3,49	0,35	0,87	1,22	1,75	2,44

2036	90.077	3,23	0,32	0,81	1,13	1,62	2,26
2037	83.394	2,99	0,30	0,75	1,05	1,50	2,09
2038	77.225	2,77	0,28	0,69	0,97	1,39	1,94
2039	71.531	2,57	0,26	0,64	0,90	1,28	1,80
2040	66.272	2,38	0,24	0,59	0,83	1,19	1,66
2041	61.415	2,20	0,22	0,55	0,77	1,10	1,54
2042	56.928	2,04	0,20	0,51	0,71	1,02	1,43
2043	52.781	1,89	0,19	0,47	0,66	0,95	1,33
2044	48.948	1,76	0,18	0,44	0,61	0,88	1,23
2045	45.404	1,63	0,16	0,41	0,57	0,81	1,14
2046	42.127	1,51	0,15	0,38	0,53	0,76	1,06
2047	39.095	1,40	0,14	0,35	0,49	0,70	0,98
2048	36.290	1,30	0,13	0,33	0,46	0,65	0,91
2049	33.694	1,21	0,12	0,30	0,42	0,60	0,85
2050	31.291	1,12	0,11	0,28	0,39	0,56	0,79
2051	29.066	1,04	0,10	0,26	0,36	0,52	0,73
2052	27.005	0,97	0,10	0,24	0,34	0,48	0,68
2053	25.096	0,90	0,09	0,23	0,32	0,45	0,63
2054	23.327	0,84	0,08	0,21	0,29	0,42	0,59
Summe	**27.268.278**	**535**	**836.043**	**122**	**163**	**221**	**375**

* Ende der aktiven Entgasung
GE: Gaserfassungsrate
MOX: Methanoxidationsrate

Tabelle 56: Emissionsreduktionen aus Feldversuchen und Praxisanwendungen unterschiedlich ausgeführter Oberflächenabdeckschichten und Methanoxidationsschichten (HUBER-HUMER et al., 2008).

Aufbau der „Methanoxidationsschicht“	Referenzfläche bzw. Daten	Quelle	CH_4-Rest-emission (l/m²d)	Emissions-reduktion (%)
0,9 m KS-Kompost 0,3 m Schotter	Referenz = selbe Deponie ohne Oberflächenabdeckung (aktive Entgasung)	Huber-Humer, 2004	0,145	>99
0,9 m Müll-Kompost 0,3 m Schotter			0,84	98
0,4 m KS-Kompost			17,6	68
0,3 m KS-Kompost 0,3 m lehmiges Material			14,6	74
1,2 m Kompost/Sand-Mix 0,3 m Sand	Errech. Gasproduktion der Deponie nach Tabasaran/ Rettenberger	Görtler, 2000; NUA, 2002	0 - 9,7	ca. 75
0,4 m Kompost/Sand-Mix 0,8 m KS/Müllkompost			0 - 60	ca. 65 (7 – 100 %)
1,2 m KS/Müllkompost 0,5 m Schotter			0,4	> 96
1,0 m Grünabfallkompost 0,15 m geschredderte Altreifen 0,15 m lehmiges Material	Methanoxidationsrate bestimmt mit Isotopenmethode im Feld (bei messbaren Emissionsströmen)	Barlaz et al., 2004 „Kentucky-biocover study“	0,08 – 0,59	55% = mittlere Methanoxidationsrate
1,0 m lehmiges Material			1,7 – 600 (Risse!)	21% = mittlere Methanoxidationsrate
0,4 – 0,5 m Grünabfallkompost 0,1 m Glasscherben	Referenzfläche = selbe Deponie mit Abdeckung aus sandigem Lehm	Bogner et al., 2005 „Florida-biocover study“	0,56	ca. 90
0,4 – 1,1 m sandiger Lehm (=Referenzfläche)	---		5,6	---

Tabelle 57: Diverse Methanoxidationskapazitäten untersuchter Materialien mit einigen relevanten Charakterisierungsparametern; m = Median (Mittel), Min – max = Wertespanne vom kleinsten bis größten Messwert; LPV = luftgefülltes Grob-/Mittelporenvolumen ermittelt durch Wassereinstaumethode in den Versuchssäulen. Die genaue Vorgehensweise der Untersuchungen ist im Technischen Leitfaden Methanoxidationsschichten (HUBER-HUMER et al., 2008) nachzulesen.

Material	Zusatz-Info	TOC	NH_4	AT_7	LPV	Versuchs-dauer	Adaptions-zeit	CH_4 – Zufuhr	Oxidation (%)	
		% TM	ppm	mgO_2/gTM	vol%	Tage	Tage	l/m²d	min-max	m
Müllkompost 1	--	16,8	5	--	31	22	4	230	55 - 100	95
Müllkompost 2	Frischer Kompost	14	80	9,8	27	187	Nicht erreicht	250	13 - 100	53
Müllkompost 3	Reifkompost	12,2	38	4,5	26	187	12	250	43 - 100	100
Müllkompost 4	Gute Struktur	14,8	7	6,8	32	84	5	300	62 - 100	98
Müllkompost 5	--	16,3	105	7,1	29	56	6	250	62– 100	100
KS-Kompost 1	--	12,9	56	6,9	29	45	10	250	50 - 100	100
KS-Kompost 2	Reifkompost	13,7	8	2,7	29	53	5	250	87 - 100	100
KS-Kompost 3	Hoher NH_4^+-gehalt, NO_2!	16,4	1200	6,2	40	35	Nicht erreicht	130	5 - 71	35
KS-Kompost 4	Hohe CH_4-Zufuhr	13,3	4	1,9	34	84	20	300	54 - 96	85
KS-Kompost 5	Gute Struktur	14,1	1	1,1	47	32	10	250	27 - 100	100
Boden 1	Sehr feinkörnig	3,3	7	0,2	12	51	10	250	35 - 47	42
Boden 2	Gartenerde hohe CH4-Zufuhr	2,6	1	0,2	27	84	15	300	51 - 100	97
Boden 3	Mineralische Deponie-abdeckung	0,9	1,1	0,3	35	36	16	60	0 -35	19
MIX 1	70% KSK1 + 30% Sand	7,7	3	4,8	26	55	32	250	50 - 100	85
MIX 2	70% KSK2 + 30% Sand	7,8	4	1,9	29	53	Nicht erreicht	250	35 - 100	75
MIX 3	60% KSK3 + 40% Boden2	10,2	451	2,5	38	35	Nicht erreicht	130	0 - 58	37
MIX 4	60% KSK4 + 40% Boden2	7,0	2	0,8	31	72	9	300	51 - 100	83
MIX 6	70%Müllkompost5 + 30% Sand	8,1	50	3,0	25	56	4	250	51 - 100	100
MBA-Material	Aerob stabilisiert, <20 mm	17,3	218	15,9	19	72	17	280	60 - 80	71
Altlasten-material 1	ca. 15 Jahre alter Müll, <20 mm abgesiebt	3,0	84	2,4	21	59	15	250	15 - 70	45
Altlasten-material 2	Altlastenmaterial 1 +30% Struktur-material	7,7	108	11,4	31	59	15	250	20 - 80	60