

Aerobisierung von Siedlungsabfalldeponien



Expertise



carbotech
Umweltprophete und Beratung

Auftraggeber

BAFU Bundesamt für Umwelt
Worbentalstrasse 68
3063 Ittigen

Fachgebiet Aerobisierung

IFAS Ingenieurbüro für
Abfallwirtschaft
Prof. R. Stegmann und Partner
Schellerdamm 19 – 21
D-21079 Hamburg

Fachgebiet Ökobilanz/LCA

Carbotech AG
Gasometerstrasse 9
8005 Zürich

Datum

12.10.2022

Sachbearbeiter/-in

Rafael Schuler – SC+P AG
Enrico Cassina – SC+P AG
Kai-Uwe Heyer – IFAS
Marco Ritzkowski – HiCCE
Thomas Kägi – Carbotech

Projektnummer

BE 692A

Olten

Wollerau

Zürich

Bern Fliederweg 10
CH-3007 Bern
031 382 35 35
scpbern@scpag.ch
www.scpag.ch


Disclaimer:

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich

Impressum:

Filename / Version	Verfasser	Koreferat	Versand an	Datum
BE692A_ExpertiseAerobisierung_v4.4	Rs, Ca - 25.10.21	Mr, Hku - 26.10.21	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	27.10.2021
BE692A_ExpertiseAerobisierung_v5.6	Rs, Ca - 15.02.22	Mr, Hku - 22.02.22	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	03.03.2022
BE692A_ExpertiseAerobisierung_v5.9	Rs - 28.03.22	Tk - 28.03.22	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	28.03.2022
BE692A_ExpertiseAerobisierung_v7.5	Rs – 08.06.22	Ca – 13.06.22 Mr, Hku – 20.06.22	1, 2, 3, 4, 5, 6,7	27.06.2022
BE692A_ExpertiseAerobisierung_v9.2	Ca – 09.10.22	Rs, 1, 2, 3	1, 2, 3, 4, 5, " 6, 7	12.10.2022

Name	Firma	Empfänger
Herr Marco Ritzkowski (Mr)	HiiCCE, Hamburg	1
Herr Kai Uwe Heyer (Hku)	IFAS, Hamburg	2
Herr Thomas Kägi (Tk)	Carbotech	3
Herr Reto Tietz	BAFU, Stv. Sektion Altlasten	4
Frau Christiane Wermeille	BAFU, Chefin Sektion Altlasten	5
Herr Andre Laube	BAFU, Deponien, Abfallplanung,	6
Herr Peter Gerber	BAFU, Konsum und Produkte	7
Vertreter Kantone	Kt. ZH, BE, FR, TG	8

Inhalt

1. Ausgangslage	11
2. Zielsetzung der Expertise / Auftrag	12
3. Aerobisierung zur Sanierung von Deponien Möglichkeiten und Grenzen	13
3.1. Zielsetzung von Aerobisierungsmassnahmen	13
3.2. Emissionsverhalten von Siedlungsabfalldeponien	13
3.3. Planungsablauf für Aerobisierungsmassnahmen	15
3.4. Wirkung von Befeuchtungsmassnahmen auf den Aerobisierungsprozess	21
3.5. Angewandte Aerobisierungstechniken	23
3.6. Nachweiskriterien zu Sanierungszielen	28
3.7. Verminderung der Emissionen aus dem Sickerwasserhaushalt	33
4. Sanierungsvarianten für vier Szenarien von Siedlungsabfalldeponien	40
4.1. Definition der zu untersuchenden Sanierungsvarianten	40
4.2. Definition der Beurteilungskriterien	40
4.3. Modellannahmen für die Deponie	41
4.4. Zusammenstellung der Sanierungsvarianten und Szenarien	45
5. Langfristige Wirkung der Massnahmen	46
5.1. Verminderung der Emissionen von CO ₂ -eq aus dem Gashaushalt	46
6. Kostenschätzungen zu den Sanierungsvarianten und Szenarien	53
6.1. Resultate Kostenschätzung	53
6.2. Hinweise und Interpretation	54
6.3. Sensitivitätsüberlegungen Kostenschätzung	54
7. Auswirkungen auf die Umwelt	55
7.1. Vorgehen	55
7.2. Zielsetzung und Rahmenbedingungen	56
7.3. Projektspezifische Rahmenbedingungen	58
7.4. Resultate Umweltauswirkungen	59
7.5. Fazit aus Umweltsicht	65
7.6. Grenzen der Ökobilanz	65
7.7. Berechnung der Emissionsverminderung infolge der Sanierungsvarianten 3 und 4	66
8. Schlussfolgerungen	69
8.1. Gegenüberstellung der Resultate	69
8.2. Diskussion der Ergebnisse	70
8.3. Vorschlag zum Vorgehen bei der Planung von Aerobisierungsmassnahmen	73



Anhang

- A1 Übersicht Varianten und Szenarien
- A2 Gasprognose nach IPCC und CO₂-Emissionen
- A3 Erläuterung der Kostenberechnungen und Kostenberechnungen der Sanierungsvarianten
- A4 Grundlagen CO₂ Bilanz



Zusammenfassung

In der Schweiz gibt es knapp 15'000 alte Ablagerungsstandorte, wovon etwas weniger als die Hälfte Siedlungsabfalldeponien sind. Zwar wurde die Ablagerung von unbehandelten Siedlungsabfällen und organischen Abfällen in der Schweiz ab dem Jahr 2000 verboten, aus den Altablagerungen müssen jedoch noch über bedeutende Zeiträume umweltgefährdende Emissionen erwartet werden.

Als Sanierungsmassnahme steht, insbesondere bei den grossen Deponien, welche in den 70er und 80er Jahren entstanden sind, eine Totaldekontamination des Standorts meist aus Gründen unverhältnismässiger Kosten nicht im Vordergrund. Seit einigen Jahren wurden im In- und Ausland vermehrt mit in situ Aerobisierungs- und Bewässerungsmassnahmen das Abbauverhalten im Deponiekörper von Siedlungsabfalldeponien unter kontrollierten Bedingungen intensiviert, um dadurch eine beschleunigte Überführung in einen emissionsarmen, umweltverträglichen Zustand zu erreichen.

Für die vorliegende, im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) verfasste Expertise wurden folgende allgemeine Ziele formuliert:

1. Darstellung der Möglichkeiten und Grenzen der Aerobisierung zur Sanierung ehemaliger Hausmülldeponien: verfügbare Techniken, Funktionsprinzipien, Sanierungsdauer, Energieverbrauch.
2. Schaffung von Entscheidungsgrundlagen, um bei künftigen Variantenstudien für alte Siedlungsabfalldeponien unter Berücksichtigung der Standortgegebenheiten und der Umweltauswirkungen geeignete Verfahren wählen zu können.
3. Darstellung von Kosten und Wirtschaftlichkeit.

Möglichkeiten und Grenzen von Aerobisierungsmassnahmen

Einleitend werden vorerst Ziel und Wirkung von Aerobisierungsmassnahmen in Deponien und Altablagerungen (Kapitel 3.1) sowie die im Deponiekörper unter anaeroben Bedingungen ablaufenden Umwandlungsprozesse und Emissionen von Deponiesickwasser und Deponiegasen (Kapitel 3.2) beschrieben.

Planungsablauf

Die Planung von Aerobisierungsmassnahmen (Kapitel 3.3) setzt detaillierte Kenntnisse der technischen Aspekte der Deponie und des Betriebszustandes wie auch des aktuellen Emissionsverhaltens voraus. In den meisten Fällen sind dazu ergänzende Untersuchungen erforderlich. Der Planungsablauf umfasst folgende Bearbeitungsschritte (Kapitel 3.3.1 bis 3.3.5):

1. Bestandsaufnahme.
2. Ermittlung des noch vorhandenen Emissionspotenzials mit ergänzenden Untersuchungen (Erkundungsbohrungen mit Abfallfeststoffuntersuchungen, Absaug- und Belüftungsversuche).
3. Planung geeigneter Massnahmen zur beschleunigten und kontrollierten Reduzierung des Restemissionspotenzials (Aerobe in situ Stabilisierung, ggf. ergänzend Befeuchtungsmaßnahmen), Angaben zu Technik und Betriebsführung.
4. Überwachungsprogramm zur Optimierung und zum Nachweis der erfolgreichen Durchführung der Massnahme(n).

*Alte Siedlungs-
abfalldeponien*



*Aerobisie-
rungsmassnah-
men zur be-
schleunigten
Sanierung*



*Ziele der Ex-
pertise*

*Möglichkeiten
und Grenzen
von Aerobisie-
rungen*

Planungsablauf

Opportunitätsgrenzen für sinnvolle Einsatzbereiche

Als massgebender Kennwert zur Eruierung des Gesamtpotenzials an Kohlenstoff, welches noch hauptsächlich über den Gaspfad aus dem Deponiekörper emittieren kann, gilt der biologisch abbaubare Kohlenstoffanteil (C_{bio}). Der bioverfügbare Kohlenstoff (C_{bio}) multipliziert mit der abgelagerten Trockenmasse an Siedlungsabfällen ergibt das Gesamtpotential.

Der Einsatz und die voraussichtliche Wirkung von technischen und betrieblichen Massnahmen zum beschleunigten Abbau des bioverfügbaren Kohlenstoffs (C_{bio}) in der Deponie hängen stark vom aktuellen C_{bio} -Gehalt in der Deponie ab. Aufgrund von zahlreichen Untersuchungen an Altdeponien und Deponiebelüftungsmassnahmen können, im Sinne von Opportunitätsgrenzen für sinnvolle Einsatzbereiche technischer Massnahmen, folgende Werte herangezogen werden (siehe Kapitel 3.3.3):

- bei bioverfügbaren Kohlenstoffgehalten $> 12 \text{ kg } C_{bio}/\text{t TM}$ aktive Gaserfassung (Gasabsaugung via Gasbrunnen) und Gasverwertung,
- bei bioverfügbaren Kohlenstoffgehalten von $6 - 12 \text{ kg } C_{bio}/\text{t TM}$ übergangsweise noch eine herkömmliche Deponiegasabsaugung und Gasbehandlung, oder in vielen Fällen direkt mit der Deponiebelüftung beginnen,
- bei bioverfügbaren Kohlenstoffgehalten von $2.5 - 6 \text{ kg } C_{bio}/\text{t TM}$ beurteilen ob und eine Deponiebelüftung noch zielführend ist oder ob bereits passive Gasbehandlungsverfahren ins Auge gefasst werden können.
- bei bioverfügbaren Kohlenstoffgehalten von $< 2.5 \text{ kg } C_{bio}/\text{t TM}$ ist zu prüfen, ob die Deponiebelüftung technisch und wirtschaftlich noch möglich und zumutbar ist.

Aerobisierungskonzepte

Der Stand der Technik von Aerobisierungskonzepten sind in nachfolgender Tabelle 1-1 erläutert.

Tabelle 1-1 – Zusammenstellung unterschiedlicher Konzepte zur Deponiebelüftung, wesentliche Anwendungsgebiete und zugehörige Abluftreinigungsmethoden.

Konzept	Umsetzung	Hauptanwendungsgebiet	Abluftreinigungstechnik
Hochdruckbelüftung	Impulsverfahren	Vorbereitung auf Deponierückbau	Biofilter
Niederdruckbelüftung	Aktive Belüftung und Ablufferfassung	Beschleunigte biologische Stabilisierung und Vermeidung von THG-Emissionen	RTO, Schwachgasfackel, Biofilter nach fortgeschrittener Stabilisierung
	Aktive Belüftung ohne Ablufferfassung	Beschleunigte biologische Stabilisierung	Oberflächenabdeckung als Flächenbiofilter
Übersaugung	Erhöhte Absaugraten (passive Belüftung)	Erhöhung der Methanfracht, allmähliche Aerobisierung	Biofilter oder i.d.R. Schwachgasfackel / RTO

In der Tabelle 3-3 (Kapitel 3.5.3, Seite 27) werden zudem die Vor- und Nachteile der verschiedenen Aerobisierungsverfahren zusammengefasst.

Opportunitätsgrenzen technischer Massnahmen



Aerobisierungskonzepte

Erfolgsnachweise

Der Nachweis einer erfolgreichen Aerobisierung kann sich einerseits auf die Bewertung der Abnahme der Gasemissionen beziehen. Ein eindeutigeres und klareres Kriterium ist jedoch eine Kohlenstoffbilanzierung (Kapitel 3.3.6).

Zur Sickerwasserbeschaffenheit gibt es bis heute leider keine allgemeingültigen quantitativen Erfolgskriterien infolge von Aerobisierungsmassnahmen (vgl. Erläuterungen in Kapitel 3.7).

Bedeutung des Wassergehaltes in der Deponie

Während der minimal erforderliche Wassergehalt vom Wasserbedarf der Mikroorganismen abhängt, wird bei aeroben Prozessen der maximal zu tolerierende Wassergehalt vor allem von der Konkurrenz zwischen Sauerstoff und Wasser in den Poren bestimmt. Bei Wassergehalten organisch belasteter Abfälle unter ca. 20 % Feuchtmasse (FM) findet keine mikrobielle Aktivität mehr statt. Während die mikrobielle Aktivität unter anaeroben Bedingungen im Deponiekörper durch sehr hohe Wassergehalte nicht negativ beeinflusst wird, werden aerobe Stoffwechselaktivitäten bei Wassergehalten über 40 % FM zunehmend limitiert und kommen bei Werten über 70 % FM vollständig zum Erliegen. Die Bedeutung des Wassergehaltes für die biochemischen Umsetzungsprozesse in Deponien ist im Detail in Kapitel 3.4 thematisiert.

Sanierungsziele und Nachweiskriterien

Aus dem Monitoring der Aerobisierung können zum Gashaushalt der Kohlenstoffaustrag und die aktuellen Restgasemissionen abgeleitet werden.

Da weder die Altlasten-Verordnung (AltIV [12]) noch die VVEA [11] quantitative Vorgaben zu tolerierbaren Restgasemissionen machen, wird für das Sanierungsziel Gas und damit als Kriterium zur Einstellung der Deponiebelüftung vorgeschlagen, dass die Deponiegasproduktion einer Deponie einen Wert von $\leq 10 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$ für den gesamten Standort bzw. $\leq 2 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/(\text{h} * \text{ha})$ einzuhalten ist. Die geltenden gesetzlichen Vorgaben und die Begründung des vorgeschlagenen Nachweiskriteriums sind im Kapitel 3.6 erläutert

Weitgehend abgebaute organische Bestandteile in den Abfällen führen bei einer sehr intensiven Belüftung allmählich auch zu einer geringeren Belastung im Deponiesickerwasser. Vor dem Erreichen dieses Zustandes ist jedoch aufgrund der intensivierten Umsetzung bzw. Stoffmobilisierung in den Wasserpfad mit z.T. höheren Konzentrationen im Sickerwasser zu rechnen (vgl. Kapitel 3.7).

Vor diesem Hintergrund können Deponiesimulationsversuche wichtige Hinweise auf die langfristig erreichbare Qualität des Deponiesickerwassers liefern. Die Ergebnisse sind aufgrund der im Labor, gegenüber In-Situ-Bedingungen, üblicherweise ca. 10 – 25-fach höheren Belüftungsraten jedoch nur bedingt aussagekräftig. Der Vergleich mit Überwachungsdaten von realen, belüfteten Deponien deutet darauf hin, dass die Zeiträume bis zum Erreichen einer ausreichenden Sickerwasserqualität bei den in Deponien möglichen Belüftungsraten voraussichtlich viele Jahre betragen können.

Definition von Szenarien und Sanierungsvarianten

Wie eingangs erwähnt, geht es bei der vorliegenden Expertise um die Beurteilung und den Vergleich der Effektivität gemäss AltIV [12] von verschiedenen Sanierungsvarianten von Altdeponien. Ausgehend von einer klassischen Siedlungsabfalldeponie der 80er-Jahre, mit einem Deponievolumen von $500'000 \text{ m}^3$ und unterschiedlichen Szenarien zum abbaubarem organischem Kohlenstoff wurden verschiedene Sanierungsvarianten untersucht (Kapitel 4).

Erfolgsnachweise zum Gashaushalt

Erfolgsnachweise zum Sickerwasser

Bedeutung des Wassergehaltes

Sanierungsziele und Nachweiskriterien zum Gashaushalt

Wirkung von Aerobisierungen auf das Sickerwasser

Laborversuche

Definition von Szenarien und Sanierungsvarianten



- Als Szenarien sind 3 Modelldeponien mit unterschiedlichen bioverfügbaren Kohlenstoffgehalten definiert.
- Untersucht werden für jedes Szenario vier verschiedene Sanierungsvarianten:
 1. Status Quo belassen,
 2. Totaldekontamination,
 3. Aerobisierung,
 4. konventionelle Gaserfassung und Abfackelung.

Übersicht Variantenuntersuchungen



carbotech

Umwelttechnik und Beratung

Beurteilungskriterien

Im Sinne der AltIV Art. 18 werden die vorgeschlagenen Sanierungsvarianten nach den folgenden Kriterien beurteilt (siehe Kapitel 4.2):

- Die Auswirkungen der Massnahmen auf die Umwelt (siehe Kapitel 7)
- Die langfristige Wirksamkeit der Massnahmen (siehe Kapitel 5)
- Gefährdung der Umwelt durch den belasteten Standort vor und nach der Sanierung (Gashaushalt: Kapitel 5.1)
- Beurteilung der Kontrollierbarkeit der Massnahmen, die Möglichkeit zur Mängelbehebung sowie die finanziellen Auswirkungen auf die Deponienach-
sorge (Unterhalt und Überwachung nach Abschluss der Massnahmen (technische Überwachung: Kapitel 3.3.5, Kosten: Kapitel 6)

Beurteilung der Sanierungsvarianten nach AltIV Art. 18

Ausgangslage für die Prüfung von Aerobisierungsmassnahmen dürfte in den meisten Fällen die Tatsache sein, dass es sich um eine alte Siedlungsabfalldeponie handelt und Erkenntnisse aus der Altlastenuntersuchung bezüglich dem Sickerwasser- oder Gashaushalt einen Sanierungsbedarf signalisieren.

Langfristige Wirkung der Sanierungsmassnahmen

Ausgehend von der mit dem IPCC-Modell ermittelten jährlich produzierten Deponiegasmenge ($t \text{ CH}_4 + t \text{ CO}_2$)/a (siehe Anhang A2), wurden für die Modelldeponien und – Varianten die jährlichen Total-Emissionen von $\text{CO}_2\text{-eq/a}$ berechnet (Kapitel 5).

Langfristige Wirkung der Sanierungsmassnahmen

Für die bei den Sanierungsvarianten eingesetzten technischen Massnahmen wurden deren Wirkungsgrade berücksichtigt (siehe Kapitel 5.1):

- Erfassungsgrad Deponiegas
- Abfackelungseffizienz
- Methanoxidation
- Global warming Potential von CH_4 -Emissionen = 28

Technische Wirkungsgrade

Entsprechende grafische Darstellungen veranschaulichen für alle Sanierungsvarianten bei allen Szenarien die Wirkung der Massnahmen bezüglich der Abnahme des abbaubaren organischen Kohlenstoffs (C_{bio}) und die Wirkung auf die Abnahme der Emissionen von $\text{CO}_2\text{-eq}$ (siehe Kapitel 5.1.1. bis 5.1.3). Die Resultate wurden bezüglich des jeweiligen Zeitpunktes des Erreichens des vorgegebenen Sanierungsziels ausgewertet und pro Szenario mit den Emissionswerten der Sanierungsvarianten verglichen.

Grafische Darstellung und Gegenüberstellung der Resultate

Kostenschätzungen

Für alle untersuchten Sanierungsvarianten und Szenarien wurden die Kosten für Planung, Bau und Betrieb sowie Nachsorge abgeschätzt (siehe Kapitel 6 und Anhang A3). Klar als teuerste Variante resultierte die Totaldekontamination mit ca. CHF 108.6 Mio. Die Sanierungsvarianten 3 (Aerobisierung) und 4 (herkömmliche Gaserfassung) mit geschätzt ca. CHF 7.0 bzw. 9.0 Mio. kommen etwa doppelt so teuer zu stehen wie der herkömmliche Deponieunterhalt im Status Quo (Variante 1). Die Aerobisierung ist etwas kostengünstiger als eine herkömmliche

Grobe Kostenschätzungen

Gaserfassung, da bei der herkömmlichen Gaserfassung aufgrund der langen Betriebsdauer auch umfangreiche Erneuerungskosten zu berücksichtigen sind.

Der Vergleich mit aktuellen Kosten für CO₂-Zertifikate zeigt, dass die Kosten pro Tonne CO_{2-eq} bei der Aerobisierung von Deponien mit einem C_{bio} > 6 kg/t TM durchaus im Rahmen gängiger Preise für CO₂-Zertifikate liegen. Für die aktive Entgasung ohne Aerobisierung muss der Anteil C_{bio} in der Deponie mindestens ca. 10 kg/t TM betragen, um aktuell in einem vergleichbaren Kostenrahmen zu CO₂-Zertifikaten zu bleiben (siehe Kosteneffizienz Kapitel 8.2.3).

Auswirkungen auf die Umwelt

Im Rahmen dieses Projekts wurden die Umweltauswirkungen der verschiedenen Sanierungsvarianten und -Szenarien mit der Methode der Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) modelliert (siehe Kapitel 7 und Erläuterungen zum Vorgehen Kapitel 7.1).

Das Vorgehen richtete sich im Wesentlichen nach der Norm ISO 14'040/44¹ und umfasst die folgenden Schritte: (siehe auch Abbildung 7-2).

1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens (Rahmenbedingungen)
2. Erfassen der relevanten Stoff- und Energieströme sowie des Ressourcenbedarfs (Sachbilanz oder Inventar)
3. Bestimmen der Auswirkungen auf die Umwelt (Wirkungsabschätzung)
4. Interpretation der Umweltauswirkungen aufgrund der Zielsetzungen (Auswertung)

Zur Bewertung der Vielzahl von Umweltauswirkungen aus den Sanierungsmaßnahmen wurde die Methode der ökologischen Knappheit MöK (UBP 2021) verwendet. Die nachstehende Abbildung 1-1 zeigt die Umweltbelastungen nach MöK, welche bei 3 Szenarien bei den 4 Sanierungsvarianten entstehen.

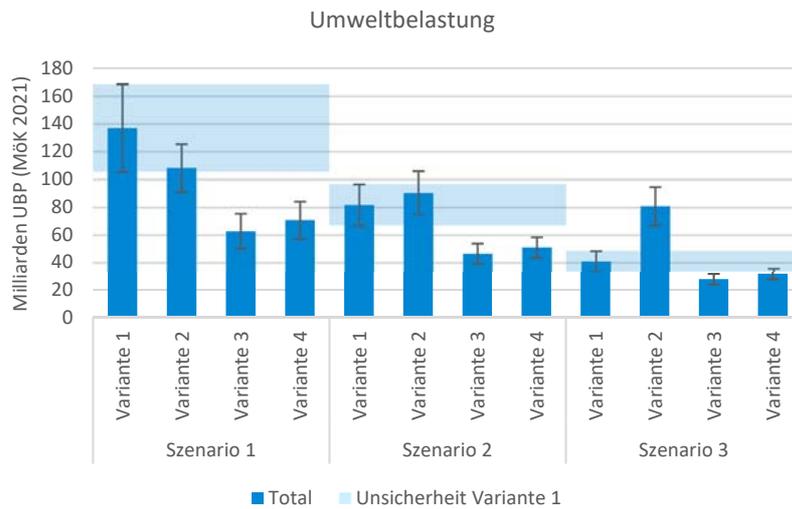


Abbildung 1-1 - Umweltbelastung der untersuchten Szenarien und Varianten nach der Methode der ökologischen Knappheit (MöK) 2021

Zusätzlich zur Ökobilanz wurde eine Klimabilanz nach IPCC (2021) der klimarelevanten Emissionen erstellt. Diese werden anhand ihres Treibhausgaspotentials

Vergleich mit Kosten von CO₂-Zertifikaten



Ökobilanz für die untersuchten Varianten

Methode der ökologischen Knappheit MöK

Klimabilanz nach IPCC 2021

¹ ISO 14040. (2006). Environmental management–Life cycle assessment–Requirements and guidelines. Geneva. ISO 14044. (2006). Environmental management–Life cycle assessment–Principles and framework. Geneva.

in CO₂-Äquivalente umgerechnet. Diese Methode ist der Standard für Klimabilanzen (siehe Kapitel 7.4.3 und nachstehende Abbildung 1-2)

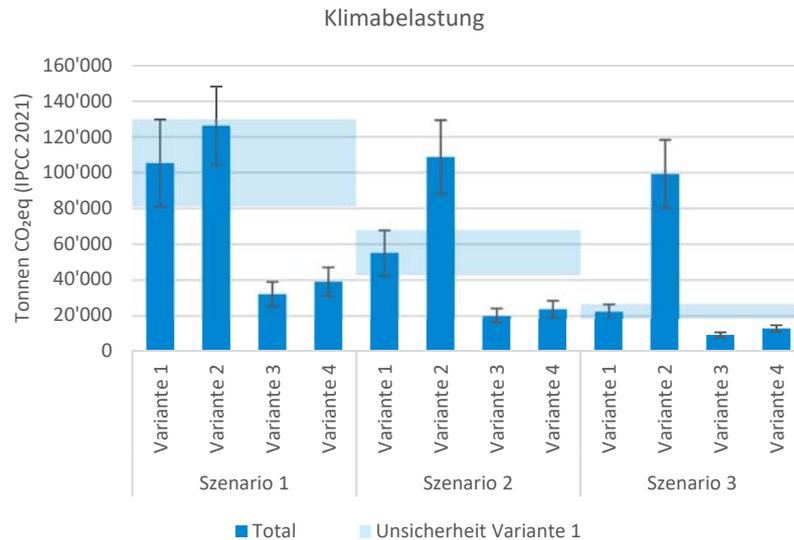


Abbildung 1-2 - Klimabelastung der untersuchten Szenarien und Varianten nach der Methode IPCC 2021

Das Fazit aus Umweltsicht (Kapitel 7.5) zeigt klar, dass im Vergleich zum Status quo in allen Fällen mit einer Aerobisierung der Deponie die Umweltbelastung gesenkt werden kann. Auch mit einer aktiven Entgasung kann die Situation verbessert werden. Dabei ist die Umweltbelastungsreduktion umso grösser, je jünger die Deponie, bzw. je höher der noch vorhandene Anteil C_{bio} in der Deponie ist.

Im aus Klimasicht besten Fall (Aerobisierung einer 20 Jahre alten Deponie, Szenario 1, Variante 3) können im Vergleich zum Status quo (Variante 1) 73'200 Tonnen CO₂eq eingespart werden. Dies ist eine beachtliche Menge, welche einer Autofahrt von mehr als 224 Millionen Kilometern entspricht. Dies entspräche der Erdumrundung von mehr als 5'600 Benzinautos.

Aerobisierung bringt beachtliche CO₂-eq-Einsparungen

Berechnung der Emissionsverminderung (Kapitel 7.7)

Für die Sanierungsvarianten 3 (Aerobisierung) und 4 (konventionelle Gaserfassung) wurden die Emissionsverminderungen als Grundlage für die Beantragung von Beiträgen aus KLIK (Stiftung Klimaschutz und CO₂-Kompensation) berechnet. Naturgemäss ist das Verminderungspotenzial bei Deponien mit hohem Anteil an C_{bio} am Grössten. Eine Aerobisierung (Variante 3) könnte im günstigsten Fall (Szenario 1) zu KLIK-Beiträgen in der Grössenordnung von CHF 3.2 Mio. führen. Für eine konventionelle Entgasung mit Abfackelung (Variante 4) wäre immerhin auch mit bis zu ca. CHF 2.9 Mio. zu rechnen.

Zu erwartende KLIK-Beiträge



1. Ausgangslage

In der Schweiz gibt es knapp 15'000 alte Ablagerungsstandorte, wovon etwas weniger als die Hälfte Siedlungsabfalldeponien sind. In Abhängigkeit von der Abfallzusammensetzung weisen diese Standorte unterschiedliche Mengen an organischen Abfällen oder organischen Anteilen von Abfällen auf. Zwar wurde die Ablagerung von unbehandelten Siedlungsabfällen und organischen Abfällen in der Schweiz ab 2000 verboten, aus den alten Deponien müssen jedoch noch über z. T. bedeutende Zeiträume umweltgefährdende Emissionen erwartet werden.

Die Abbauprodukte dieser Abfälle (hauptsächlich Stickstoffverbindungen wie Ammonium und Nitrat sowie organische Verbindungen im Sickerwasser - analytisch bestimmt über die Summenparameter CSB und DOC - sowie die klimarelevanten Emissionen von Methan und Kohlenstoffdioxid im Deponiegas) sind deshalb häufig Auslöser von Sanierungsmassnahmen betreffend die Schutzgüter Grundwasser, Oberflächengewässer, Boden und Luft.

Neben den Kriterien der Altlasten-Verordnung (AltIV) für einen Sanierungsbedarf bestehen bei alten Deponien, basierend auf den Erkenntnissen durchgeführter Gefährdungsabschätzungen (Abfallverordnung, Verordnung für die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen VVEA), oft auch Unsicherheiten bezüglich des Zeitpunktes für das Erreichen umweltverträglicher Emissionen. Die VVEA verlangt diesbezüglich, dass die Deponie oder einzelne Kompartimente aktuell die Umwelt nicht gefährden dürfen und dass innerhalb von 50 Jahren nach deren Abschluss auch keine Umweltgefährdung mehr erwartet werden muss.

Als Sanierungsmassnahme steht, insbesondere bei den grossen Deponien, welche in den 70er und 80er Jahren entstanden sind, eine Totaldekontamination des Standorts meist aus Gründen unverhältnismässiger Kosten nicht im Vordergrund. Seit einigen Jahren wurden im In- und Ausland vermehrt mit in situ Aerobisierungs- und Bewässerungsmassnahmen das Abbauverhalten im Deponekörper von Siedlungsabfalldeponien unter kontrollierten Bedingungen intensiviert, um dadurch eine beschleunigte Überführung in einen emissionsarmen, umweltverträglichen Zustand zu erreichen.

Wie weit mit solchen Massnahmen die anvisierten Ziele erreicht werden können, soll mit dieser Expertise untersucht werden. Ebenso wird geprüft, ob und ggf. unter welchen Randbedingungen das Aerobisieren von Siedlungsabfalldeponien im Vergleich zu anderen Sanierungsvarianten (Fortführung Status Quo, Totaldekontamination, aktive Entgasung ohne Aerobisierung) eine valable Sanierungsvariante darstellt.

*Ablagerungs-
standorte
Schweiz*



Abbauprodukte

*Altlastenver-
ordnung / Ab-
fallverordnung
VVEA*

*Sanierungs-
massnahme*

*Aerobisie-
rungsmassnah-
men*

2. Zielsetzung der Expertise / Auftrag

Im Rahmen dieser Expertise sollen folgende Ziele erreicht werden:

1. Möglichkeiten und Grenzen der Aerobisierung zur Sanierung ehemaliger Hausmülldeponien darstellen: verfügbare Techniken, Funktionsprinzipien, Sanierungsdauer, Energieverbrauch (ggf. Verbrauch von Hilfsstoffen), günstige Voraussetzungen und begrenzende Faktoren, Prozesssteuerung, Präsentation von diesbezüglichen Beispielen.
2. Schaffung von Entscheidungsgrundlagen, um bei künftigen Variantenstudien für alte Siedlungsabfalldeponien einzelfallbezogen geeignete Verfahren wählen zu können. Dies unter Berücksichtigung des Standes der Technik und der Kriterien Erfolgsaussichten (differenziert nach den Schutzgütern Wasser und Luft) und Umweltauswirkungen (Ökobilanz und Bilanz der Treibhausgase).
3. Ergänzend sind auch Wirtschaftlichkeitsüberlegungen in der Expertise abzubilden. Dies deshalb, weil gemäss AltIV allenfalls vom Sanierungsziel abgewichen werden kann, wenn mit der Sanierungsvariante unverhältnismässige Kosten zu erwarten wären.

Ziele



3. Aerobisierung zur Sanierung von Deponien

Möglichkeiten und Grenzen

3.1. Zielsetzung von Aerobisierungsmassnahmen

Deponien und Altablagerungen sind formal entweder in der Nachsorge nach TVA [11], bzw. VVEA [10] oder nach AltIV [12] überwachungs- oder sanierungsbedürftig. Unter letztere fallen vor allem Deponien und Altablagerungen, welche vor Inkrafttreten der TVA (10.12.1990) [11] bewilligt und betrieben wurden.

Grundsätzlich sind jedoch alle Ablagerungsstandorte, welche umweltgefährdende Stoffe enthalten, belaste überwachungsbedürftige Standorte im Sinne der AltIV [12]. Steht bei einem Standort nach mehrjähriger Überwachung fest, dass aufgrund des Verlaufs der Schadstoffkonzentration und der Standorteigenschaft mit grosser Wahrscheinlichkeit kein Sanierungsbedarf zu erwarten ist, so ist der Standort nicht mehr überwachungsbedürftig (Art.9 Absatz 1^{bis}, AltIV [12]).

Eine Aerobisierung kann sowohl als Massnahme zur Reduktion der Nachsorgedauer wie auch zur Sanierung eines Standorts in Betracht gezogen werden. In-situ-Massnahmen wie die Aerobisierung von Deponien und Altablagerungen zielen darauf, die biologischen Ab- und Umbauprozesse im Deponiekörper kontrolliert zu beschleunigen. Das verbleibende Emissionspotenzial soll dabei soweit verringert werden, dass von diesen Abfallablagerungen auch langfristig nahezu keine oder nur noch eine sehr geringe (tolerierbare) Umweltbelastung ausgeht. Die Massnahmen können zu einer beträchtlichen Reduzierung des Nachsorgeaufwands und der Nachsorgedauer führen und vermindern das Risiko eines Sanierungsbedarfs.

Auf den meisten Altdeponien, die bis in die 80er Jahre betrieben wurden, sind die anaeroben biologischen Abbauprozesse heute bereits soweit fortgeschritten (und dementsprechend verlangsamt), dass die herkömmliche Deponiegasfassung und energetische Verwertung nicht mehr in Frage kommen. In diesem Fall kann mit einem bestehenden, ggf. zu ergänzenden oder neuen Gasfassungssystem unmittelbar mit der Deponiebelüftung begonnen werden. Das übergeordnete Ziel besteht wie erläutert darin, die biologischen Abbauprozesse soweit zu intensivieren, dass nach Abschluss der Deponiebelüftung eine Entlassung aus der Nachsorge bzw. dem Überwachungsbedarf in einem überschaubaren Zeitraum von 50 – 70 Jahren (bezogen auf den Betriebsabschluss der Abfallablagerung) möglich wird.

Die Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge bzw. des Überwachungsbedarfs sind bezüglich Restgasemissionen und Grenzwerten im Deponiesickerwasser zu definieren (Sanierungsziele für die Schutzgüter Grundwasser oder Oberflächengewässer, und Deponiegas für das Schutzgut Luft).

3.2. Emissionsverhalten von Siedlungsabfalldeponien

Ältere Siedlungsabfalldeponien wurden überwiegend mit nicht vorbehandelten Abfällen mit entsprechend hohen organischen Anteilen verfüllt. In ihnen laufen, in Abhängigkeit der veränderlichen Milieubedingungen, physikalische, chemische und biologische Prozesse ab, die wiederum entscheidenden Einfluss auf das Emissionsgeschehen des Deponiekörpers haben. Die Milieubedingungen ihrerseits wechseln aufgrund der Einbautechnik (von früherem unverdichteten bis zum hochverdichteten Dünnschichteinbau mit Zwischenabdeckungen) von einer eher kurzen aeroben Phase unmittelbar nach dem Abfalleinbau in eine

formale Zuordnung von Deponien und Altablagerungen



carbotech
Umwelttechnik und Beratung

Wirkungsziel von Aerobisierungsmassnahmen

Intensivierung verlangsamer Abbauprozesse

Entlassungskriterien

Ältere Siedlungsabfalldeponien

dominierende und langanhaltende anaerobe Phase, in der unter Abschluss gegenüber der Luftatmosphäre mikrobielle Stoffwechselprozesse im anaeroben Milieu ablaufen.

Prognosen über die Dauer und Intensität der Prozesse im Deponiekörper sind von vielen Einflussfaktoren abhängig und daher relativ schwer zu erstellen. Die wichtigsten Randbedingungen für die in einer Deponie ablaufenden Prozesse sind:

- Abfallzusammensetzung (insbesondere Anteil an biologisch umsetzbarer Organik)
- Einbautechnik und -höhe (einzelner Schichten und des gesamten Deponiekörpers)
- Wassergehalt (und Wasserbewegung) im Deponiekörper, maßgeblich geprägt von klimatischen Bedingungen und der Ausführung des Oberflächenabschlusses

Der biologisch verfügbare Kohlenstoff als Bestandteil der abbaubaren Organik wird zu weit über 90% über den Gaspfad ausgetragen. Die Kohlenstoffverbindungen können in leicht, mittel und schwer abbaubare Anteile unterteilt werden. Mit zunehmendem Ablagerungsalter werden die biologischen Abbauprozesse von den mittel und schwer abbaubaren Verbindungen geprägt, was sich unter anaeroben Abbaubedingungen neben der Abnahme der Intensität der Gasbildung durch eine Zunahme der Halbwertszeit, die die Abbaugeschwindigkeit charakterisiert, äußert. Ein weiterer Anteil an schwer und nicht abbaubaren komplexen organischen Verbindungen (quantifizierbar über den Summenparameter CSB, im Wesentlichen charakterisiert durch Fulvo- und Huminsäuren sowie partikuläre Huminstoffe) emittiert dagegen wie die Stickstoffverbindungen hauptsächlich über den Wasserpfad.

Das Erreichen eines gemäss den Kriterien der AltIV [12] «umweltverträglichen» Zustands einer Ablagerung als Voraussetzung zur Entlassung aus einem Sanierungs- bzw. Überwachungsbedarf oder der Nachsorge gemäss VVEA [10] hängt von mehreren Bedingungen ab, wobei die Entwicklung der Deponiegas- und Sickerwasseremissionen und ihre Auswirkungen auf die Schutzgüter maßgebende Kriterien sind (siehe Kapitel 3.6. Nachweiskriterien zu Sanierungszielen).

Die Überwachungsergebnisse zahlreicher in der Nachsorge befindlicher Siedlungsabfalldeponien weisen ebenso wie wissenschaftliche (Labor-) Untersuchungen darauf hin, dass insbesondere das Ammonium und teilweise auch der DOC im Sickerwasser in den meisten Fällen die Dauer der Nachsorgephase bestimmen wird (vgl. [16]). Die Extrapolationen der Überwachungs- und Untersuchungsergebnisse ergeben einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten bis zu Jahrhunderten mit signifikanten, behandlungsbedürftigen Konzentrationen.

Für die langfristigen Deponiegasemissionen gibt es keine vergleichbaren Anforderungskriterien. Eine «nennenswerte» Deponiegasbildung unter anaeroben Milieubedingungen, die eine Erfassung und Behandlung des Deponiegases erforderlich macht, ist über mindestens 30 – 50 Jahre nach Abschluss der Verfüllung zu erwarten. Bei größeren Siedlungsabfalldeponien zeigt sich jedoch zunehmend, dass diese Zeiträume nicht ausreichen, bis der bioverfügbare Kohlenstoff soweit abgebaut wurde und insbesondere die klimarelevanten Methanemissionen soweit abgesunken sind, dass sie direkt oder mit passiven Gasbehandlungsmaßnahmen (z. B. biologische Methanoxidation in der Rekultivierungsschicht) in die Atmosphäre entlassen werden können. Auch bei kleineren Abfallablagerungen sind z. T. noch mehr als 50 Jahre nach Abschluss der Verfüllung Massnahmen zur Erfassung und Behandlung des Deponiegases oder

*Prognosen
Prozesse im
Deponiekörper*



*Biologisch ver-
fügbarer Koh-
lenstoff*

*Erreichen eines
umweltverträg-
lichen Zustan-
des*

*Langfristige
Deponiesicker-
wasseremissio-
nen*

*Langfristige
Deponie-
gasemissionen*

gastechische Sanierungsmaßnahmen wie eine aerobe in situ Stabilisierung erforderlich. Dabei stehen neben dem Klimaschutz häufig Gefahrenabwehraspekte oder das Ziel der höherwertigen Folgenutzung des Deponiestandorts im Vordergrund.

3.3. Planungsablauf für Aerobisierungsmassnahmen

Die Planung von Aerobisierungsmassnahmen setzt eine detaillierte Kenntnis der technischen Aspekte der Deponie und des Betriebszustandes und des aktuellen Emissionsverhaltens voraus. In den meisten Fällen sind dazu ergänzende Untersuchungen erforderlich. Der Planungsablauf umfasst folgende Bearbeitungsschritte:

1. Bestandsaufnahme
2. Ermittlung des noch vorhandenen Emissionspotenzials mit ergänzenden Untersuchungen (Erkundungsbohrungen mit Abfallfeststoffuntersuchungen, Absaug- und Belüftungsversuche)
3. Planung geeigneter Massnahmen zur beschleunigten und kontrollierten Reduzierung des Restemissionspotenzials (Aerobe in situ Stabilisierung, ggf. ergänzend Befeuchtungsmaßnahmen), Angaben zu Technik und Betriebsführung
4. Überwachungsprogramm zur Optimierung und zum Nachweis der erfolgreichen Durchführung der Massnahme(n)

Auf die oben erwähnten Bearbeitungsschritte wird im Folgenden eingegangen.

3.3.1. Bestandsaufnahme

Zusammenstellen der Anlagen- und Standortdokumentation mit Informationen zur Deponiefläche, Form, Volumen, Ablagerungsmengen und Zeiträume sowie der Abfallbeschaffenheit. Erfassung / Erstbewertung des technischen Zustands und der Wirksamkeit der bestehenden Anlagentechnik und des Gasfassungssystems, soweit vorhanden.

nach AltIV:
Stufe Detailuntersuchung

3.3.2. Ermittlung des noch vorhandenen Emissionspotenzials anhand ergänzender Untersuchungen

Für die meisten älteren Siedlungsabfallablagerungen liegen auch nach der Bestandsaufnahme zu wenig belastbare Informationen über die aktuelle Beschaffenheit der abgelagerten Abfälle und deren Restemissionspotenzial bezüglich den klimarelevanten Methanemissionen und den Sickerwasserinhaltsstoffen vor. Daher werden neben der Aufbereitung der verfügbaren Informationen und Ergebnisse zum Deponieverhalten Untersuchungen am Abfallkörper erforderlich bzw. empfohlen, was Erkundungsbohrungen mit Abfallfeststoffuntersuchungen und Absaug-/Belüftungsversuche notwendig macht.

nach AltIV:
Stufe Detailuntersuchung

Erkundungsbohrungen mit Abfallfeststoffuntersuchungen

Die Erkundungsbohrungen dienen zur Abfallfeststoffprobenahme aus unterschiedlichen Deponiebereichen und Ablagerungshorizonten. Die Erkundungsbohrungen können zudem für ergänzende Absaug- und Belüftungsversuche sowie zur langfristigen Überwachung des Gashaushalts zu Gasmessstellen ausgebaut werden.

Erkundungsbohrungen



Abfallfeststoffuntersuchungen

Anknüpfend an das Bohrprotokoll und die organoleptische Ansprache des Bohrguts sollten mindestens folgende Parameter der entnommenen Abfallfeststoffe analysiert werden:

- Wassergehalt bei der Probenahme (% der Feuchtmasse FM)
- Glühverlust (% der Trockenmasse TM)
- organischer Kohlenstoffgehalt (% TM)
- Stickstoffgehalt (% TM)
- Je nach Bedarf zur Ermittlung zukünftiger Restemissionen über den Sickerwasserpfad können Einfach- oder Mehrfachelutionsverfahren angewendet werden.

- Zentral für die Standortbestimmung zum Gashaushalt der Deponie und zur Beurteilung des Restgaspotenzials ist die Bestimmung der biologischen Aktivität der Abfallstoffe bzw. des Deponiekörpers mit Respirationstests (Sauerstoffverbrauchsmessungen) oder Gasbildungstests:

Die Bestimmung der Atmungsaktivität² im Respirometer erlaubt eine Aussage über den Restgehalt und die Verfügbarkeit biologisch abbaubarer Anteile in den Abfallfeststoffproben zur Quantifizierung des Restgasbildungspotenzials (d.h. Methanbildungspotenzial unter anaeroben Milieubedingungen) sowie zur Deponiebelüftung (Sauerstoffverbrauch unter aeroben Milieubedingungen):

AT₄ : Atmungsaktivität als Summenwert nach 4 Tagen

GB₂₁ : alternativ kann der Gasbildungstest GB₂₁ über 21 Tage durchgeführt werden

Es besteht ein empirischer Zusammenhang zwischen niedrigen Atmungsaktivitätswerten (AT₄ < 10 mgO₂/g TM) und dem biologisch abbaubaren Kohlenstoffanteil (VDI 3799, 2017, vgl. [17], [18]):

$$C_{\text{bio.}} = 3 \cdot AT_4 \quad \begin{array}{l} C_{\text{bio.}} \text{ Biologisch abbaubarer Kohlenstoff [kg/t TM]} \\ AT_4 \text{ Atmungsaktivität in 4 Tagen [mgO}_2\text{/gTM]} \end{array}$$

Multipliziert mit der abgelagerten Trockenmasse an Siedlungsabfällen ergibt sich das Gesamtpotenzial an Kohlenstoff, das noch hauptsächlich über den Gaspfad aus dem Deponiekörper emittieren kann.

Das Restgaspotenzial der Deponie pro Tonne Trockenmasse bzw. t TM ergibt sich bei vollständigem Abbau unter anaeroben Milieubedingungen zu:

$$G_E = C_{\text{bio.}} \cdot 1,868 \quad G_E \text{ Deponiegaspotenzial [m}^3\text{/t TM]}$$

Die Tabelle 3-1 zeigt exemplarisch Ergebnisse von Altdeponien und Altablagerungen in Deutschland zur durchschnittlichen Atmungsaktivität und daraus abgeleiteten biologisch abbaubaren Kohlenstoffgehalten und

² Die Bestimmung des Anteils des biologisch abbaubaren Kohlenstoffs im Abfall aufgrund der AT₄ aus Proben der Abfälle wird bisweilen kontrovers diskutiert. Zum einen wegen der Repräsentativität der Probenahme. Als weitere Unsicherheit ist das Analyseverfahren für den AT₄ und GB₂₁ zu nennen. Hemmungen im biologischen Abbau, die im Versuchsverlauf wenn überhaupt, erst allmählich überwunden werden, können zu verfälschten Resultaten führen.

Trotz aller Unsicherheiten und Schwankungen lassen diese Ergebnisse in der Gesamtbeurteilung mit allen weiteren Informationen zu einem Deponiestandort, einschließlich üblicher Gasprognoserechnung sehr wichtige Rückschlüsse auf das gesamte Kohlenstoffpotenzial zu. Dies hat sich auch bei entsprechenden Untersuchungen und einem umfangreichen Gutachten für das deutsche Umweltbundesamt gezeigt (Quelle dazu: Stegmann, R., Heyer, K.-U., Rettenberger, G., Schneider, R., 2018. Überprüfung der methodischen Grundlagen zur Bestimmung der Methanbildung in Deponien“, UFOPLAN-Projekt FKZ 3714343170 im Auftrag des Umweltbundesamts).

Abfall-Feststoff-
untersuchungen



Eluattests nach
VEA und AltIV



Deponiegaspotenzialen. Es ist der tendenzielle Zusammenhang zwischen dem Ablagerungsalter und dem biologisch abbaubaren Kohlenstoffanteil im Abfall zu erkennen.

Tabelle 3-1 – Durchschnittliche Werte der Atmungsaktivität, des bioverfügbaren Kohlenstoffs und des maximalen Restgaspotenzials in Bezug zum Ablagerungsalter. Ergebnisse von Untersuchungen an Altdeponien und Altablagerungen in Deutschland

Deponie	Ablagerungsalter) ¹	Atmungsaktivität AT ₄	Bioverfügbare Kohlenstoff C _{bio}	Maximales Restgas- potenzial G _E
	[a]	[mgO ₂ /gTM]	[kg C _{bio} /t TM]	[m ³ /t TM]
A	16	4,3	13	24
B	17	5,7	17	31
C	18	4,0	12	23
D	21	5,7	17	32
E	22	3,9	12	22
F	25	3,3	10	19
G	31	2,7	8	15

)¹ durchschnittliches Ablagerungsalter der abgelagerten Abfälle eines Deponiestandorts bis zu dem Zeitpunkt, wo die Abfallfeststoffprobenahme und Bestimmung der in der Tabelle aufgeführten Parameter vorgenommen wurde.

Die Auswertung der Ergebnisse zu den Abfallfeststoffuntersuchungen dient:

- zur Absicherung der Prognosen zum Gashaushalt im Hinblick auf die angestrebte Überführung des Deponiekörpers in einen emissionsarmen Zustand, insbesondere die Reduzierung der Methanemissionen als Klimaschutzmaßnahme,
- in Bezug auf den Gashaushalt der Deponie der Beurteilung der Notwendigkeit von Massnahmen zur Verminderung des Restgaspotenzials und gegebenenfalls der Festlegung der in Betracht fallenden technischen und betrieblichen Massnahmen (siehe: Opportunitätsgrenzen technischer und betrieblicher Massnahmen) und der Abschätzung bzw. Beurteilung der Auswirkungen von Belüftungsmaßnahmen auf den Abfallkörper in den unterschiedlichen Deponiebereichen, Ableitung von Dimensionierungsvorgaben für technische Einrichtungen zur Gasfassung und Deponiebelüftung (siehe nachfolgend „Massnahmenkatalog“),
- in Bezug auf den Wasserhaushalt des Deponiekörpers der Beurteilung, ob Wassermangel oder Wasserübersättigung zu einer Limitierung der biologischen Abbauprozesse führt und ggf. eine ergänzende Infiltrationsmaßnahme zur Befeuchtung oder eine gezielte Entnahme eingestauten Sickerwassers zur Optimierung des Wasserhaushalts in Frage kommt.

Ziel der Auswertung Abfallfeststoffuntersuchungen

Absaug-/Belüftungsversuche

Ziel von Absaug- und Belüftungsversuchen in unterschiedlichen Deponiebereichen ist die Klärung folgender Fragestellungen:

- Sofern ein Gasfassungssystem vorhanden ist: Welchen Zustand weisen die bestehenden Gasbrunnen und -leitungen hinsichtlich ihrer technischen Funktion auf?
- Ist es technisch möglich, über die bestehenden und ggf. zu ergänzenden Gasbrunnen für eine Aerobisierung ausreichende Luftmengen in den Deponiekörper einzubringen bzw. ausreichende Mengen Abluft abzusaugen?

Absaug- und Belüftungsversuche



- Wie breitet sich die eingebrachte Luft im Deponiekörper aus und welche ersten Auswirkungen hat die Luftzugabe auf den Gashaushalt des Deponiekörpers und die Reduktion der klimarelevanten Methanemissionen?
- Wie sind in Verbindung mit den Ergebnissen der Abfallfeststoffanalysen die technischen Massnahmen standortbezogen zu dimensionieren?

Umfangreiche Hinweise und Anleitungen zur Durchführung kurzzeitiger oder längerer Gasabsaug- und Belüftungsversuche sind u.a. in der VDI-Richtlinie 3790 Blatt 2 vom Mai 2017 und in der VDI-Richtlinie 3899 Blatt 2 vom November 2020 zu finden.

3.3.3.

Opportunitätsgrenzen technischer und betrieblicher Massnahmen

Der Einsatz und die voraussichtliche Wirkung von technischen und betrieblichen Massnahmen zum beschleunigten Abbau des bioverfügbaren Kohlenstoffs (C_{bio}) in der Deponie hängen stark vom entsprechenden aktuellen C_{bio} -Gehalt in der Deponie ab. Zur Ermittlung geeigneter Verfahren können aufgrund von zahlreichen Untersuchungen an Altdeponien und Deponiebelüftungsmassnahmen folgende Werte zur Orientierung herangezogen werden. Es ist danach davon auszugehen, dass:

- bei bioverfügbaren Kohlenstoffgehalten $> 12 \text{ kg } C_{\text{bio}}/\text{t TM}$ und entsprechend grossen Deponien noch eine aktive Gaserfassung (Gasabsaugung via Gasbrunnen) und Gasverwertung bzw. -verbrennung in Frage kommen kann,
- bei bioverfügbaren Kohlenstoffgehalten von $6 - 12 \text{ kg } C_{\text{bio}}/\text{t TM}$ übergangsweise noch eine herkömmliche Deponiegasabsaugung und Gasbehandlung z.B. mit einer Deponieschwachgasfackel erfolgen oder in vielen Fällen sofort mit der Deponiebelüftung begonnen werden kann,
- bei bioverfügbaren Kohlenstoffgehalten von $2.5 - 6 \text{ kg } C_{\text{bio}}/\text{t TM}$ zu beurteilen ist, ob und in welchem Umfang eine Deponiebelüftung noch zielführend ist oder ob bereits passive Gasbehandlungsverfahren wie z.B. Methanoxidation in Biofilterfenstern oder in einem auf Methanoxidation ausgerichteten Deponieabschluss ins Auge gefasst werden können.
- bei bioverfügbaren Kohlenstoffgehalten von $< 2.5 \text{ kg } C_{\text{bio}}/\text{t TM}$ zu prüfen ist, ob die Deponiebelüftung technisch und wirtschaftlich noch möglich und zumutbar ist, ansonsten: Umstellung auf passive Restgasbehandlung z.B. über Methanoxidation in der Rekultivierungsschicht mit dem Nachweis, dass die Sanierungsziele erreicht sind. Wie im Kapitel 3.6.1 vorgeschlagen wären die Emissionen weniger als $0,2 \text{ l CH}_4 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ in die Rekultivierungsschicht. Bei Erfüllung dieses Kriteriums über mehrere Jahre wäre gasseitig die Entlassung aus der Nachsorge möglich.

Oftmals sind die bioverfügbaren Kohlenstoffgehalte in Altdeponien inhomogen verteilt. Die gleichmäßige oder ungleichmäßige Verteilung des bioverfügbaren Kohlenstoffs kann über die genannten Erkundungsbohrungen mit der Abfallfeststoffbeprobung ermittelt werden. Darauf kann dann mit einem technisch angepassten System zur Belüftung und Ablufferfassung reagiert werden, z.B. über die Anzahl und Abstände der Gasbrunnen, Belüftungsvolumina etc.



carbotech
Unternehmens- und Beratung

Einsatzbereiche der verschiedenen Massnahmen

3.3.4.
Massnahmenkatalog: Planung geeigneter Massnahmen zur beschleunigten und kontrollierten Reduzierung des Restemissionspotenzials

Gestützt auf die Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen³ und unter Berücksichtigung der oben erwähnten Opportunitätsgrenzen ergeben sich folgende Planungsschritte:

- Festlegung des standortbezogenen mit den Massnahmen angestrebten weiteren Abbaugrades des bioverfügbaren Kohlenstoffpotenzials. Als Orientierungswert wird ausgehend vom vorhandenen Restgaspotenzial ein Abbaugrad von 80 – 90% vorgeschlagen. Dieser Abbaugrad konnte bereits bei mehreren Deponiebelüftungsmaßnahmen erreicht und wissenschaftlich nachgewiesen werden (Ritzkowski & Stegmann, 2008). Er weist ein angemessenes Verhältnis zwischen dem angestrebten Abbau- bzw. Stabilisierungsgrad und dem dafür erforderlichen betrieblichen Aufwand einschließlich des Energieverbrauchs mit den damit verbundenen Sekundäremissionen auf.
- Prüfung des Einsatzes ergänzender oder neuer technischer Einrichtungen zur Deponiegasfassung und Deponiebelüftung (Gasbrunnen, Gasleitungen, Kondensatabscheider, Gasverteilerstationen, Gastransportleitungen etc.)
- Evaluation des geeigneten Verfahrens zur Deponiebelüftung, Abluftfassung und Abluftbehandlung (u.a. mit Gasverdichterstationen für Verdichteraggregate wie z. B. Seitenkanal- oder Drehkolbenverdichter, Schaltschränken etc. sowie Abluftbehandlung über Deponieschwachgasfackeln, regenerative thermische Oxidationsanlagen (RTO) oder FLOX-Verfahren) (Näheres dazu siehe Kapitel 3.5)
- Festlegung der erforderlichen Gasanalytik sowie Mess- und Regeltechnik der Belüftungs- und Absauganlage
- Konzept der zukünftigen Betriebsführung zur Deponiebelüftung, zeitliches Vorgehen
- Ggf. ergänzende Massnahmen zur Steuerung des Wasserhaushalts (Befeuchtung oder Sickerwasserentnahme)
- Ggf. erste Grobschätzung zu Investitions- und Betriebskosten (siehe auch Kapitel 6)

Vorgabe Abbaugrad von 80 bis 90 %

Prüfen neuer technischer Einrichtungen

Erforderliche Gasanalytik

Steuerung Wasserhaushalt

3.3.5.
Überwachungsprogramm zur Optimierung und zum Nachweis der erfolgreichen Durchführung der Massnahme

Auf das Überwachungsprogramm im Rahmen einer ordnungsgemäßen Betriebsführung ist großer Wert zu legen. Es bietet die Voraussetzung der betriebsbegleitenden Optimierung des Deponiebelüftungsverfahrens, was u.a. die Dauer und die erforderlichen Kosten mitbestimmt. Ferner kann darüber der Nachweis der erfolgreichen Durchführung der Massnahmen in Hinblick auf deren Abschluss und das weitere Deponie- und Emissionsverhalten geführt werden (näheres siehe Kapitel 0).

Je nach den Standortbedingungen und dem gewählten Deponiebelüftungsverfahren kommen folgende Überwachungsverfahren zum Deponiemonitoring in Frage:

Gasverdichterstation und Abluftreinigungsstufe:

- Volumina und Drücke der Gasströme Zuluft und Abluft (online).
- Ablufttemperatur im Rohgasstrom (online).

Nach AltIV: Stufe Erfolgskontrolle

Gasstationen



³ Eine Voruntersuchung entspricht hier nicht den Begriff aus der Altlasten-Verordnung (siehe Art. 7, SR 814.680), sondern ist im allgemeinen Sinne des Wortes zu verstehen.

- Gaszusammensetzung Abluft im Gasstrom der Gasverdichterstation: CH₄, CO₂, O₂ (online), H₂S (diskontinuierlich), CO (diskontinuierlich oder kontinuierlich).
- Abgasqualität nach Abluftreinigungsstufe (gemäß gesetzlichen Anforderungen), Abgastemperatur in Abluftreinigungsstufe (kontinuierlich), Nachweis der Effizienz der Abluftreinigungsstufe.
- Stromverbrauch (Sekundäremissionen).

Gasbrunnen, Gasverteilerstation

- Volumina und Drücke Zuluft/Abluft an allen Gasbrunnen (diskontinuierlich z.B. wöchentlich bis monatlich) mit regelmäßiger Optimierung.
- Gaszusammensetzung an allen abgesaugten Gasbrunnen: CH₄, CO₂, O₂, H₂S, CO (diskontinuierlich z.B. wöchentlich bis monatlich) zur Regulierung bzw. Optimierung der Ablufferfassung und der aktiven Belüftung.

*Gasbrunnen,
Gasverteiler-
station*

Deponiekörper, Deponieoberfläche

- Temperaturen im Deponiekörper (zur Beurteilung und Steuerung der biologischen Abbauprozesse), kontinuierliche Messung in ausgewählten Gasbrunnen.
- Ermittlung diffuser Ausgasungen über die Deponieoberfläche anhand von Begehungen mit Flammenionisationsdetektoren (FID) oder vergleichbaren Verfahren.
- Setzungen an ausgewählten Messpunkten.
- Wasserhaushalt (was über das Überwachungsprogramm bestehender Betriebsbewilligungen in der Regel ohnehin erfolgt).
- Bei Bedarf Sickerwasserpumpbetrieb über Kombibrunnen zur kontrollierten Sickerwasserentnahme in eingestauten Deponiebereichen: Entnahmemengen, Wasserstände im Deponiekörper (Näheres dazu siehe Kapitel 3.4).
- Bei Bedarf Sickerwasser-/Brauchwasserzugabe über Infiltrationsanlagen zur kontrollierten Befeuchtung sehr trockener Deponiebereiche: Beschaffenheit des Zugabemediums, Infiltrationsvolumina, -intervalle.

*Deponiekör-
per- und Ober-
fläche*

Berichtswesen

- Dokumentation der oben genannten Betriebs- und Überwachungsmaßnahmen.
- Kohlenstoffbilanzierung zum Nachweis der Abnahme von C_{bio} im Deponiekörper und der vermiedenen CO₂-äquivalenten Methanemissionen.
- Qualität Abluft und Abluftreinigungsbetrieb.
- Energiebedarf (für Klimaschutzbilanz).
- Jährlicher Nachweis in Berichtsform, um den Beitrag der Deponiebelüftung als Klimaschutzmaßnahme nachvollziehbar bilanzieren zu können (soweit ein entsprechendes Gesuch eingereicht und bewilligt wurde).
- Abschließender Nachweis zur erfolgreichen Durchführung und Festlegung der Beendigung der Massnahme (Erfolgskontrolle).

*Berichterstat-
tung*

Weitere ergänzende Hinweise zu den erläuterten Bearbeitungsschritten insbesondere zum Monitoring sind in der BAFU-Veröffentlichung «Standardmethode für den Nachweis von Emissionsverminderungen bei Deponiegasprojekten» enthalten (BAFU, 2015).



carbotech
Smartgas and Biogas

3.3.6.
Kriterien zum Nachweis der erfolgreichen Durchführung der Deponiebelüftung

Deponiebelüftungsmaßnahmen mit oder ohne ergänzende Befeuchtungsmaßnahmen sind, wie erläutert, geeignet, um eine Beschleunigung biologischer Abbauprozesse und damit eine Verbesserung des Langzeitverhaltens zu bewirken. Um die kontrollierte Überführung in einen emissionsarmen Zustand zu erreichen, sind die im Kapitel 3.3.1 und 3.3.2 erläuterten Voruntersuchungen erforderlich, um die Massnahmen standortangepasst dimensionieren zu können. Die Voruntersuchungen mit dem betriebsbegleitenden Überwachungsprogramm bieten so die Grundlage zum Nachweis der erfolgreichen Durchführung der Deponiebelüftung.

Der Nachweis kann sich auf die Bewertung der Abnahme der Gasemissionen beziehen. Wie im Kapitel 3.7 erläutert, gibt es zur Sickerwasserbeschaffenheit keine allgemeingültigen quantitativen Erfolgskriterien infolge von Aerobisierungsmassnahmen.

Ein eindeutigeres Kriterium ist jedoch eine **Kohlenstoffbilanzierung**. Das zum Zeitpunkt der Bilanzierung in der Deponie noch vorhandene Restgaspotential ergibt sich aus der Differenz des bei der Voruntersuchung ermittelten Kohlenstoffgehalts C_{bio} abzüglich der mit der Abluft im Gasstrom der Gasverdichtestation abgeführten Kohlenstoffe. Über die betriebsbegleitende Auswertung der Gas-/Ablufterfassung während der Deponiebelüftung kann der Kohlenstoffaustrag aus dem Produkt des Gasabsaugvolumens multipliziert mit den Kohlenstoffanteilen im Gasvolumenstrom (C-Anteil des Methans und Kohlenstoffdioxids) fortlaufend bilanziert werden. Dieses ermöglicht eine kontinuierliche Einschätzung und Optimierung des Stabilisierungsverlaufs und bildet ein Kriterium zur Beendigung der Massnahme.

Mit dieser Vorgehensweise kann nicht nur die Erfolgskontrolle im Hinblick auf den Abschluss der Deponiebelüftung erbracht werden, sondern können auch die Voraussetzungen zur Beendigung der Nachsorgephase überprüft werden. Qualitative Hinweise zur Wirkung der Belüftungsmassnahmen können die Temperaturentwicklung im Deponiekörper und dessen Setzungsverhalten geben.

3.4.
Wirkung von Befeuchtungsmassnahmen auf den Aerobisierungsprozess

Ein wesentlicher Faktor für die biochemischen Umsetzungsprozesse in Deponien ist der Wassergehalt des Deponiematerials. Das Wasser dient als Transportmedium für Nährstoffe und organische Substanzen in die Bakterienzelle. Da das Wachstum der Mikroorganismen nur in wässriger Lösung stattfindet, muss die Oberfläche des abzubauenen Substrats von Wasser umhüllt sein. Während der minimal erforderliche Wassergehalt vom Wasserbedarf der Mikroorganismen abhängt, wird der maximal zu tolerierende Wassergehalt bei aeroben Prozessen vor allem von der Konkurrenz zwischen Sauerstoff und Wasser in den Poren bestimmt. Bei Wassergehalten organisch belasteter Abfälle unter ca. 20 % FM findet keine mikrobielle Aktivität mehr statt. Dies gilt sowohl für die Umsetzungsreaktionen unter belüfteten (d.h. aeroben) als auch unter anaeroben Bedingungen im Deponiekörper. Während die mikrobielle Aktivität unter anaeroben Bedingungen im Deponiekörper durch sehr hohe Wassergehalte nicht negativ beeinflusst wird, werden aerobe Stoffwechselaktivitäten bei Wassergehalten über 40 % FM zunehmend limitiert und kommen bei Werten über 70 % FM vollständig zum Erliegen.

*Überführung in
emissionsarmen
Zustand*



carbotech
Umwelttechnik und Beratung

*Sickerwasser
und Gaspfad*

*Kohlenstoffbi-
lanzierung*

*Befeuchtungs-
massnahmen*

Im Zuge von Deponiebelüftungsmaßnahmen sind aus o.g. Gründen Überprüfungen der Feuchtigkeit der Abfälle von besonderer Bedeutung. So lassen sich bei der Planung einer Belüftung durch die Analyse von tiefendifferenzierten Materialproben sowohl Feuchtedefizite als auch eingestaute, d.h. vollständig wassergesättigte Bereiche identifizieren. Auch können sich die Wassergehalte mit zunehmendem Deponiealter bzw. andauernder Deponiebelüftung verändern. Hierbei spielen langfristige Austrocknungseffekte nach Aufbringung von gering durchlässigen Oberflächenabschlüssen ebenso eine Rolle wie auch Feuchteverluste im Zuge des Austrags erwärmter, wassergesättigter Abluft aus dem belüfteten Deponiekörper, wobei dieser Wasseraustrag oft vernachlässigbar ist und durch den Niederschlagseintrag in der Regel ausgeglichen wird. Beispielhaft sind in der Abbildung 3-1 und der Abbildung 3-2 Ergebnisse zum Wassergehalt von Abfallfeststoffproben unterschiedlicher Deponien (nach Deponiealter) und Ablagerungsmächtigkeit aufgeführt.

Wassergehalt
 im Deponiekörper

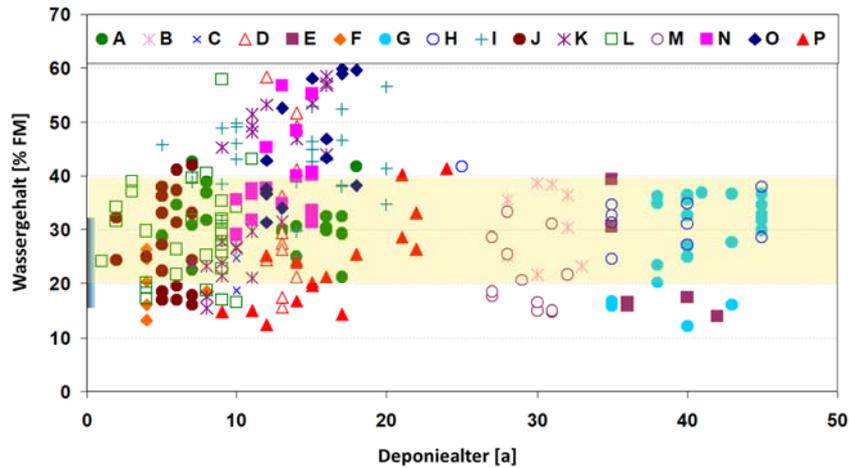


Abbildung 3-1- Wassergehalte von Abfallfeststoffproben aus Deponien unterschiedlichen Alters ohne Tiefenbezug (der optimale Wassergehalt 20% - 40% ist in Gelb dargestellt).

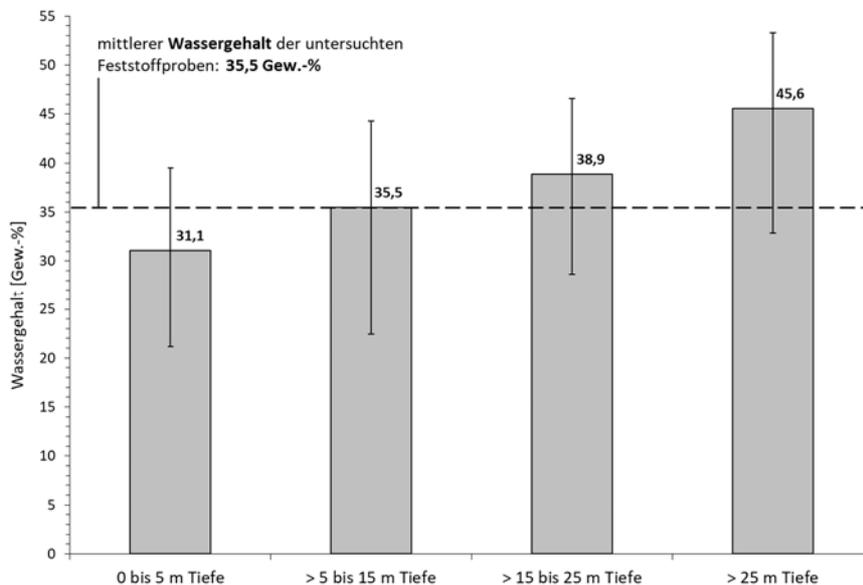


Abbildung 3-2- Wassergehalte in unterschiedlichen Tiefenhorizonten einer Altdeponie.

Die dargestellten Beispiele verdeutlichen, dass in der überwiegenden Anzahl der Fälle der Wassergehalt nicht zum limitierenden Faktor der biologischen Stoffwechselprozesse werden wird. Erfahrungen aus mehreren Deponiebelüftungsprojekten in Deutschland zeigen jedoch, dass ein Wassereinstau an der Deponiebasis zu Limitationen im Belüftungsbetrieb führen kann. Ein solcher Einstau kann oftmals trotz eines funktionierenden Drainage- bzw. Sickerwasserfassungssystems als Resultat der abnehmenden vertikalen Permeabilität der abgelagerten Abfälle auftreten. Letztere ist auf die steigende Auflast in den tieferen Deponiebereichen zurückzuführen, so dass sich die Fließgeschwindigkeit des Wassers in vertikaler Richtung signifikant verringert.

Unter derartigen Randbedingungen kann es zur Sicherstellung einer möglichst vollständigen Aerobisierung des Deponiekörpers notwendig werden, eingestautes Sickerwasser aus den tieferen Schichten der Deponie abzupumpen. Möglichkeiten dazu bestehen über sogenannte Kombibrunnen, d.h. Gasbrunnen, die über eine zusätzliche Tauchpumpe zur Entwässerung des Deponiekörpers genutzt werden können. Nach erfolgter Entwässerung können somit auch die unteren Deponiebereiche mit Luftsauerstoff versorgt werden, so dass es auch dort zu dem gewünschten beschleunigten Abbau der organischen Substanz kommt.

3.5. Angewandte Aerobisierungstechniken

Bei der Auswertung dokumentierter Projekte zeigt sich, dass die Begriffe „Deponiebelüftung“ bzw. „Aerobisierung“ eine Vielzahl von Konzepten und Strategien vereinigen und oftmals unterschiedliche Zielstellungen verfolgen. Im Folgenden werden daher die gängigen Verfahren zusammenfassend dargestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für spezifische Zielstellungen beurteilt.

Die Belüftung einer Deponie ist keineswegs trivial und beinhaltet weit mehr als den einfachen Eintrag von Luft in die abgelagerten Abfälle. Aspekte wie z. B. das Design der Gasbrunnen und deren Abstand zueinander, die Wahl hinreichender Luftvolumina und Luftdrücke, Überwachung der Luftverteilung sowie der Temperaturen (in den abgelagerten Abfällen und im Sickerwasser) und Feuchtgehalte sowie die potentielle Mobilisierung von Schadstoffen spielen hierbei entscheidende Rollen. In der Tabelle 3-2 sind verschiedene Konzepte zur Deponiebelüftung hinsichtlich ihrer technischen Implementierung, der (vorrangigen) Zielsetzungen sowie der empfohlenen Emissionsminderungstechnik aufgeführt. Die nachfolgenden Unterkapitel beschreiben die wesentlichen Aerobisierungstechniken, die bisher in Europa angewandt wurden.

Wassergehalt
tiefenabhängig



Vollständige
Aerobisierung



Vielzahl von
Konzepten

Belüftung

Tabelle 3-2 – Zusammenstellung unterschiedlicher Konzepte zur Deponiebelüftung, wesentliche Anwendungsgebiete und zugehörige Abluftreinigungsmethoden.

Konzept	Umsetzung	Hauptanwendungsgebiet	Abluftreinigungstechnik
Hochdruckbelüftung	Impulsverfahren	Vorbereitung auf Deponierückbau	Biofilter
Niederdruckbelüftung	Aktive Belüftung und Ablufferfassung	Beschleunigte biologische Stabilisierung und Vermeidung von THG-Emissionen	RTO, Schwachgasfackel, Biofilter nach fortgeschrittener Stabilisierung
	Aktive Belüftung ohne Ablufferfassung	Beschleunigte biologische Stabilisierung	Oberflächenabdeckung als Flächenbiofilter
Übersaugung	Erhöhte Absaugraten (passive Belüftung)	Erhöhung der Methanfracht, allmähliche Aerobisierung	Biofilter oder i.d.R. Schwachgasfackel / RTO



3.5.1.

Hochdruckbelüftung

Bei der Hochdruckbelüftung erfolgt die Aerobisierung des Deponiekörpers durch stoßartige Druckabgabe (bis zu 6 bar) aus Lanzen, wobei Luft verwendet wird, die mit zusätzlichem Sauerstoff (bis zu 20 %) und ggf. Nährstoffen angereichert werden kann. Jede Lanze wird über ein Druckluftverteilternetz versorgt und verfügt über ein Schnellöffnungsventil, das intermittierend geöffnet wird, sobald ein bestimmter Druck aufgebaut wurde. Das freigesetzte Belüftungsgas ist in der Lage, sowohl stark als auch schwach verdichtete Abfallstoffe zu durchdringen.

*Stossartige
Luftabgabe*

Um die unkontrollierte Freisetzung von Abluft zu minimieren, sieht das Druckstoßkonzept ein Ablufferfassungssystem bestehend aus Sauglanzen vor. Das parallel zur Belüftung betriebene Ablufferfassungssystem wird mit einer um 30% erhöhten Absaugleistung (im Vergleich zu den für die Belüftung verwendeten Gasmengen) betrieben und überführt die Abluft in die Behandlungsstufe bestehend aus einem Biofilter und/oder Aktivkohlefilter (Abbildung 3-3a).

Die Hochdruckbelüftung wurde mehrfach im Vorfeld von Deponierückbauprojekten über kurze Zeiträume eingesetzt, wobei Arbeitsschutzaspekte und Geruchsvermeidung im Vordergrund standen. Hier war folglich nicht eine weitgehende Biostabilisierung mit üblicherweise erforderlichen Behandlungszeiträumen im Bereich von mehreren Jahren das eigentliche Ziel. Die energie- und betriebsstoffintensive Methode hat im Vergleich zu anderen Verfahren ökonomische Nachteile.

Einsatz bei Deponierückbauprojekten

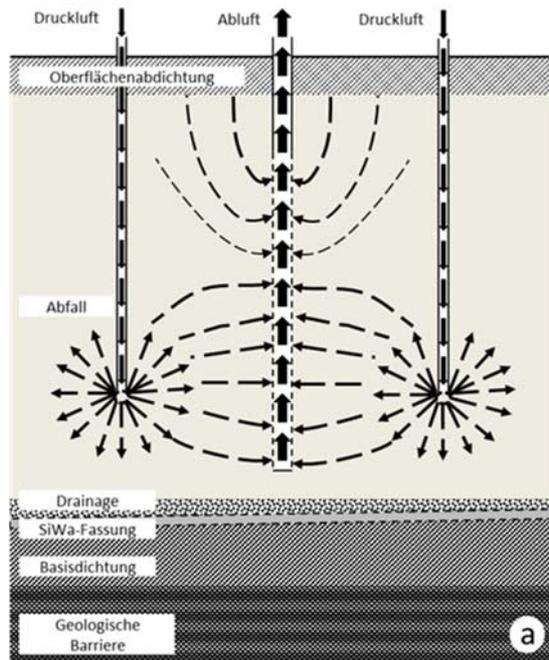


Abbildung 3-3- Aerobisierungstechnik Hochdruckbelüftung (a).

3.5.2.

Niederdruckbelüftung

Konzepte der Niederdruckbelüftung werden häufig in Fällen angewandt, welche auf eine beschleunigte und weitreichende biologische Abfallstabilisierung ausgelegt sind. Im Gegensatz zum Hochdruckkonzept überschreiten die positiven Drücke i.d.R. 0,3 bar nicht und liegen häufig in einem Bereich von 20-80 mbar. Bei großen Deponien mit Ablagerungsmächtigkeiten > 40 m können im Einzelfall und insbesondere für tiefere Schichten auch Drücke von bis zu 1,0 bar notwendig werden. In den letzten 10-15 Jahren wurden zur Niederdruckbelüftung folgende Konzepte und Varianten entwickelt.

Aktive Belüftung mit paralleler Ablufferfassung

Wie bei der Hochdruckbelüftung weisen auch die meisten Niederdruckbelüftungskonzepte eine parallel betriebene Belüftung und Absaugung auf. Ein Teil der Gasbrunnen wird als Belüftungsbrunnen und ein Teil als Absaugbrunnen genutzt. Durch die Belüftungsbrunnen (z. T. auch horizontalen Gasdrainagen) wird (meist) kontinuierlich Umgebungsluft in den Deponiekörper eingeleitet. Die Luft verteilt sich durch Konvektion und Diffusion und wird durch das simultan betriebene Absaugsystem via Absaugbrunnen aus dem Deponiekörper abgeleitet. Absaugbrunnen und Gasverteilerstationen, sind mit der Verdichteranlage und der Abluftreinigungsstufe verbunden. Das parallel betriebene Belüftungs- und Ablufferfassungssystem bietet Vorteile in Bezug auf die Flexibilität der Betriebsführung: Luft kann gezielt in Zonen mit Sauerstoffdefizit eingeleitet werden, und der Luftstrom innerhalb der Abfälle kann durch die Wahl von Belüftungs- und Gasabsaugbrunnen zielgerichtet eingestellt werden (Abb. 3.4b).

Unterschiede innerhalb der Konzepte zur aktiven Niederdruckbelüftung mit paralleler Ablufferfassung bestehen vor allem in der Wahl einer geeigneten Abluftbehandlung. Im Hinblick auf eine optimierte Reduktion der Treibhausgasemissionen ist die thermische Oxidation der Restmethanfracht in der erfassten Abluft zwingend erforderlich. Systeme wie die flammenlose nicht-katalytische

*Weitreichende
biologische
Abfallstabilisie-
rung*

*Parallele Belüf-
tung und Ab-
saugung*

thermische Oxidation (regenerative thermische Oxidation, RTO) sind in der Lage, Methanemissionen über die Abgase vollständig zu vermeiden. Zugleich ist der externe Energiebedarf sehr gering, da die erforderliche Oxidationstemperatur (ca. 1.100°C) durch die Energiefreisetzung bei der thermischen Oxidation gehalten wird. Mittlerweile sind auch Schwachgasfackeln zunehmend in der Lage, Abluftströme mit geringen Methankonzentrationen thermisch zu behandeln. Ergänzend können biologische Abluftbehandlungskonzepte, wie Biofilter oder Kombinationen von Biowäschern und Biofiltern eingesetzt werden. Diese biologischen Systeme sind in der Lage, Gerüche weitgehend zu reduzieren. Sie weisen jedoch (je nach technischer Ausgestaltung) Defizite bei der Methanoxidation aufgrund der oft unzureichenden Verweilzeiten der Abluft in den Filtern auf, weshalb sie eher bei sehr geringen Methankonzentrationen eingesetzt werden sollten.

Aktive Belüftung ohne Ablufferfassung

Die Luftzufuhr in den Deponiekörper kann ohne eine parallele, aktive Ablufferfassung betrieben werden. In diesem Fall muss die Deponieabdeckung als biologische Filterschicht (Flächenbiofilter) fungieren, entweder in ihrem ursprünglichen Zustand oder nach Verbesserung ihrer biologischen Methanoxidationskapazität. Eine solche Deponiebelüftung ohne die Integration einer gleichzeitigen Ablufferfassung und -behandlung ist im kontinuierlichen Betrieb einfacher zu steuern, kann aber zu einer ggf. deutlich geringeren Emissionsminderung (im Vergleich zu kombinierten Systemen) im Bereich der Treibhausgase führen. Auch ist die Bilanzierung der Emissionsminderung im Zuge der Massnahme schwieriger und ggf. unzuverlässiger, da es keine Möglichkeit zur kontinuierlichen Erfassung der Abluftqualität (hinsichtlich der emittierten Methanfrachten) gibt. Die Belüftung kann sowohl durch ein System von vertikalen Gasbrunnen im Abfallkörper oder durch Luftinjektion in die ungesättigte Bodenzone oder eine etwaige Drainage unter den Abfällen erfolgen (Abbildung 3-4c). Im letzteren Fall fungiert der Boden bzw. die Drainageschicht als Luftverteilungsschicht mit dem Ziel einer gleichmäßigen Durchströmung der Abfälle von unten nach oben.

Bisher wurde dieses Verfahrenskonzept aufgrund der eingeschränkten Emissionserfassung und -kontrolle nur in wenigen Fällen eingesetzt.

*Luftzufuhr
ohne aktive
Ablufferfassung*

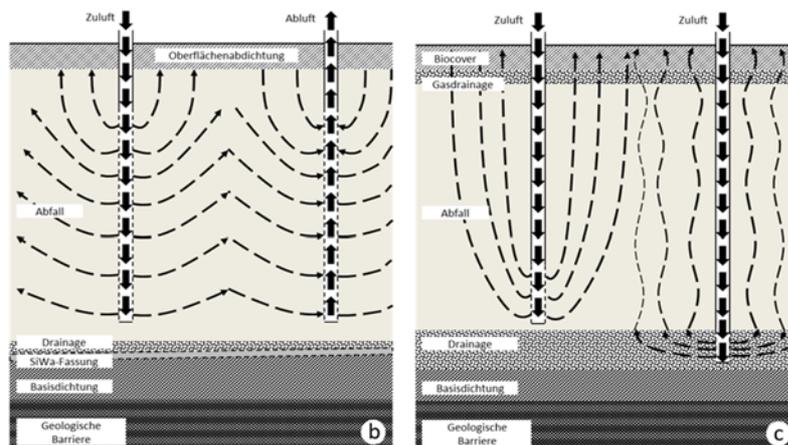


Abbildung 3-4 - Aerobisierungstechnik Niederdruckbelüftung mit (b, links) und ohne (c, rechts) Ablufferfassung.

3.5.3.

Übersaugung

Übersaugungskonzepte folgen dem Grundansatz der Belüftung durch eine indirekte bzw. passive Luftzuführung, d.h. die Zuführung von Umgebungsluft in den Deponiekörper erfolgt über die Oberfläche und ggf. ergänzend durch offene Gasbrunnen. Der Übersaugungseffekt ergibt sich durch die Einstellung erhöhter Absaugvolumina, die die Gasbildungsraten im Deponiekörper signifikant übersteigen und so einen höheren Unterdruck im Inneren des Deponiekörpers erzeugen. Die Gasbrunnen werden dazu bevorzugt erst in tieferen Abfallsschichten perforiert, um damit den Einflussradius der Übersaugung bzw. das beeinflusste Abfallvolumen zu vergrößern und Kurzschlussströmungen nahe der Deponieoberfläche zu vermeiden. Das abgesaugte Deponiegas bzw. Deponiegas-Luft-Gemisch wird i.d.R. mit Hilfe einer Schwachgasfackel oder einer RTO, in einigen Fällen auch eines Biofilters behandelt (Abbildung 3-5d).

Hinsichtlich der biologischen Stabilisierungsleistung sind zwei verschiedene Phasen des Konzepts zu unterscheiden. In der ersten Phase wird die erfasste Methanfracht im abgesaugten Deponiegas im Vergleich zur vorherigen Fracht bei normalem Absaugbetrieb erhöht. Die Wirkung wird dabei häufig durch die spezielle Gasbrunnenkonstruktion mit einem kurzen perforierten Endstück verbessert. Durch diesen Ansatz soll Deponiegas auch aus Zonen erfasst werden, die im regulären Entgasungsbetrieb ggf. nicht vollständig erreicht werden. In der zweiten Phase bei ggf. weiter gesteigertem Absaugvolumen ändert sich die Gaszusammensetzung zunehmend in Richtung reduzierter Methankonzentrationen durch Luftinfiltration über die Deponieoberfläche. Der gewünschte Aerobisierungseffekt tritt so sukzessive ein.

*Zuführung von
Umgebungsluft
über Oberflä-
che*



Zwei Phasen

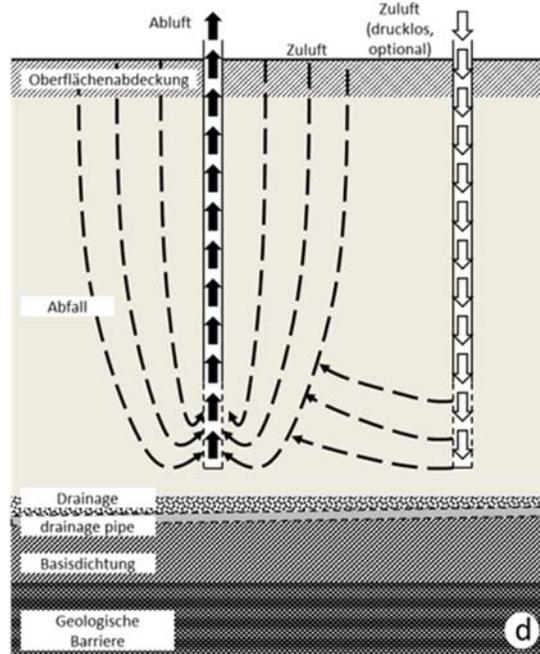


Abbildung 3-5- Aerobisierungstechnik Übersaugung (d).

Tabelle 3-3- Vor und Nachteile der Aerobisierungsverfahren

Verfahren	Voraussetzungen	Vorteile	Nachteile
Hochdruckbelüftung	I.d.R. nur vor einem Deponierückbau	Einsatz sowohl in stark als auch in schwach verdichteten Abfällen Kontrollierte Fassung der Abluft	Kosten, hoher technischer Aufwand, aufgrund kurzer Behandlungsdauer kein Einfluss auf Sickerwasserqualität
Niederdruckbelüftung mit Ablufferfassung	Keine besonderen Voraussetzungen, sehr flexibel einsetzbar	Flexibilität der Betriebsführung (Luft kann gezielt eingeleitet werden) Kontrollierte Fassung der Abluft	Ggf. etwas höher Aufwand in der Betriebsführung und Abluftreinigung (dafür jedoch kürzere Behandlungsdauer als bei Übersaugung)
Niederdruckbelüftung ohne Ablufferfassung	Nur einsetzbar, wenn unkontrollierte Gasmigration ausgeschlossen wird bzw. zu keiner Gefährdung führen kann	Reduzierter technischer Aufwand, da keine aktive Ablufferfassung	Emissionsminderung i.d.R. geringer als Niederdruckbelüftung mit Ablufferfassung Emissionserfassung und -kontrolle schwierig
Übersaugung	Anwendung bevorzugt bei geringem Abbaupotential und geringer Deponiemächtigkeit	Kontrollierte Fassung von Abluft	Massnahme dauert i.d.R. länger als bei aktiver Belüftung (Niederdruckbelüftung)



3.6. Nachweiskriterien zu Sanierungszielen

3.6.1. Nachweiskriterien zum Gashaushalt / Deponiegaspfad

Daten zum Gashaushalt

Über das Monitoringprogramm des Gashaushalts können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Feststellung von intensivierten oder beschleunigten biologischen Abbauprozessen. Zur Beurteilung kann wie erläutert der Kohlenstoffumsatz und -austrag im Belüftungs- und Ablufferfassungsbetrieb als Mass der Beschleunigung biologischer Abbauprozesse herangezogen werden.
- Feststellung der aktuellen Restgasemissionen und des Grades an biologischer Stabilisierung, d.h. Nachweis des emissionsarmen Deponiekörpers hinsichtlich der aktuellen Restgasemissionen.

Das zweite Kriterium soll die Qualität des biologisch stabilisierten Deponiekörpers im Hinblick auf die Restgasproduktion belegen und den Abschluss der Deponiebelüftungsmaßnahme sowie ggf. die Entlassung aus der Deponienachsorge begründen.

Erkenntnisse aus dem Monitoring

Kriterien der AltIV [12] für das Sanierungsziel Gas

Die Altlasten-Verordnung (AltIV [12]) definiert Kriterien zum Schutz vor Belastungen des Bodens (Art.12) und vor Luftverunreinigungen (Art.11). Als Sanierungsziel gilt demnach für die Porenluft einer Rekultivierungsschicht die Unterschreitung des einfachen Konzentrationswerts gemäss Anhang 3 AltIV [12] und die Vermeidung von Deponiegasemissionen an Orten, wo sich Personen regelmässig aufhalten können sowie übermässiger Immissionen im Sinne der Luftreinhalteverordnung.

Anhand von Daten aus Emissionsmessungen oder aus dem Monitoring des Gashaushalts lässt sich kein direkter Bezug zu den in der AltIV [12] bezüglich CH₄ in der Bodenluft vorgegebenen Sanierungszielen herstellen, da bezüglich Deponiegasproduktion und Bodenluftkonzentration keine verlässlicher, wissenschaftlicher Bezug hergestellt werden kann (Abhängigkeit der Deponiegasproduktion von den Umwelteinflüssen/Meteorologie sowie präferentiellen Gasaustritten /Hotspots).

Zum Abschluss der Deponiebelüftung und zur Entlassung aus der Nachsorge bzw. zur Erreichung der Sanierungsziele nach AltIV [12] sind die Methanemissionen mit ihrem Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt (noch) kein Kriterium zur Beurteilung des Gashaushalts.

Kriterien der VVEA [10] für das Sanierungsziel Gas

Das Sanierungsziel Gas kann mit dem Erreichen des Endes der Nachsorgephase bezüglich dem Gashaushalt der Deponie gleichgesetzt werden. Gemäss der VVEA [10] wird das Ende der Nachsorgephase dann erreicht, wenn von der Deponie keine schädlichen oder lästigen Einwirkungen auf die Umwelt mehr zu erwarten sind. Quantitative Vorgaben zu tolerierbaren Restgasemissionen werden keine gemacht.

Kriterien für das Sanierungsziel Gas in Anlehnung an die Vorschläge aus dem BMU UFOPLAN-Vorhaben [25]

Als Kriterium zur Einstellung der Deponiebelüftung und Umstellung auf passive Behandlung des Deponiegases sowie zur Erreichung der Sanierungsziele wird folgendes vorgeschlagen:

Deponiegasproduktion mit einem Methanvolumen $\leq 10 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$ für den gesamten Standort bzw. $\leq 2 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/(\text{h} * \text{ha})$.

In der Publikation aus dem Jahre 2006 (vgl. [25] BMU UFOPLAN-Vorhaben 2006) werden andere Kriterien erwähnt mit einem Abbruchkriterium bei einem Methanvolumen $\leq 25 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$ und $\leq 5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/(\text{h} * \text{ha})$. Da diese Werte letztlich immer noch recht hohe Methanemissionen erlauben bzw. diese als ökologisch vertretbar erscheinen lassen (was vor 15 Jahren noch etwas anders bewertet wurde als heute), werden die aktuellen Vorschläge auf 40% der damaligen Orientierungswerte reduziert. Alternativ kann auch auf die Publikation „Methanemissionen aus der Ablagerung von mechanisch-biologisch behandelten Abfällen“ (2012) verwiesen werden (vgl. [26]) wo auch das Abbruchkriterium bei einem Methanvolumen $\leq 5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/(\text{h} * \text{ha})$ vorgeschlagen wird.

*Kriterien für
das Sanie-
rungsziel ge-
mäss der AltIV*



carbotech
Umwelttechnik und Beratung

*Kriterien der
VVEA für das
Ende der
Nachsorge*

*Kriterien in An-
lehnung an
BMU UF-
OPLAN
Kriterium Sa-
nierungsziel als
tolerierbare
Restgas-Emis-
sion*

3.6.2.
Nachweiskriterien zum Wasserhaushalt / Sickerwasserpfad
Kriterien für das Sanierungsziel Sickerwasser

Für Deponien mit **kontrollierter Sickerwasserableitung** sind in der Schweiz die Mindestanforderungen gemäß der Gewässerschutzverordnung in Verbindung mit den Empfehlungen «Anforderungen an die Einleitung von Deponiesickerwasser» des BAFU 2012 (vgl. [2]) einzuhalten.

In Deutschland können Grenzkonzentrationen im Sickerwasser in Anlehnung an die Anforderungswerte des 51. Anhangs zur Abwasserverordnung, 2004 als ein Kriterium für den „umweltverträglichen“ Zustand einer Deponie und das Ende der Nachsorgephase gewählt werden.

Es sei an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen, dass die Betrachtung von Konzentrationen alleine häufig nicht zielführend ist, sondern eine Ergänzung um die Emissionsfrachten bestimmter Sickerwasserinhaltsstoffe (wie in [2] vorgeschlagen) – insbesondere für die älteren Ablagerungen – die Gefährdungsbeurteilung ergänzen sollte.

Für Altdeponierungen mit **unkontrollierter Sickerwasserfreisetzung** gelten die Kriterien der AltIV [12] und der Nachweis der Einhaltung der entsprechenden Konzentrationswerte im Sickerwasser bzw. im betroffenen Gewässer.

Wirkung von Aerobisierungsmassnahmen auf das Deponiesickerwasser

Allgemeingültige quantitative Erfolgskriterien zur Sickerwasserbeschaffenheit infolge von Aerobisierungsmassnahmen können nicht ohne weiteres abgeleitet werden, da der Wasserhaushalt von Altdeponien sehr unterschiedlich ist. Demnach ist es nicht möglich, Erfolgskriterien einer Deponiebelüftung bezüglich der Sickerwasserqualität zu definieren. Es wäre daher nicht zielführend, die Planung einer Deponiebelüftung hauptsächlich auf das Erreichen bestimmter Restbelastungen im Sickerwasser der Deponie auszurichten, obschon gerade dies in vielen Fällen der Auslöser für Sanierungsmassnahmen darstellt.

Die Deponiebelüftung leistet anhand von Laborversuchen zwar nachweisbar mit ihrer beschleunigenden Wirkung auf die biologischen Abbauprozesse einen Beitrag zur Verminderung der Sickerwasserbelastungen. Wie erwähnt, fehlen aber trotz mittlerweile zahlreicher Deponiebelüftungsmaßnahmen noch verallgemeinerbare Ergebnisse, in welchem Maße die Deponiebelüftung diese Entwicklung beschleunigt und welches Konzentrationsniveau sich zum Ende der Deponiebelüftung einstellen kann.

Eine ganze Reihe wissenschaftlicher Laboruntersuchungen zur Auswirkung der Belüftung auf die Sickerwasserqualität weisen auf deren positiven Einfluss hin (vgl. auch Präzisierungen in Kapitel 3.7), verdeutlichen zugleich aber auch die dafür notwendigen Voraussetzungen (Ritzkowski & Stegmann, 2007; Hrad et al., 2013; Brandstätter et al., 2015):

Beschleunigte Abnahme der Parameter CSB, BSB₅ und Stickstoff

Im Sickerwasserpfad tritt durch die Belüftung mit dem aeroben Abbau organischer Verbindungen und der Freisetzung in die Gasphase eine beschleunigte Abnahme der Parameter CSB und BSB₅ sowie des Stickstoffs (TKN bzw. NH₄-N) infolge von Nitrifikations- und Denitrifikationsprozessen auf. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass alle biologischen Umsetzungsprozesse organischer Substanz grundsätzlich über die flüssige Phase erfolgen, so dass Metabolite des Stoffwechsels (zumindest vorübergehend) immer auch im Sickerwasser nachgewiesen werden können. Wird nun dieser Stoffwechsel im Zuge der Belüftung

Deponien mit kontrollierter Sickerwasserableitung



carbotech
Umwelttechnik und Beratung

Altdeponierungen mit unkontrollierter Sickerwasserableitung

Sanierungsziel Altdeponien Wirkung Deponiebelüftung

Wissenschaftliche Erkenntnisse

Abbau organischer Inhaltsstoffe

intensiviert und beschleunigt, so ist auch mit dem Konzentrationsanstieg einiger Substanzen im Sickerwasser zu rechnen. Darüber hinaus kommt es durch die Veränderung der Druckverhältnisse sowie der Sickerwasserfließwege im Deponekörper stets auch zur Mobilisierung von Flüssigkeiten, welche unter den relativ statischen Bedingungen vor dem Beginn der Belüftung nicht oder nur sehr zeitverzögert ausgetragen worden wären.

Einfluss der Belüftungsrate auf die CSB-Konzentration

Anhand von Deponiesimulationsversuchen konnte exemplarisch gezeigt werden, dass es bei einer Belüftungsrate von $0.0125 \text{ m}^3 / (\text{t TM} \cdot \text{h})$ zu einer Reduzierung der organischen Sickerwasserbelastungen kommt. Innerhalb von 5 Monaten kontinuierlicher Belüftung verringerte sich die CSB-Konzentration um ca. 70%. Eine Verdoppelung der Belüftungsrate auf $0.025 \text{ m}^3 / (\text{t TM} \cdot \text{h})$ führt hierbei lediglich zu einer geringfügigen Steigerung der Konzentrationsabnahme auf 78% im gleichen Betrachtungszeitraum.

Zeitlich Verzögerte Wirkung auf die Ammonium-Stickstoff-Belastung

Deutliche Unterschiede lassen sich demgegenüber bei der Betrachtung der Ammonium-Stickstoff-Belastung im Sickerwasser belüfteter Deponiesimulationsreaktoren erkennen. Aufgrund der längeren Adaptionszeit der ammoniumoxidierenden Mikroorganismen sowie des höheren Bedarfs an gelöstem Sauerstoff setzt der Rückgang der Ammoniumkonzentrationen (im Vergleich zu den CSB-Konzentrationen) signifikant später ein, und es zeigt sich darüber hinaus eine deutliche Abhängigkeit von der eingestellten Belüftungsrate (Ergebnisse aus Deponiesimulationsversuchen siehe Kapitel 3.7.3).

Unter Berücksichtigung der um mindestens eine Größenordnung geringeren Belüftungsintensität bei großtechnischen Projekten ist damit zu rechnen, dass es erst nach einer relativ langen Lag-Phase von ggf. mehreren Jahren zu einem deutlichen Rückgang der gesamten Ammoniumkonzentrationen im Sickerwasser kommen wird. Hierbei spielen auch geringere Belüftungsintensitäten in tieferen Deponiezonen (geringere Permeabilität aufgrund höherer Auflasten) oder gänzlich fehlende Sauerstoffzufuhr bei vollständiger Porenwassersättigung eine Rolle.

Folgerungen für die Praxis

Hieraus folgt, dass das Ziel einer Verbesserung der Sickerwasserqualität ggf. nur durch eine intensivere Belüftung porenwassergesättigter, tieferer Ablagerungshorizonte erreicht werden kann. Erfahrungen zeigen, dass dieses mit angepassten, tiefenzonierten Belüftungsbrunnen und/oder höheren Belüftungsdrücken möglich ist. So konnte beispielsweise an einer schweizerischen Deponie im Kanton Bern das Einblasen von Luft in Abfallschichten in einer Tiefe von 50 bis 55 Metern durch Einsatz von speziellen Aggregaten und Überdrücken von bis zu 650 mbar realisiert werden (Energiebedarf in diesem Fall allerdings deutlich höher).

Da zur Implementierung und den Auswirkungen der Tiefenbelüftung bisher nur wenige Erfahrungen vorliegen, wird empfohlen, ein derartiges Vorgehen zuerst als Pilotvorhaben mit einer qualifizierten wissenschaftlichen Begleitung auszuführen und auszuwerten. Auf dieser Grundlage können dann zukünftig allgemeingültigere Empfehlungen abgeleitet werden. Übersaugungsverfahren kommen dafür eher nicht in Betracht, weil die Sauerstoffversorgung in den tieferen Deponiebereich nicht hinreichend gewährleistet werden kann.

*Einfluss der
Belüftungsrate*

*Rückgang der
Ammoniumbe-
lastungen*

*Tiefenbelüftung
mit erhöhten
Belüftungsdrü-
cken*

Pilotprojekte



3.6.3.**Nachweiskriterium zur Temperaturentwicklung im Deponiekörper**

Im Gegensatz zu biologischen Stoffwechselreaktionen im anaeroben Milieu wird im Zuge des aeroben Katabolismus ein Großteil der Reaktionsenthalpie als Wärme freigesetzt. Während der Deponiebelüftung kommt es daher zu einer Temperaturerhöhung des Deponiekörpers, einhergehend mit dem beschleunigten Abbau der biologisch verfügbaren organischen Substanzen der abgelagerten Abfälle. Aufgrund der sehr geringen Wärmeleitfähigkeit der Abfälle in Verbindung mit einer Oberflächenabdeckung/-abdichtung des Deponiekörpers wird die Wärmeenergie nur langsam in die Umgebung abgeführt, so dass auch nach Beendigung der Belüftung die Temperaturen über längere Zeiträume auf einem erhöhten Niveau verbleiben können.

Die Messungen zur Temperaturentwicklung im Deponiekörper können in Gasbrunnen, in Beobachtungspegeln zwischen den Gasbrunnen und in der erfassten Abluft erfolgen.

Quantitative Kriterien zu den Temperaturen sind nicht unmittelbar ableitbar, da sie nicht nur eine Frage der Intensität aerober Abbauprozesse, sondern z.B. auch der Ablagerungsmächtigkeit sind. Als ergänzendes Kriterium sollten zum Abschluss der Deponiebelüftung die durchschnittlichen Temperaturen wieder eindeutig abnehmen und sich möglichst in den Bereich der Ausgangstemperaturen vor der Belüftung bewegen (Temperaturabnahme nach Abschluss der Belüftung < 5 – 10°C).

Wärmeenergie*Messungen**Temperaturentwicklungen***3.6.4.****Nachweiskriterium zu den Setzungen des Deponiekörpers**

Quantitative Kriterien zu den Setzungen sind nicht unmittelbar, sondern nur standortspezifisch ableitbar. Infolge des beschleunigten Abbaus biologisch verfügbarer organischer Substanz im Deponiekörper treten im Zuge von in situ Belüftungsmaßnahmen in der Regel nochmals signifikante Setzungen auf. Das Maß der Setzungen (Setzungsgeschwindigkeit, d.h. Höhenänderung pro Zeiteinheit) stellt folglich einen weiteren, indirekten Parameter zur Beurteilung des Stabilisierungsfortschrittes dar.

*Setzungsgeschwindigkeit**Setzungsgeschwindigkeit*

3.7. Verminderung der Emissionen aus dem Sickerwasserhaushalt

3.7.1. Zusammenfassung zu Laborversuchen zur Deponiebelüftung und Schlussfolgerungen

Wesentliche Parameter zur Beurteilung der Sickerwasserqualität belüfteter Siedlungsabfalldeponien sind der organische Kohlenstoff (TOC oder DOC, ggf. auch Angabe des CSB) sowie Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$). Beide Inhaltsstoffe zeigen unter anaeroben Deponiebedingungen nur sehr langsame Konzentrationsabnahmen, weshalb sie das langfristige Emissionsverhalten solcher Deponien und damit die notwendigen Aufwendungen im Zuge der Deponienachsorge maßgeblich bestimmen. Demgegenüber können die Konzentrationen beider Inhaltsstoffe unter aeroben (belüfteten) Bedingungen schneller und weitgehender abnehmen, da sich der mikrobiologische Stoffumsatz signifikant beschleunigt und (insbesondere im Bereich der organischen Abfallbestandteile) ausweitet.

Vor diesem Hintergrund wurden in der Vergangenheit umfangreiche Untersuchungen unter „simulierten“ Deponiebedingungen an verschiedenen Forschungseinrichtungen durchgeführt. An der TU Hamburg wurden hierfür in so genannten „Deponiesimulationsreaktoren“ (DSR) u.a. Abfälle eingesetzt, die zuvor aus einer Schweizer Deponie im Kanton Bern entnommen wurden. Ziel der Untersuchungen war es, sowohl das Emissionsverhalten unter anaeroben und aeroben Bedingungen zu ermitteln als auch mögliche Einflussfaktoren zu bestimmen, die bei der Übertragung der Ergebnisse der DSR-Laborversuche in die großtechnische Belüftung eine Rolle spielen können.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind aufschlussreich und wurden bereits an verschiedenen Stellen publiziert [Ritzkowski et al., 2016; Ritzkowski und Kuchta, 2018; Brandstätter et al., 2018 – vgl. [30], [31], [27]]. Im Labormassstab zeigt sich deutlich, dass Veränderungen der Sickerwasserqualität insbesondere von der Belüftungsintensität sowie dem Temperaturniveau bestimmt werden. Bei grossmassstäblichen Belüftungsmassnahmen auf Altdeponien sind diese Auswirkungen der Belüftung auf die Sickerwasserbeschaffenheit allerdings bisher nur sehr eingeschränkt zu erkennen.

3.7.2. Einfluss der Temperatur auf die Sickerwasserqualität

Unter dem Einfluss der Belüftung wird der Großteil der in der organischen Substanz der Abfälle enthaltenen Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben. Steigen die Temperaturen im Deponiekörper an, so weichen die zeitlichen Verläufe der organischen Summenparameter und des Stickstoffs im Sickerwasser signifikant von denen bei einem niedrigeren Temperaturniveau, welches in anaeroben Deponien vorliegt, ab. Infolge der gesteigerten Ammonifikationsraten bei höheren Temperaturen steigt der pH-Wert in den alkalischen Bereich (Bildung von Hydroxidionen bei der Lösung des Ammoniaks in Wasser), begleitet von einem Konzentrationsanstieg des Ammoniumstickstoffs sowie des TOC. Gleichzeitig verschiebt sich das Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht bei steigenden pH-Werten und hohen Temperaturen in Richtung Ammoniak. (Bei 40°C und pH 8 ist das Verhältnis NH_4/NH_3 ca. 90/10; bei Anstieg auf pH 9 liegt das Verhältnis bei ca. 50/50). Darüber hinaus kommt es unter dem Einfluss der erhöhten Temperaturen zu einer Hemmung der Nitrifikation, welche durch die steigenden Ammoniakkonzentrationen als Folge des sich verschiebenden Ammonium-Ammoniak-Gleichgewichtes weiter verstärkt wird. Kim et al. (2006 [28]) berichten, dass Ammoniakkonzentrationen von 78 mg/l die Ammoniumoxidation

Belüftung erhöht Temperatur



hemmen (Nitritbildung), während die weitere Oxidation des Nitrits zu Nitrat bereits bei NH₃-N Konzentrationen zwischen 14 und 17 mg/l gehemmt wird.

Ein weiterer Einflussfaktor bezüglich der reduzierten Nitrifikationsaktivität sowie der geringeren Umsatzraten organischer Komponenten ist der geringere Gehalt an gelöstem Sauerstoff im Sickerwasser. Im Vergleich zum Sickerwasser bei 36°C lösen sich infolge steigender Temperaturen auf z.B. 45°C bzw. 55°C etwa 21% bzw. 37% weniger Sauerstoff im Sickerwasser. Dieses könnte insbesondere für den Bereich der mikrobiellen Nitrifikanten von Bedeutung sein, da die Nitrifikation nach dem Abbau der gelösten bioverfügbaren organischen Substanzen erfolgt und die Nitrifikanten folglich in Sauerstoffkonkurrenz mit den organotrophen Mikroorganismen stehen (vgl. Abbildung 3-6).

Reduzierte Nitrifikationsaktivität

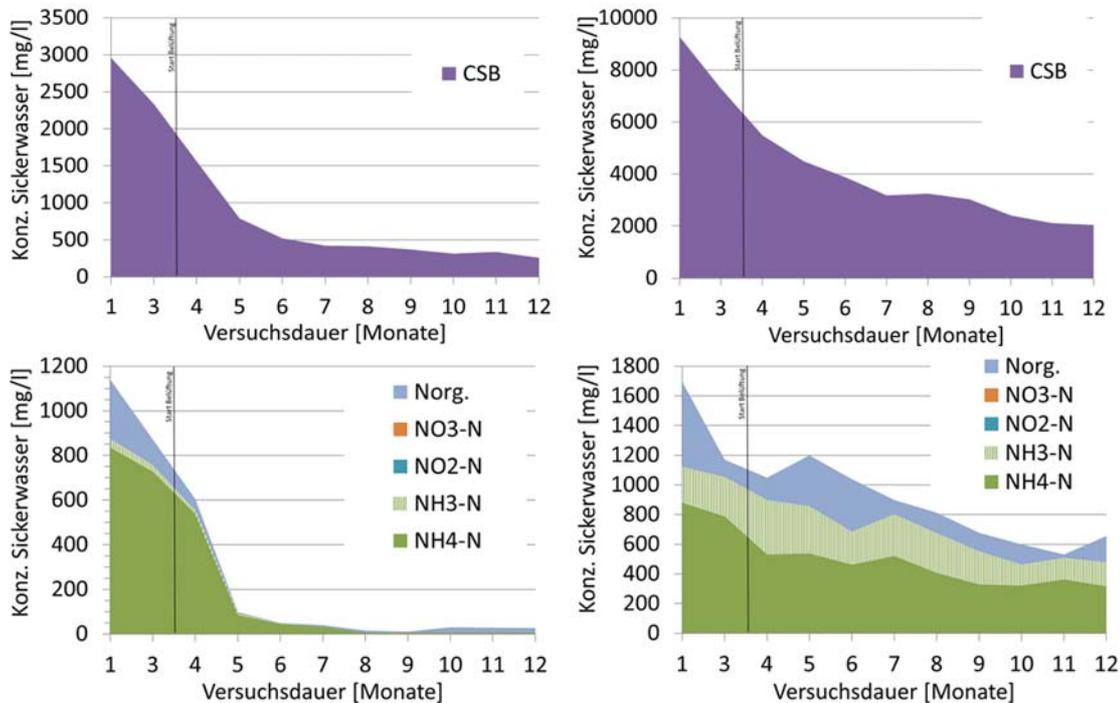


Abbildung 3-6- Ganglinien unterschiedlicher Sickerwasserinhaltsstoffe in „Deponiesimulationsreaktoren“ bei unterschiedlichen Temperaturen (links: 36°C; rechts: 66°C)

3.7.3.

Einfluss der Belüftungsintensität auf die Sickerwasserqualität

Wie im Kapitel 3.6.2 erwähnt, konnte in Deponiesimulationsversuchen gezeigt werden, dass eine Belüftungsrate von 0,0125 m³/ (t TM*h) zu einer unmittelbaren und sehr weitgehenden Reduzierung der organischen Sickerwasserbelastungen (hier: CSB) führt. Innerhalb von 5 Monaten kontinuierlicher Belüftung verringerte sich die CSB-Konzentration um ca. 70%. Eine Verdoppelung der Belüftungsrate auf 0,025 m³/ (t TS*h) führt hierbei lediglich zu einer geringfügigen Steigerung der Konzentrationsabnahme um dann 78% im gleichen Betrachtungszeitraum.

Reduktion organischer Sickerwasserbelastung

Deutliche Unterschiede lassen sich demgegenüber bei der Betrachtung der Ammonium-Stickstoff-Belastung im Sickerwasser belüfteter Deponiesimulationsreaktoren erkennen. Aufgrund der längeren Adaptionzeit der ammoniumoxidierenden Mikroorganismen sowie des höheren Bedarfs an gelöstem Sauerstoff setzt der Rückgang der Ammoniumkonzentrationen im Vergleich zu den CSB-Konzentrationen signifikant später ein, und es zeigt sich darüber hinaus eine deutliche Abhängigkeit von der eingestellten Belüftungsrate. So reduziert

Ammonium-Stickstoffbelastung

sich die $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentrationen unter starker Belüftung (d.h. $0,025 \text{ m}^3/\text{t TM}^*\text{h}$) erst mit einer 5-monatigen Verzögerung während sich bei geringerer Belüftungsintensität (d.h. $0,0125 \text{ m}^3/\text{t TM}^*\text{h}$) diese Lag-Phase auf ca. 10 Monate in etwa verdoppelt. Die Geschwindigkeit der Konzentrationsabnahme wird jedoch nur geringfügig beeinflusst (vgl. Abbildung 3-7).

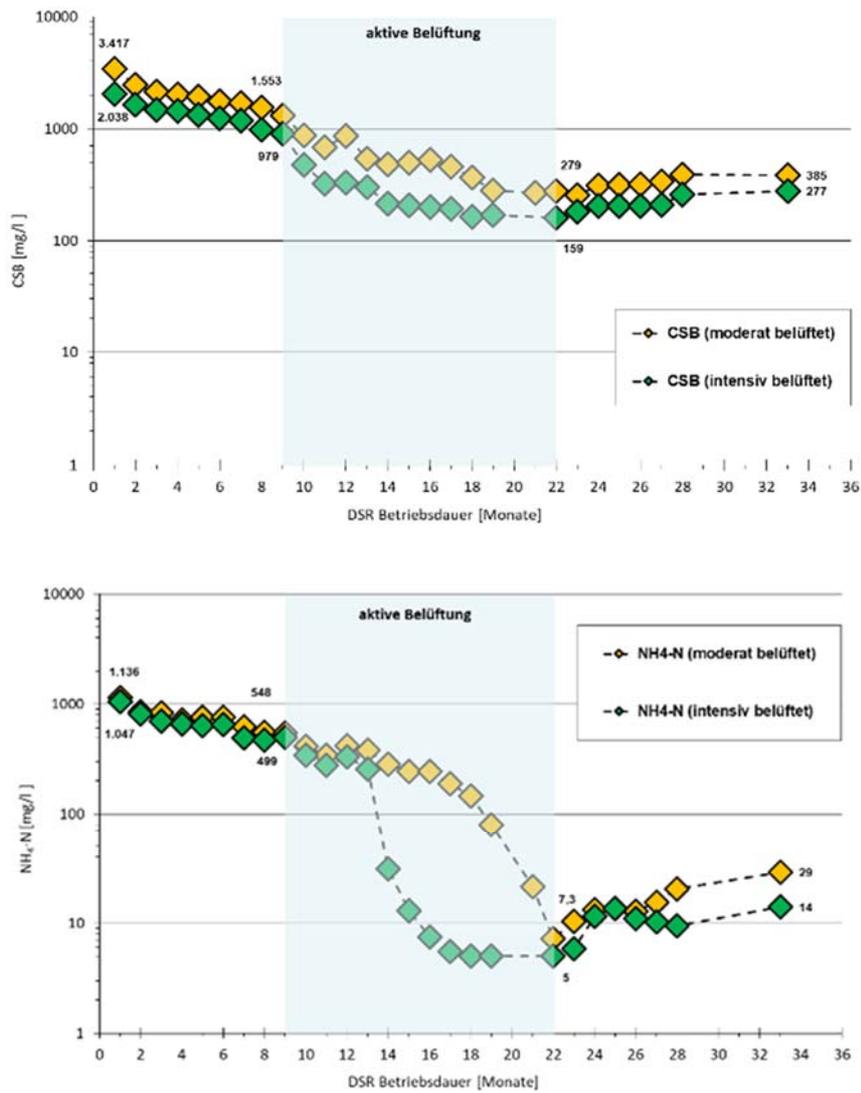


Abbildung 3-7- Ganglinien organischer Sickerwasserbelastungen (CSB, oben) und anorganischer Stickstoffbelastungen ($\text{NH}_4\text{-N}$, unten) unter dem Einfluss unterschiedlicher Belüftungsintensitäten (moderat = $0,0125 \text{ m}^3/\text{t TM}^*\text{h}$; intensiv = $0,025 \text{ m}^3/\text{t TM}^*\text{h}$)



3.7.4.
Übertragung der Ergebnisse: Veränderungen der Sickerwasserqualität unter dem Einfluss der Belüftung in realen Deponien

Mit den Erkenntnissen aus den Deponiesimulationsversuchen kann eine Beurteilung der Ergebnisse, die an realen Deponien im Zuge von Belüftungsmaßnahmen gewonnen wurden, vorgenommen werden. Hierbei werden insbesondere folgende Aspekte betrachtet:

- a. Welches Verhältnis weisen die Belüftungsraten auf Deponien verglichen mit denen in den Deponiesimulationsversuchen auf?
- b. Lassen sich ggf. Einflüsse der steigenden Deponietemperaturen anhand der Sickerwasserqualitäten erkennen?
- c. Gibt es ggf. noch weitere Einflussfaktoren, die in den Untersuchungen mit den Deponiesimulationsreaktoren noch nicht oder aber unzureichend betrachtet bzw. erkannt wurden?

In Bezug auf die Belüftungsraten wurden zum einen unterschiedliche Projekte in Deutschland, Österreich, Italien und Japan betrachtet (Ritzkowski und Stegmann, 2013 [29]). Die Datenanalyse zeigt, dass großtechnische Belüftungsprojekte mit einer durchschnittlichen Belüftungsintensität von $0,005 \text{ m}^3/(\text{t TM}^*\text{h})$ etwa den Faktor 7 niedriger liegen, als Simulationsversuche mit einer durchschnittlichen Belüftungsintensität von $0,033 \text{ m}^3/(\text{t TM}^*\text{h})$.

Zum anderen kann die Belüftungsrate der Modeldeponie im Rahmen der vorliegenden Expertise zur Einordnung der Ergebnisse herangezogen werden. Gemäss Anhang A3 der Studie werden in Anlehnung an bisherige Erfahrungen zur Belüftung von Deponien Belüftungs- und Absaugraten von $490 - 650 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einer Abfallmasse von $450'000 \text{ t TM}$ angesetzt. D.h. die stündliche Belüftungsrate liegt bei $0,00109 - 0,00144 \text{ m}^3/(\text{t TM}^*\text{h})$. Je nachdem welche der o.g. Belüftungsraten aus den Deponiesimulationsreaktoren herangezogen werden, ergibt sich ein Verhältnis zur Luftzugabe bzw. Sauerstoffversorgung von ca. 10 bis 25 zu 1. Daher wird erklärbar, dass die (angestrebten) Reduzierungen der Sickerwasserbelastungen auf belüfteten Altdeponien erst sehr viel später eintreten können als im Laborversuch. Alle bisherigen Erfahrungen an belüfteten Deponien und Altablagerungen bestätigen diesen Sachverhalt.

Übertragen auf die zu erwartende Entwicklung der Sickerwasserqualität an realen, belüfteten Deponien bedeutet dies, dass erst mit einer deutlichen zeitlichen Verzögerung bzw. nach einer entsprechend langen Belüftungsdauer mit abnehmenden Konzentrationen zu rechnen ist.

In Bezug auf die Temperaturen der belüfteten Abfälle ist ferner festzuhalten, dass die überwiegende Anzahl der Deponiesimulationsversuche bei einem konstanten Temperaturniveau von 35°C durchgeführt wurde, während sich bei den realen Belüftungsprojekten häufig höhere Temperaturen von z.B. 43°C und in der Spitze bis zu 70°C eingestellt haben.

Übertragen auf die zu erwartende Entwicklung der Sickerwasserqualität an realen, belüfteten Deponien bedeutet dieses, dass bestimmte Umsetzungsprozesse wie z.B. die Nitrifikation temperaturbedingt deutlich langsamer ablaufen werden und es ggf. zur Abnahme der Stoffwechselintensität infolge geringerer Konzentrationen an gelöstem Sauerstoff kommen kann.

Weitere Einflussfaktoren, die im Rahmen der Deponiesimulationsversuche nicht oder nur unzureichend nachgebildet werden können, sind insbesondere die auflastbedingten längeren Aufenthaltszeiten des Sickerwassers in tiefen Deponiebereichen (infolge der geringeren hydraulischen Permeabilität) sowie die dort

*Betrachtete
Aspekte bei re-
alen Deponien*



carbotech
Umwelttechnik und Beratung

*Erkenntnisse
Belüftungs-
intensität bei rea-
len Deponien*

Belüftungsrate

*Zeitliche Verzö-
gerung*

*Temperaturun-
terschiede*

*Nitrifikation
langsamer*

*Einfluss Sätti-
gung*

(häufig) anzutreffende vollständige Sättigung (= Wassereinstau) des Porenraums.

Übertragen auf die zu erwartende Entwicklung der Sickerwasserqualität an realen, belüfteten Deponien bedeutet dieses, dass Verbesserungen der Sickerwasserqualität in den höheren Abfallschichten ggf. bei Eintritt in die Entwässerung (Drainage) am Deponiefuss infolge der Passage durch die eingestaute Zone analytisch nicht mehr nachvollzogen werden können. Insgesamt führt auch dies zu einer Verzögerung der Abnahme an organischen und stickstoffhaltigen Verbindungen im Sickerwasser.

Einfluss eingestaute Zone



3.7.5.

Untersuchungsergebnisse an einer Schweizer belüfteten Deponie

Für eine Schweizer Deponie im Kanton Bern wurden Analysen verschiedener Sickerwasserinhaltsstoffe vor und während der noch andauernden Belüftung durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analysen bestätigen in weiten Teilen die Annahmen und Erkenntnisse, die sich aus den Simulationsversuchen sowie der Betrachtung der wesentlichen Einflussfaktoren bei realen Deponien ableiten lassen bzw. auf weiteren Deponien und Altablagerungen festgestellt wurden.

Versuch in der Schweiz

Hinsichtlich der organischen Sickerwasserbelastungen zeigte sich innerhalb der ersten 4 Jahre der Belüftung eine Situation, die auf intensivierte biologische Umsetzungsprozesse der organischen Abfallbestandteile insbesondere in den jüngeren Abfallbereichen hindeuten (Abbildung 3-8). Da diese Prozesse, auch aufgrund der genannten geringeren Belüftungsintensitäten noch andauern, lassen sich bisher noch keine wesentlichen Verbesserungen der Sickerwasserqualität erkennen.

Erkenntnisse Sickerwasserqualität

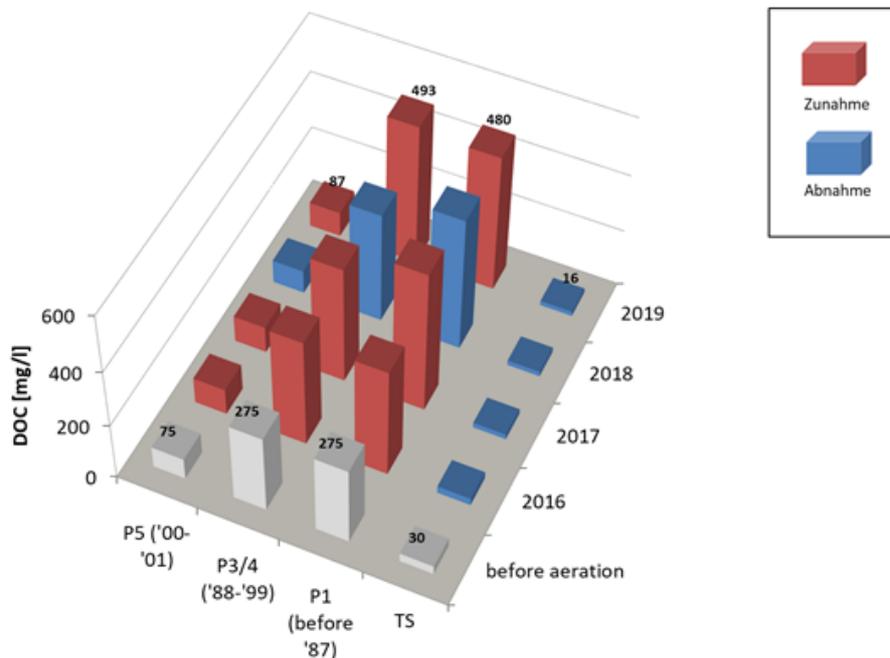


Abbildung 3-8- Veränderungen der organischen Sickerwasserbelastungen (als DOC) in unterschiedlichen Sickerwasserfassungen (P1, P3/4, P5 und Talsohle (TS); Zahlen in Klammern beziehen sich auf die Ablagerungsjahre der Abfälle) vor und während einer mehrjährigen Belüftung.

Hinsichtlich der anorganischen Stickstoffbelastungen (NH₄-N) zeigt sich im gleichen Zeitraum zunächst eine kurze aber deutliche Zunahme der Konzentrationen im gesamten Deponiekörper, bevor die Konzentrationen innerhalb der folgenden drei Jahre auf Werte knapp unterhalb der Ausgangskonzentrationen abfallen (Abbildung 3-9). Dieser Verlauf kann dahingehend interpretiert werden, dass eine verstärkte Stickstoffmobilisierung in den Sickerwasserpfad aufgrund des beschleunigten Abbaus der bioverfügbaren Organik auftritt. In der Folge werden Ammonifikationsprozesse intensiviert, zugleich aber auch Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse etabliert, so dass es zu einer beginnenden Verringerung der NH₄-N-Konzentrationen im Sickerwasser kommt.

Verlauf Anorganische Stickstoffbelastungen

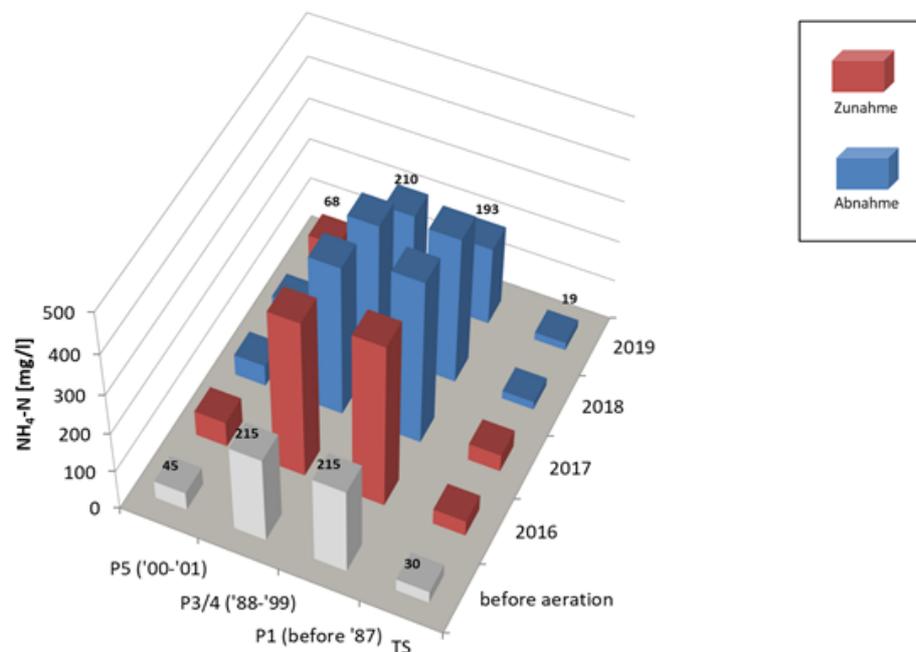


Abbildung 3-9- Veränderungen der Stickstoffbelastung (als NH₄-N) in unterschiedlichen Sickerwasserfassungen (P1, P3/4, P5 und Talsohle (TS); Zahlen in Klammern beziehen sich auf die Ablagerungsjahre der Abfälle) vor und während einer mehrjährigen Belüftung.

3.7.6.

Fazit zur Entwicklung der Sickerwasserqualität in belüfteten Deponien

Die Belüftung einer (überwiegend) mit Siedlungsabfällen verfüllten Deponie führt zu einer Intensivierung des mikrobiellen Stoffumsatzes der (noch in den Abfällen verbliebenen) organischen Bestandteile. Die Intensität dieser Prozesse hängt massgeblich von der Menge des verfügbaren Sauerstoffs ab, der mit der Luft in die Abfälle eingeblasen wird. Gleichzeitig wird (im Gegensatz zum anaeroben Stoffwechsel) ein Großteil der Energie aus den organischen Abfällen in Form von Wärme freigesetzt, was zu einem Anstieg der Temperaturen im Deponiekörper führt.

Intensivierung mikrobiellen Stoffumsatzes

Die Auswirkungen der Belüftung auf einen beschleunigten Abbau organischer Inhaltsstoffe sind eindeutig quantifizierbar und an zahlreichen Deponien eindeutig nachgewiesen. Weitgehend abgebaute organische Bestandteile in den Abfällen führen bei einer sehr intensiven Belüftung allmählich auch zu einer geringeren Belastung im Deponiesickerwasser. Vor dem Erreichen dieses Zustandes ist jedoch aufgrund der intensivierten Umsetzung bzw. Stoffmobili-

Auswirkung Belüftung auf Deponiegas quantifizierbar



sierung in den Wasserpfad mit z.T. höheren Konzentrationen im Sickerwasser zu rechnen. Die Dauer dieser Phase mit erhöhten Konzentrationen hängt von den o.g. Prozessen und Deponiebelüftungsraten ab und wird darüber hinaus durch weitere, deponiespezifische Bedingungen (z.B. Wassereinstau in den tieferen Schichten) beeinflusst. Veränderungen im Deponiesickerwasser bedingt aussagekräftig

Vor diesem Hintergrund können Deponiesimulationsversuche wichtige Hinweise auf die langfristig erreichbare Qualität des Deponiesickerwassers liefern. Bezüglich der temporären Veränderungen während und unmittelbar nach der Belüftung sind die Ergebnisse aufgrund der, gegenüber In-Situ-Bedingungen, deutlich unterschiedlichen Belüftungsraten jedoch nur bedingt aussagekräftig, wobei die Ergebnisse der bisher publizierten Deponiesimulationsversuche signifikant variieren. Der Vergleich mit Überwachungsdaten von realen, belüfteten Deponien deutet darauf hin, dass die Zeiträume bis zum Erreichen einer ausreichenden Sickerwasserqualität bei den gewählten Belüftungsraten voraussichtlich viele Jahre betragen können.

Sofern eine wesentliche Verbesserung der Sickerwasserbeschaffenheit belüfteter Altdeponien in überschaubaren Zeiträumen erreicht werden soll, wird empfohlen, eine angepasste Belüftungstechnik und –strategie hinsichtlich erhöhter Belüftungsvolumina zur intensiven Sauerstoffversorgung insbesondere auch der tieferen ggf. porenwassergesättigten Deponiehorizonte zu wählen. Erste Maßnahmen in diese Richtung sollten als Pilotvorhaben mit einer qualifizierten wissenschaftlichen Begleitung durchgeführt werden.

Belüftungsstrategie



carbotech
Smartcapex and Beyond

4. Sanierungsvarianten für vier Szenarien von Siedlungsabfalldeponien

4.1. Definition der zu untersuchenden Sanierungsvarianten

Wie eingangs erwähnt, geht es bei der vorliegenden Expertise um die Beurteilung und den Vergleich der Effektivität gemäss AltIV [12] von verschiedenen Sanierungsvarianten von Altdeponien. Als Modellannahme wird eine klassische Siedlungsabfalldeponie der 80er-Jahre mit einem Deponievolumen von 500'000 m³ und unterschiedlichem organischem Restanteil vorgegeben. Zeitpunkt der Untersuchungen und Beginn von Sanierungsmassnahmen: 2020. Für die nachfolgenden Sanierungsvarianten soll die Effektivität gemäss AltIV untersucht werden.

1. Status Quo: Die Deponie wird ab 2020 sich selbst überlassen und die biologische Umsetzungsprozesse klingen über die nächsten 50 Jahre allmählich ab.
2. Totaldekontamination: Die Deponie wird ausgehoben, die Abfälle triagiert, transportiert, behandelt und extern entsorgt. Die brennbaren Anteile werden in einer KVA thermisch verwertet und die restlichen Abfälle gelangen in Schweizer Oberflächendeponien (Typ B und Typ E).
3. Aerobisierung (Niederdruckbelüftung): Der Deponiekörper wird belüftet und die Deponiegase gefasst und behandelt (mittels Gasfackel, soweit brennbar und mittels katalytischer Oxidation bzw. autothermer Hochtemperaturoxidation). Die Niederdruckbelüftung bringt die für die Durchführung von Aerobisierungsmassnahmen bei unterschiedlichen organischen Anteilen erforderliche Einsatzflexibilität und Anpassungsfähigkeit, welche beispielsweise bei einer reinen Übersaugung stark eingeschränkt sein kann (vgl. Kapitel 3.5).
4. Aktive Entgasung ohne Aerobisierung: Der Deponiekörper wird aktiv entgast und die Deponiegase gefasst und behandelt (mittels Gasmotors (nur bei sehr hoher Restgasproduktion) oder Gasfackel, soweit brennbar und mittels katalytischer Oxidation bzw. autothermer Hochtemperaturoxidation).

4.2. Definition der Beurteilungskriterien

Im Sinne von AltIV Art. 18 werden die vorgeschlagenen Sanierungsvarianten nach den folgenden Kriterien beurteilt:

- *Die Auswirkungen der Massnahmen auf die Umwelt:* Vergleich der Massnahmen mit einer anerkannten Ökobilanz und Carbon-Footprint-Analyse. Als Bewertungsmethode wird die UBP-Methode 21 (vgl. [8]) unter Berücksichtigung von GWP 100a und der Datenbank UVEK: 2018 (vgl. [9]) verwendet.
- *Die langfristige Wirksamkeit der Massnahmen:* Prognose und Vergleich des Emissionsverhaltens ab 2020 während den nachfolgenden ca. 60 Jahren.
- *Gefährdung der Umwelt durch den belasteten Standort vor und nach der Sanierung:* Wirkung der Sanierungsmassnahmen auf den Gashaushalt der Deponie, Nachweis erreichter Sanierungsziele. Eine Bewertung der Sanierungsmassnahmen auf die Emissionen von Deponiesickerwasser lässt sich für Aerobisierungen nicht anhand eines quantitativen Kriteriums vornehmen (vgl. Kapitel 3.7).

Übersicht Sanierungsvarianten



carbotech
Innovations and Research

Beurteilungskriterien

- *Beurteilung der Kontrollierbarkeit der Massnahmen, die Möglichkeit zur Mängelbehebung sowie die finanziellen Auswirkungen auf die Deponienach-sorge (Unterhalt und Überwachung nach Abschluss der Massnahmen):* Beschreibung der jeweiligen technischen Massnahmen und des Überwachungskonzeptes. Abschätzung der pro Sanierungsvariante zu erwartenden Nachsorgekosten (für die Sanierungsvariante Totaldekontamination natürlich nicht relevant).

4.3.

Modellannahmen für die Deponie

Für alle Sanierungsvarianten wird von folgenden Modellannahmen für die Deponie ausgegangen:

- Siedlungsabfalldeponie der 80er-Jahre mit einem Volumen von 500'000 m³ (entspricht ca. 600'000 t Feuchtmasse resp. 450'000 t TM bzw. einer Fläche von 6.5 ha bei einer Ablagerungsmächtigkeit von bis zu 15 m.
- Die Siedlungsabfallablagerungen sind zum Zeitpunkt der Untersuchungen (im Jahr 2020) bereits mehrere Jahrzehnte abgeschlossen.
- Der organische Restanteil wird für 3 Szenarien über den biologisch abbaubaren Anteil Kohlenstoff (C_{bio}) pro Tonne Abfall definiert. Die Deponiegasproduktion in Abhängigkeit vom bioverfügbaren Kohlenstoff wird nach der IPCC-Methode berechnet (vgl. [5], [6]). Die Zusammensetzung der Abfälle basiert auf den Ergebnissen der Abfallerhebung des Bundesamtes für Umweltschutz von 1984/87 (vgl. [7]). Bezüglich der Halbwertszeiten wurde der Vorschlag für den modifizierten Ansatz aus dem IPCC Modell (vgl. [5] und [6]) übernommen.
- Die Sickerwasserrate beträgt 30% des Jahresniederschlages von ca. 1 m³/m² (durchschnittlicher Jahresniederschlag in der Schweiz zwischen 0.9 bis 1.2 m³/m²).
- Das Deponiesickerwasser wird nicht erfasst - Es ist davon auszugehen, dass die Modelldeponie keine Sohlenabdichtung aufweist.
- Die Deponie hat eine konventionelle Oberflächenabdeckung (k-Wert = 1*10⁻⁵ m/s) und ist rekultiviert.
- Als Schutzgut sind vor allem Oberflächengewässer und Luft (Gasaustritt) massgebend – nicht betroffen ist das Grundwasser, da der Modellstandort ausserhalb von Grundwasservorkommen liegt.
- Auf der Deponie sind bisher noch keine Installationen für die Erfassung und Behandlung von Deponiegas vorhanden, diese werden für die Sanierungsvarianten 3 und 4 neu installiert.
- Eine Methanoxidation in der Rekultivierung wird nicht berücksichtigt unter der Annahme, dass keine durchlässige Drainage- resp. Gasverteilungsschicht eingebaut und die Rekultivierung mit geringer Mächtigkeit ausgeführt wurde. In der IPCC-Methodik wird ein Faktor OX von 0,9 bzw. 10% als Mindestwert der «natürliche» Methanoxidation» vorgeschlagen. Aus den erwähnten Gründen wird im vorliegenden Fall keine Methanoxidation berücksichtigt.

Die Ausgangslage hinsichtlich Gashaushalt der Deponie für die Festlegung der Massnahmen zur Entgasung bei den Sanierungsvarianten 1, 3 und 4 wird folgendermassen vorgegeben (für die detaillierten Berechnungsannahmen siehe Anhang A2).

Nachfolgende Berechnungen zu den Szenarien mit dem IPCC Modell mit unterschiedlichem Anteil an biologisch verfügbarem Kohlenstoff C_{bio} lassen Rückschlüsse auf das Alter der Ablagerung zu. Der Anteil an C_{bio} wird jedoch nicht allein anhand des Alters der Ablagerung bestimmt, sondern ist im Einzelfall

Modellannahmen



carbotech
Smartgas and Biogas

auch abhängig u. a. von der Art der Abfälle, vom Wasserhaushalt, von der Luftzirkulation, vom Deponiestandort und von den technischen Einrichtungen. Ebenso können innerhalb derselben Ablagerung grosse Unterschiede im Gehalt biologisch verfügbaren Kohlenstoffs auftreten. Im Einzelfall ist die Deponie deswegen anhand der Bestandesaufnahme und nicht alleine durch das Alter der Ablagerung zu charakterisieren. Nachfolgende Berechnungen des C_{bio} anhand des Deponiealters basieren auf den Rahmenbedingungen der IPCC und dienen der einheitlichen Modellbildung.

4.3.1. Szenario 1: Deponie mit $> 12 \text{ kg } C_{bio}/\text{t TM}$

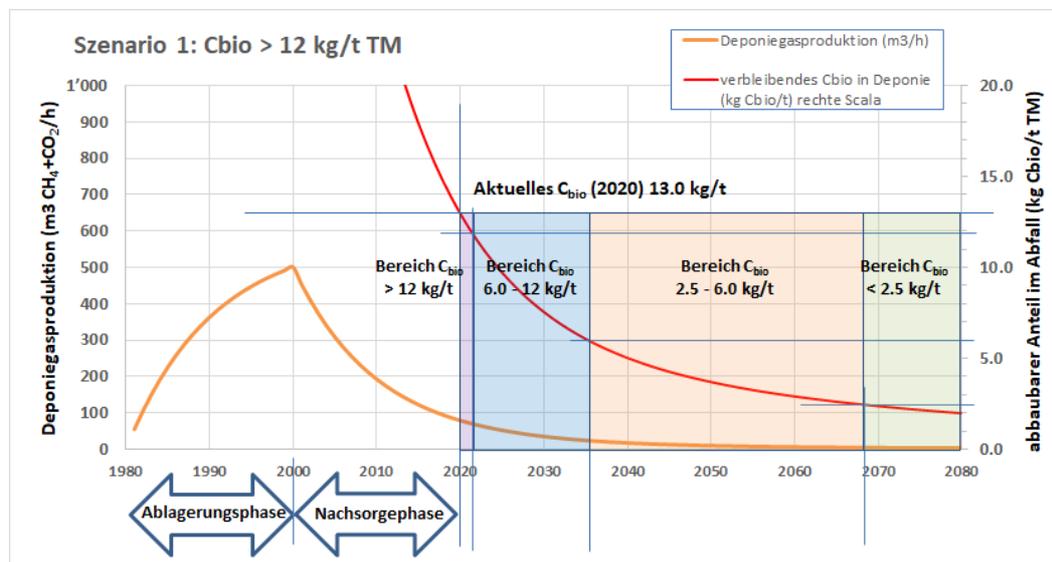


Abbildung 4-1 - Deponie mit Ablagerungsphase von 1980 – 2000. Per Ende 2000 betrug der biologisch abbaubare Anteil im Abfall $C_{bio} = 57.7 \text{ kg/t TM}$. Im Jahr der Untersuchung (2020) beträgt C_{bio} im Abfall gemäss Berechnungsbeispiel noch $C_{bio} = 13 \text{ kg/t TM}$ und die CH_4 -Produktion der Deponie beträgt $39.5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$.

Unter Berücksichtigung der im Kapitel 3.3.3 erläuterten Opportunitätsgrenzen für die verschiedenen technischen und betrieblichen Massnahmen werden bei Szenario 1 für die Sanierungsvarianten 1, 3 und 4 folgende technische Massnahmen festgelegt:

- Variante 1/Sz1: Status Quo: Die Deponie wird sich selbst überlassen. Die produzierten Deponiegase entweichen direkt in die Atmosphäre.
- Variante 3/Sz1: In einer ersten Phase erfolgt eine herkömmliche Erfassung der Deponiegase und Behandlung (mittels Gasmotors oder Gasfackel) und anschliessend eine Aerobisierung (Niederdruckbelüftung).
- Variante 4/Sz1: Die Deponie wird aktiv entgast: Erfassung der Deponiegase und Behandlung (mittels Gasmotors oder Gasfackel, soweit brennbar und mittels katalytischer Oxidation). Aerobisierungsmassnahmen sind nicht vorgesehen.

Varianten Szenario 1



carbotech
Umwelttechnik und Beratung

4.3.2.

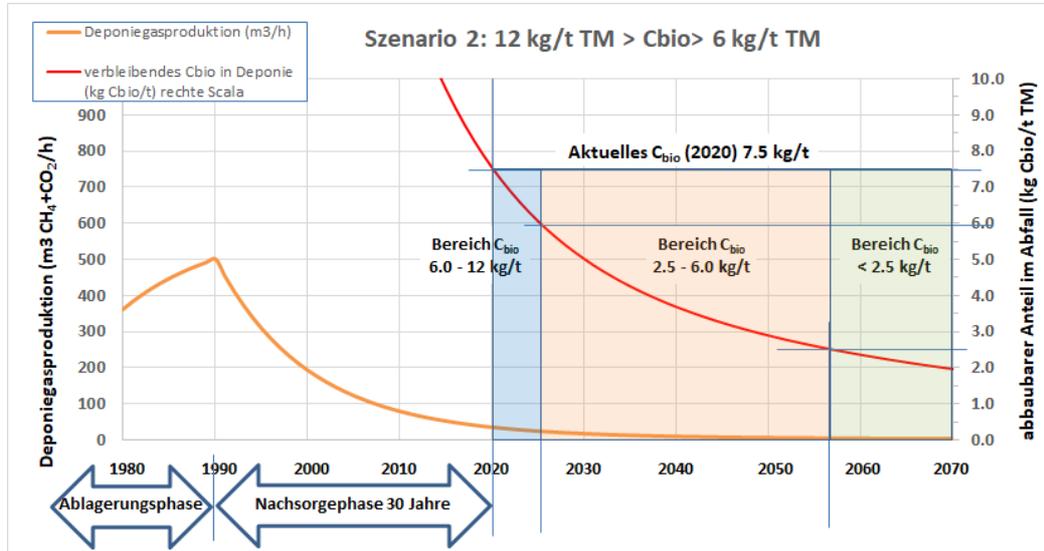
Szenario 2: Deponie mit C_{bio} zwischen 12 kg/t TM > C_{bio} > 6 kg/t TM


Abbildung 4-2 - Deponie mit Ablagerungsphase von 1970 – 1990. Per Ende 1990 betrug der biologisch abbaubare Anteil im Abfall $C_{\text{bio}} = 57.7$ kg/t TM. Im Jahr der Untersuchung (2020) beträgt C_{bio} im Abfall rechnerisch noch ca. $C_{\text{bio}} = 7.5$ kg/t TM. Die CH₄-Produktion der Deponie beträgt 17.6 m³ CH₄/h.

Unter Berücksichtigung der im Kapitel 3.3.3 erläuterten Opportunitätsgrenzen für die verschiedenen technischen und betrieblichen Massnahmen werden bei Szenario 2 für die Sanierungsvarianten 1, 3 und 4 folgende technische Massnahmen festgelegt:

Varianten Szenario 2

- Variante 1/Sz2: Status Quo: Die Deponie wird sich selbst überlassen. Die produzierten Deponiegase entweichen direkt in die Atmosphäre.
- Variante 3/Sz2: Es wird direkt eine Aerobisierung (Niederdruckbelüftung) installiert, da bei der erwarteten Deponiegasproduktion von ca. 35.2 m³/h (CH₄+CO₂) als Vorstufe zur Aerobisierung eine herkömmliche Gasfassung und -behandlung nicht mehr sinnvoll ist.
- Variante 4/Sz2: Die Deponie muss aktiv entgast werden: Erfassung der Deponiegase und Behandlung (mittels Gasfackel, soweit brennbar und mittels katalytischer Oxidation). Aerobisierungsmassnahmen sind nicht vorgesehen.

4.3.3.

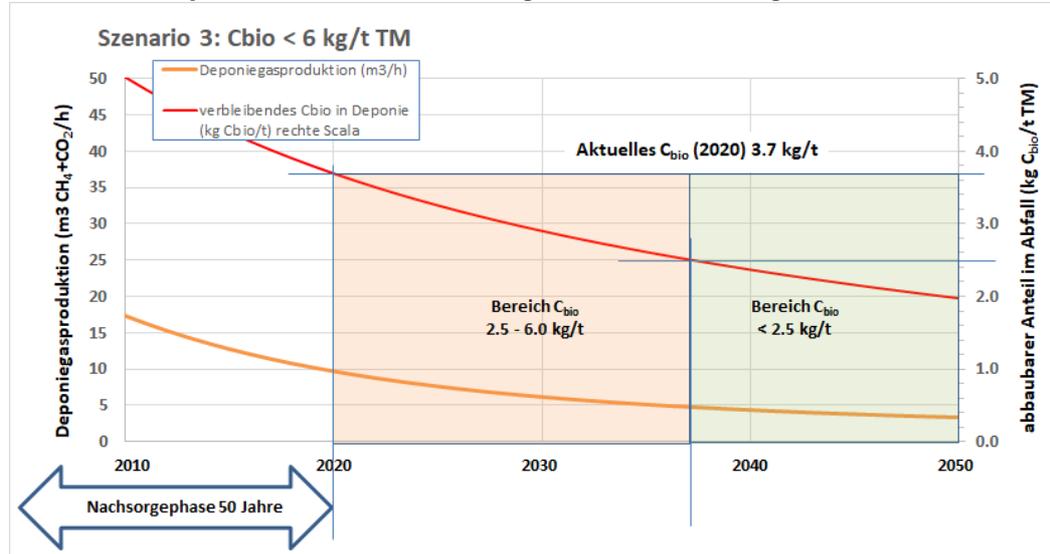
Szenario 3: Deponie mit C_{bio} zwischen 6 kg/t TM > $C_{\text{bio}} > 2.5$ kg/t TM

Abbildung 4-3 - Deponie mit Ablagerungsphase von 1950 – 1970. Per Ende 1970 betrug der biologisch abbaubare Anteil im Abfall $C_{\text{bio}} = 57.7$ kg/t TM. Im Jahr der Untersuchung (2020) beträgt C_{bio} im Abfall rechnerisch $C_{\text{bio}} = 3.7$ kg/t TM. Die CH_4 -Produktion der Deponie beträgt $4.8 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$.

Varianten Szenario 3

Grundsätzlich sollte bei C_{bio} im Bereich von 2,5 kg/t TM und auch bei geringeren Werten geprüft werden, ob eine Belüftung noch zielführend bzw. technisch und wirtschaftlich noch möglich und zumutbar ist. Hier kann allenfalls die Methanoxidation in der Rekultivierung berücksichtigt werden.

Unter Berücksichtigung der im Kapitel 3.3.3 erläuterten Opportunitätsgrenzen für die verschiedenen technischen und betrieblichen Massnahmen werden Szenario 3 für die Sanierungsvarianten 1, 3 und 4 folgende technische Massnahmen festgelegt:

- Variante 1/Sz3: Status Quo: Die Deponie wird sich selbst überlassen. Die produzierten Deponiegase entweichen direkt in die Atmosphäre. Zu diesem Zeitpunkt erfüllt die Deponie die klimatologisch begründeten Kriterien für die Einstellung der Deponiebelüftung und Umstellung auf passive Behandlung des Deponiegases (siehe Kapitel 3.6.1).
- Variante 3/Sz3: Eine Aerobisierung führt hier nicht mehr zu einer nennenswerten Verkürzung der Nachsorgedauer. Allerdings können mit der Aerobisierung die klimarelevanten Emissionen nochmals weiter reduziert werden. In der Kostenrechnung dieser Variante wird deshalb eine Aerobisierung berücksichtigt und in Relation zu Beiträgen aus KLIK (Stiftung Klimaschutz und CO_2 -Kompensation) beurteilt.
- Variante 4/Sz3: Eine aktive Entgasung der Deponie und Behandlung mit katalytischer Oxidation wäre hier wohl noch technisch machbar. Diese Option wird deswegen in der Kostenrechnung untersucht.

4.4.

Zusammenstellung der Sanierungsvarianten und Szenarien

Zusammengefasst ergeben sich für die weitere Bearbeitung folgende Sanierungsvarianten und Szenarien gemäss Tabelle 4-1. Dabei ist ersichtlich, dass für das Szenario 3 mit geringem Anteil an C_{bio} die Sanierungsvariante Totaldekontamination (Variante 2 – grau dargestellt) aufgrund der Rahmenbedingungen wohl eher nicht zum Tragen kommt. Ebenso ist bei Szenario 3 für die Aerobisierung (Variante 3) und die Aktive Entgasung (Variante 4) fallweise zu entscheiden, ob Sanierungsmassnahmen noch Sinn machen, oder ob diese hinfällig werden (hellgrün dargestellt).

Übersicht und Zusammenstellung Varianten/Szenarien



Tabelle 4-1 – Übersicht Sanierungsvarianten und Szenarien.

Sanierungsvarianten		Szenario 1 $C_{bio} > 12\text{kg/t TM}$	Szenario 2 $12\text{kg/t TM} > C_{bio} > 6\text{kg/t TM}$	Szenario 3 $6\text{kg/t TM} > C_{bio} > 2.5\text{ kg/t TM}$
1	Status Quo: Die Deponie wird sich selbst überlassen und die Verrottungsprozesse klingen über die nächsten 50 Jahre allmählich ab.	Die Deponie wird sich selbst überlassen. Die produzierten Deponiegase entweichen direkt in die Atmosphäre.	Die Deponie wird sich selbst überlassen. Die produzierten Deponiegase entweichen direkt in die Atmosphäre.	Status Quo: Die Deponie wird sich selbst überlassen. Die produzierten Deponiegase entweichen direkt in die Atmosphäre
2	Totaldekontamination: Die Deponie wird ausgehoben, die Abfälle Triagiert, transportiert, behandelt und extern entsorgt. Die brennbaren Anteile werden in einer KVA thermisch verwertet, was verwertbar ist wird verwertet und die restlichen Abfälle gelangen in Schweizer Oberflächen-deponien (Typ B und Typ E).	Die Deponie wird ausgehoben, allenfalls erhöhte Entsorgungskosten wegen hohen Belastungen	Die Deponie wird ausgehoben	Sanierungsvariante allenfalls nicht relevant: Da die CH_4 -Emissionen in diesem Bereich von C_{bio} knapp über bzw. bereits unter den klimatologisch begründeten Kriterien für den Übergang zur passiven Behandlung der Deponiegase liegen, ist ein Ausräumen der Deponie kaum mehr verhältnismässig.
3	Aerobisierung: Der Deponiekörper wird aktiv belüftet und die Deponiegase gefasst und behandelt (mittels Gasmotors oder Gasfackel, soweit brennbar und mittels katalytischer Oxidation, wenn nicht mehr selbst brennbar).	In einer ersten Phase erfolgt eine herkömmliche Erfassung der Deponiegase und Behandlung (mittels Gasmotors oder Gasfackel) und anschliessend eine Aerobisierung (Niederdruckbelüftung).	Hier wird direkt eine Aerobisierung (Niederdruckbelüftung) installiert.	Prüfen wie weit hier eine Aerobisierung noch technisch machbar ist und zu einer massgeblichen Reduktion der CH_4 -Emissionen führt und unter Berücksichtigung der Kosten aus Klimaschutzgründen sinnvoll oder notwendig ist.
4	Aktive Entgasung ohne Aerobisierung: Der Deponiekörper wird aktiv entgast und die Deponiegase gefasst und behandelt (mittels Gasmotors oder Gasfackel, soweit brennbar und mittels katalytischer Oxidation, wenn nicht mehr selbst brennbar).	Die Deponie wird aktiv entgast: Erfassung der Deponiegase und Behandlung (mittels Gasmotors oder Gasfackel, so-weit brennbar und mittels katalytischer Oxidation, wenn nicht mehr selbst brennbar). Aerobisierungsmassnahmen sind nicht vorgesehen.	Die Deponie wird aktiv entgast: Erfassung der Deponiegase und Behandlung (mittels Gasmotors oder Gasfackel, soweit brennbar und mittels katalytischer Oxidation, wenn nicht mehr selbst brennbar). Aerobisierungsmassnahmen sind nicht vorgesehen.	Prüfen ob hier eine aktive Entgasung der Deponie und Behandlung mit katalytischer Oxidation technisch noch möglich ist und zu einer massgeblichen Reduktion der CH_4 -Emissionen führt und unter Berücksichtigung der Kosten aus Klimaschutzgründen sinnvoll oder notwendig ist.

5. Langfristige Wirkung der Massnahmen

5.1.

Verminderung der Emissionen von CO₂-eq aus dem Gashaushalt

Bei Deponien gemäss Sanierungsvariante 1 (Status Quo) emittieren die anaerob produzierten Deponiegase vollständig in die Atmosphäre - allenfalls abzüglich einer Methanoxidation (Oxidationsfaktor OX) in der oberflächennahen Bodenschicht, welche aber bei unseren Modeldeponien nicht berücksichtigt wird. Da CH₄ im Vergleich zu CO₂ deutlich klimaschädlicher ist wird der Anteil CH₄, bezogen auf dessen Treibhauswirkung auf 100 Jahre, um Faktor $GWP_{CH_4} = 28$ erhöht. Je nach der Wirkungsdauer, für welche der Einfluss von CH₄ in der Atmosphäre berücksichtigt wird, werden andere Faktoren eingesetzt.

Sobald technische Entgasungsmassnahmen getroffen werden, sind deren Wirkungsgrade zu berücksichtigen. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde mit folgenden Werten gerechnet:

- Pro t CH₄ entstehen bei der Verbrennung 2.75 t CO₂. Das «global warming potential (GWP)» wurde, wie oben erwähnt, zu $GWP_{CH_4} = 28$ gesetzt.
- Der Erfassungsgrad des in der Deponie produzierten Deponiegases (EF%) wurde bei Sanierungsvariante 4 (Gaserfassung mit Abfackelung) zu 80% und bei Sanierungsvariante 3 (Aerobisierung) zu 100% angenommen.
- Die Abfackelungseffizienz (AE%) wurde bei beiden Varianten 3 und 4 zu 90% angenommen. Dies entspricht auch dem Standard gemäss BAFU Publikation (vgl. [32]) und UNFCCC). Die Abfackelungseffizienz kann allerdings erfahrungsgemäss auch höher ausfallen oder es ist gar ein vollkommener Ausbrand möglich.
- Für die Methanoxidation (OX) wird ein Wert von 0% angenommen. Wird die Methanoxidation vernachlässigt emittiert mit dem austretenden Deponiegas eine entsprechend höhere Menge von CH₄ an die Atmosphäre. Für die Umweltbilanzierung liegt man dadurch auf der ungünstigeren Seite. Eine Methanoxidation würde zwar die schädlicheren CH₄-Emissionen reduzieren hätte aber infolge der Oxidation pro t CH₄ zusätzliche Emissionen von 2.75 t des weniger schädlichen CO₂ zur Folge.
- Das fossile CO₂ wird in der Berechnung ausgewiesen jedoch für die Umweltbilanzierung nicht berücksichtigt. CO₂ Emissionen aus dem Abbau von biogenem Kohlenstoff sind nicht Teil der Umweltbilanzierung, da biogenes CO₂ als «klimaneutral» definiert wird.

Ausgehend von der mit dem IPCC-Modell ermittelten jährlich produzierten Deponiegasmenge (t CH₄ + t CO₂)/a (siehe Anhang A2), wurden die jährlichen Total-Emissionen von CO₂-eq/a folgendermassen berechnet:

Für Sanierungsvariante 1 (Status Quo):

$$\bullet \quad CO_2\text{-eq/a} = t \text{ CH}_4/\text{a} * (GWP_{CH_4} - OX\% * (GWP_{CH_4} - 2.75)) + t \text{ CO}_2/\text{a}$$

Für Sanierungsvariante 3 (Aerobisierung und Abfackelung) und Szenario 4 (Aktive Entgasung und Abfackelung ohne Aerobisierung):

$$\bullet \quad CO_2\text{-eq/a} = t \text{ CH}_4/\text{a} * (EF\% * AF\% * 2.75 + (1 - (EF\% * AF\%)) * (1 - OX\%)) * GWP_{CH_4} + OX\% * 2.75 + t \text{ CO}_2/\text{a}$$

Status Quo



carbotech
Sustainable and Beyond

Global War-
ming Potential
GWP

5.1.1.
Wirkung der Massnahmen bei einer Deponie gemäss Szenario 1

Für Szenario 1 wurde von einem Ablagerungszeitraum für die Siedlungsabfälle von 1980 – 2000 und einer anschliessenden Nachsorgephase von 20 Jahren ausgegangen (siehe Abbildung 4-1). Die mit den Szenarien vorgesehenen Sanierungsmassnahmen beginnen demzufolge im Jahr 2020. Für die Ermittlung der Deponiegasproduktion gelten die in Anhang A2 beschriebenen Berechnungsannahmen. Demgemäss hat bei der Deponie gemäss Szenario 1 der bioverfügbare Anteil C_{bio} bis ins Jahr 2020 auf einen Wert von 13.0 kg/t TM abgenommen und nimmt ohne technische Massnahmen bis 2070 auf einen Wert von ca. 2.4 kg C_{bio} /t TM ab (siehe Abbildung 5-1).

Jüngere Siedlungsabfalldeponie mit $C_{bio} > 12 \text{ kg/t TM}$

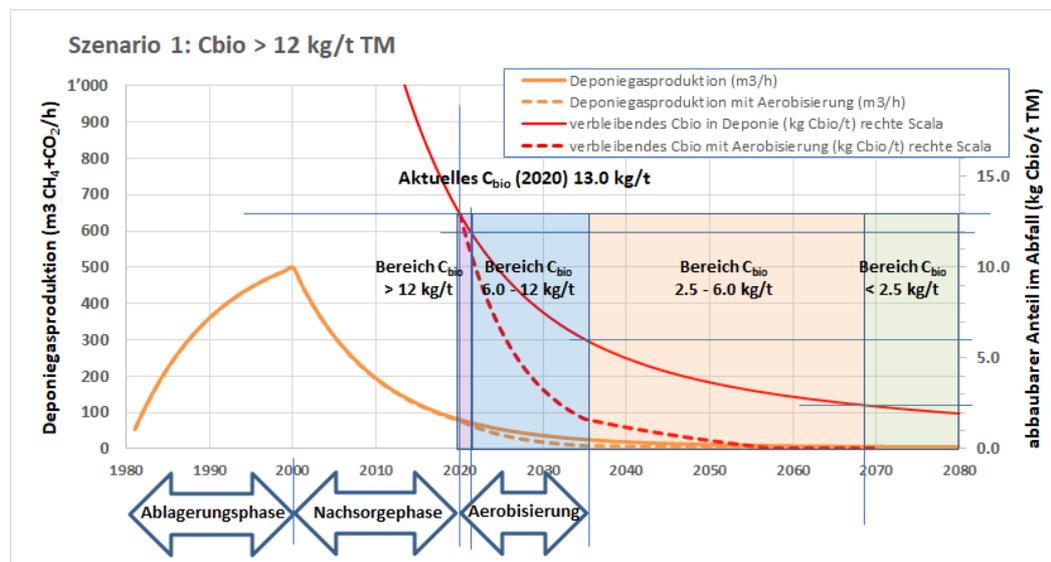


Abbildung 5-1 - Szenario 1: Per Ende der Ablagerungen im Jahre 2000 betrug $C_{bio} = 57.7 \text{ kg/t TM}$. Beim Beginn der Massnahmen (20 Jahre nach Abschluss der Deponie) im Jahre 2020 beträgt C_{bio} noch 13 kg/t TM und nimmt infolge der Aerobisierung innerhalb von 15 Jahren auf ca. 1.6 kg/t TM ab. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die Deponiegasproduktion $79 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. $39.5 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{h}$.

Erläuterung der Resultate zu Szenario 1:

Bei Variante 1 (Status Quo) wird das Sanierungsziel für die CH_4 -Emissionen der Deponie 2038 erreicht und ist kleiner als die vorgegebenen als das Sanierungsziel von $10 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{h}$ (Definition Sanierungsziel siehe 3.6.1). Der bioverfügbare Anteil C_{bio} in der Deponie beträgt zu diesem Zeitpunkt noch ca. $5.4 \text{ kg } C_{bio}/\text{t TM}$. Der Anteil C_{bio} ist ohne Massnahmen wesentlich höher als bei der Sanierungsvariante 3 (Aerobisierung), was gegebenenfalls weiterer Nachsorge- und Überwachungsbedarf erfordert.

Unterschiede der Sanierungsvarianten bei Szenario 1

Bei Variante 3 wird die Aerobisierung ab 2020 während 15 Jahren betrieben. Die Wirkung auf den beschleunigten aeroben Abbau des bioverfügbaren Kohlenstoffs C_{bio} wurde mit einer geschätzten Halbwertszeit von $T/2 = 5$ Jahren ab 2020 berücksichtigt (Verlauf der rot gestrichelten Linie in Abbildung 5-1). Das Sanierungsziel wird hier bereits nach ca. 10 Jahren, also 2030 erreicht. Der bioverfügbare Anteil C_{bio} in der Deponie beträgt zu diesem Zeitpunkt noch ca. $3.2 \text{ kg } C_{bio}/\text{t TM}$. Nach Abschluss

der Aerobisierung beträgt C_{bio} noch 1.6 kg C_{bio} /t TM. Kumuliert über 50 Jahre nach Beginn der Massnahme emittieren gegenüber Variante 1 (Status Quo) 71'326 t CO_2 -eq weniger in die Atmosphäre.

Bei Variante 4 wird die aktive Entgasung und Abfackelung ohne Aerobisierung 50 Jahre lang betrieben. Die Abfackelung führt zu keinen Veränderungen der Gasproduktion gegenüber Variante 1 (Status Quo). Wie bei Variante 1 würde das Sanierungsziel bereits ca. 2038 erreicht. Nach Abschluss der Abfackelung im Jahre 2070 beträgt der bioverfügbare Anteil C_{bio} nur noch 2.4 kg CH_4 /t TM. Kumuliert über 50 Jahre nach Beginn der Massnahme emittieren gegenüber Variante 1 (Status Quo) 62'353 t CO_2 -eq weniger in die Atmosphäre.

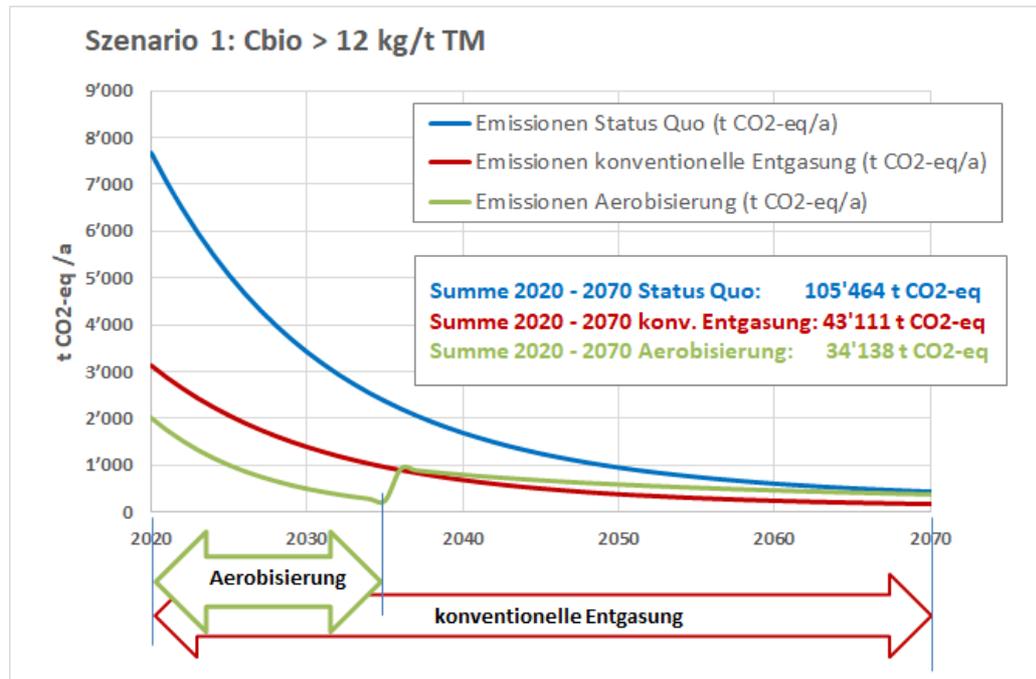


Abbildung 5-2: Langfristige Wirkung der Massnahmen bezüglich der Freisetzung von CO_2 -eq: Gegenüber der Sanierungsvariante 1 emittieren bei Variante 3 (Aerobisierung) kumuliert über 50 Jahre nach Beginn der Massnahmen 71'326 t CO_2 -eq weniger in die Atmosphäre. Bei Variante 4 (Aktive Entgasung und Abfackelung ohne Aerobisierung) beträgt die Emissionsverminderung 62'353 t CO_2 -eq. Durch die 15-jährige Belüftung wird gemäss dieser Kalkulation eine Reduzierung von ca. 70% erreicht. In der Sanierungspraxis werden 80 - 90% angestrebt. Da die Deponie nach Abschluss der Aerobisierung wieder anaerob wird und in dieser Phase keine Abfackelung vorgesehen ist, resultieren bei der Sanierungsvariante 3 ab ca. 2038 geringfügig höhere CO_2 -eq-Emissionen als bei Sanierungsvariante 4.

5.1.2.

Wirkung der Massnahmen bei einer Deponie gemäss Szenario 2

Für Szenario 2 wurde von einem Ablagerungszeitraum für die Siedlungsabfälle von 1970 – 1990 und einer anschliessenden Nachsorgephase von 30 Jahren ausgegangen. Die vorgesehenen Sanierungsvarianten beginnen demzufolge wie bei Szenario 1 im Jahr 2020. Für die Ermittlung der Deponiegasproduktion gelten die in Anhang A2 beschriebenen Berechnungsannahmen. Demgemäss hat bei der Deponie Szenario 2 der bioverfügbare Anteil C_{bio} bis ins Jahr 2020 auf einen Wert von 2020 7.5 kg/t TM abgenommen und nimmt ohne technische Massnahmen bis 2070 auf einen Wert von ca. 2.0 kg C_{bio} /t TM ab (siehe Abbildung 5-3).

Siedlungsabfalldeponie mit
> 12 kg/t TM >
 C_{bio} > 6 kg/T
TM

**Erläuterung der Resultate zu Szenario 2:**

Bei Variante 1 (Status Quo) wird das Sanierungsziel für die CH_4 -Emissionen der Deponie 2028 erreicht und ist kleiner als die vorgegebenen $10 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$. Der bioverfügbare Anteil C_{bio} in der Deponie beträgt zu diesem Zeitpunkt noch ca. 5.4 kg C_{bio} /t TM und nimmt bis 2070 auf einen Wert von ca. 2.0 kg C_{bio} /t TM ab.

Unterschiede
der Sanie-
rungsvarianten
bei Szenario 2

Bei Variante 3 wird die Aerobisierung ab 2020 während 12 Jahren betrieben. Die Wirkung auf den beschleunigten aeroben Abbau des bioverfügbaren Kohlenstoffs C_{bio} wurde mit einer geschätzten Halbwertszeit von $T_{1/2} = 5$ Jahren ab 2020 berücksichtigt (Verlauf der rot gestrichelten Linie in Abbildung 5-3). Das Sanierungsziel würde hier bereits nach ca. 4 Jahren, also 2024 erreicht werden. Der bioverfügbare Anteil C_{bio} in der Deponie beträgt zu diesem Zeitpunkt ca. 4.3 kg C_{bio} /t TM. Nach Abschluss der Aerobisierung beträgt C_{bio} noch 1.4 kg C_{bio} /t TM. Kumuliert über 50 Jahre nach Beginn der Massnahme emittieren gegenüber Variante 1 (Status Quo) 35'106 t CO_2 -eq weniger in die Atmosphäre.

Bei Variante 4 wird die aktive Entgasung und Abfackelung ohne Aerobisierung 40 Jahre lang betrieben. Die Abfackelung führt zu keinen Veränderungen der Gasproduktion gegenüber Variante 1 (Status Quo). Wie bei Variante 1 würde das Sanierungsziel bereits ca. 2028 erreicht. Nach Abschluss der Abfackelung im Jahre 2060 beträgt der bioverfügbare Anteil C_{bio} nur noch 2.4 kg CH_4 /t TM. Kumuliert über 50 Jahre nach Beginn der Massnahme emittieren gegenüber Variante 1 (Status Quo) 30'271 t CO_2 -eq weniger in die Atmosphäre.

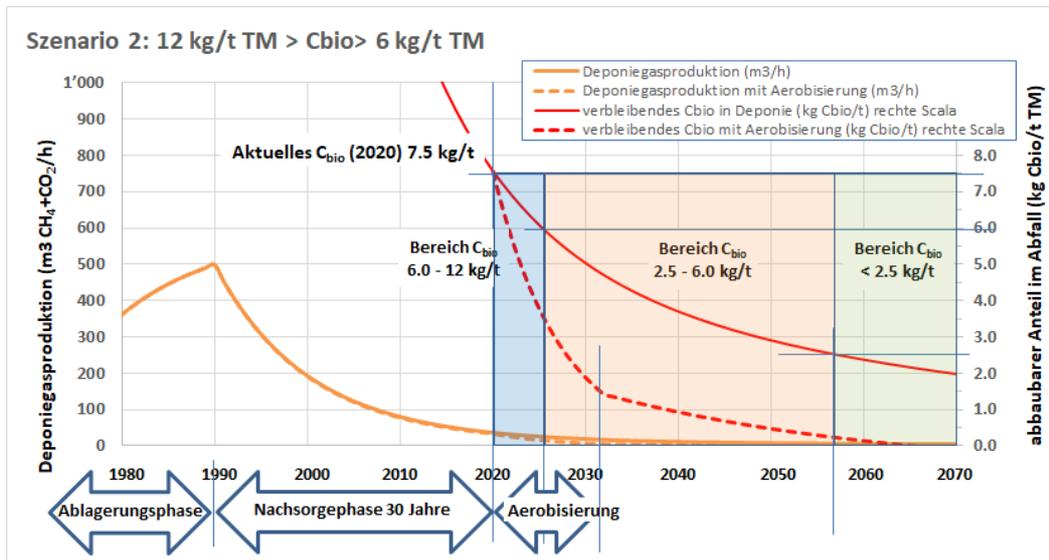


Abbildung 5-3 - Szenario 2: Per Ende der Ablagerungen im Jahre 1990 betrug C_{bio} = 57.7 kg/t TM. Beim Beginn der Massnahmen (30 Jahre nach Abschluss der Deponie) im Jahre 2020 beträgt C_{bio} noch 7.5 kg/t TM und nimmt infolge der Aerobisierung innerhalb von 10 Jahren auf ca.1.4 kg/t TM ab. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die Deponiegasproduktion 35.2 m³/h bzw. 17.6 m³ CH₄/h

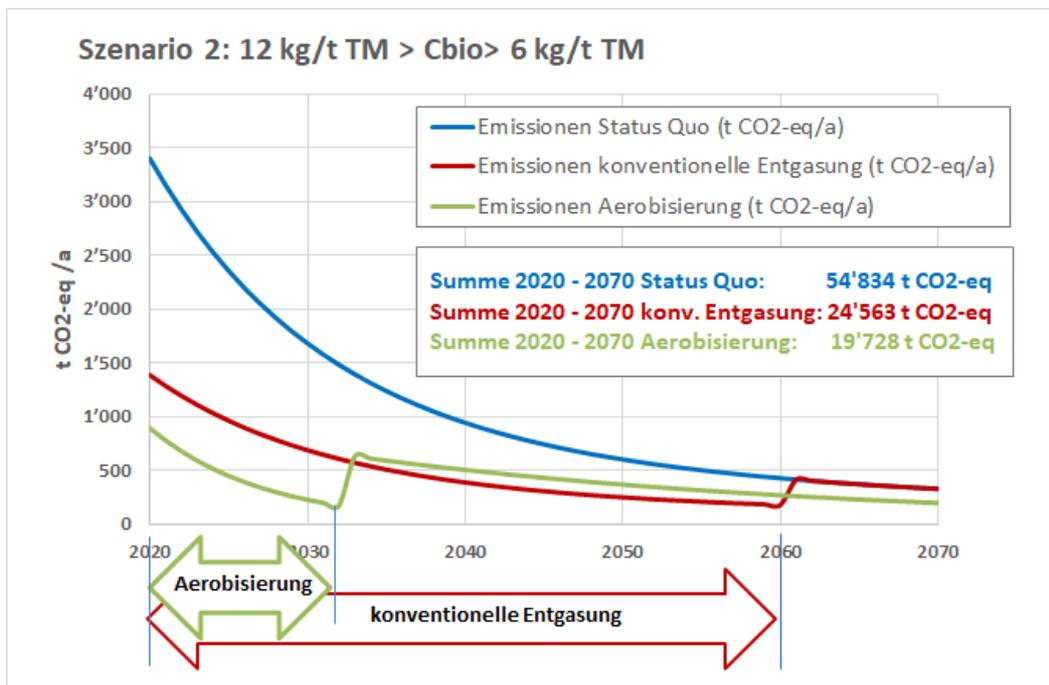


Abbildung 5-4 - Langfristige Wirkung der Massnahmen bezüglich der Freisetzung von CO₂-eq. Gegenüber der Variante 1 emittieren bei Variante 3 (Aerobisierung) kumuliert über 50 Jahre nach Beginn der Massnahmen 35'106 tCO₂-eq weniger in die Atmosphäre. Bei Variante 4 (Aktive Entgasung und Abfackelung ohne Aerobisierung) beträgt die Emissionsverminderung 30'271 tCO₂-eq. Da die Deponie nach Abschluss der Aerobisierung wieder anaerob wird und in dieser Phase keine Abfackelung vorgesehen ist, resultieren bei der Sanierungsvariante 3 im Vergleich zu Variante 4 bis ca. 2060 leicht höhere CO₂-eq-Emissionen.

5.1.3.
Wirkung der Massnahmen bei einer Deponie gemäss Szenario 3

Für Szenario 3 wurde von einem Ablagerungszeitraum für die Siedlungsabfälle von 1950 – 1970 und einer anschliessenden Nachsorgephase von 50 Jahren ausgegangen. Die Sanierungsvarianten beginnen demzufolge wie bei Szenario 1 und 2 im Jahr 2020. Für die Ermittlung der Deponiegasproduktion gelten die in Anhang A2 beschriebenen Berechnungsannahmen. Der bioverfügbare Anteil C_{bio} beträgt 2020 3.7 kg/t TM

ältere Siedlungsabfalldeponie mit 6 kg/t TM > C_{bio} > 2.5 kg/t TM

Erläuterung der Resultate zu Szenario 3:

Bei Variante 1 (Status Quo) wurde das Sanierungsziel für die CH_4 -Emissionen der Deponie bereits 12 Jahre vor Beginn von Massnahmen, also 2008 erreicht und ist kleiner als die vorgegebenen $10 \text{ m}^3 CH_4/h$. Der bioverfügbare Anteil C_{bio} in der Deponie beträgt zu diesem Zeitpunkt ca. $5.4 \text{ kg } C_{bio}/t \text{ TM}$ und nimmt bis 2070 auf einen Wert von ca. $1.4 \text{ kg } C_{bio}/t \text{ TM}$ ab. Der Anteil C_{bio} im Jahr 2070 ist für diesen Fall ca. 6 mal höher als bei der Sanierungsvariante 3 (Aerobisierung), was gegebenenfalls weiteren Nachsorge- und Überwachungsbedarf erfordert.

Unterschiede der Sanierungsvarianten bei Szenario 3

Bei Variante 3 wird die Aerobisierung ab 2020 während 10 Jahren betrieben. Die Wirkung auf den beschleunigten aeroben Abbau des bioverfügbaren Kohlenstoffs C_{bio} wurde mit einer geschätzten Halbwertszeit von $T/2 = 5$ Jahren ab 2020 berücksichtigt (Verlauf der rot gestrichelten Linie in Abbildung 5-5). Das Sanierungsziel wurde auch hier bereits 12 Jahre vor Beginn der Aerobisierung, also 2008 erreicht. Der bioverfügbare Anteil C_{bio} in der Deponie betrug zu diesem Zeitpunkt ca. $5.4 \text{ kg } C_{bio}/t \text{ TM}$. Bei Inbetriebnahme der Aerobisierung betrug C_{bio} $3.7 \text{ kg } C_{bio}/t \text{ TM}$. Nach Abschluss der Aerobisierung beträgt C_{bio} noch $0.9 \text{ kg } C_{bio}/t \text{ TM}$ und nimmt bis 2070 auf $0.24 \text{ kg } C_{bio}/t \text{ TM}$ ab. Kumuliert über 50 Jahre nach Beginn der Massnahme emittieren gegenüber Variante 1 (Status Quo) $14'765 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ weniger in die Atmosphäre.

Bei Variante 4 wird die aktive Entgasung und Abfackelung ohne Aerobisierung 30 Jahre lang betrieben. Die Abfackelung führt zu keinen Veränderungen der Gasproduktion gegenüber Variante 1 (Status Quo). Wie bei Variante 1 wäre das Sanierungsziel bereits ca. 2008 erreicht worden. Nach Abschluss der Abfackelung im Jahre 2050 beträgt der bioverfügbare Anteil C_{bio} nur noch $2.0 \text{ kg } C_{bio}/t \text{ TM}$ und nimmt bis 2070 auf $1.4 \text{ kg } C_{bio}/t \text{ TM}$ ab. Kumuliert über 50 Jahre nach Beginn der Massnahme emittieren gegenüber dem Variante 1 (Status Quo) $11'032 \text{ t CO}_2\text{-eq}$ weniger in die Atmosphäre.



carbotech
Umwelttechnik und Beratung

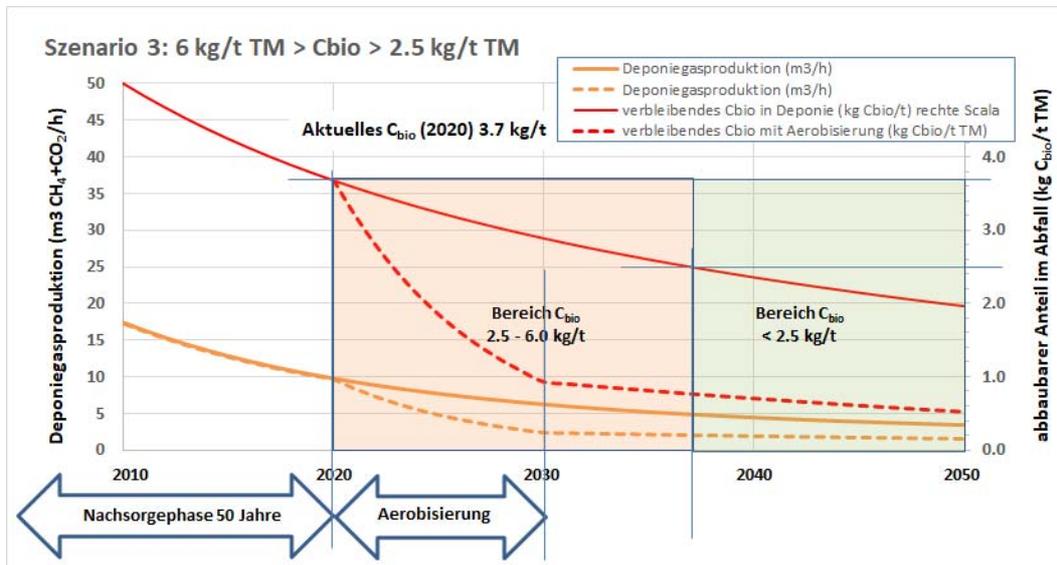


Abbildung 5-5 - Szenario 3: Per Ende der Ablagerungen im Jahre 1970 betrug C_{bio} = 57.7 kg/t TM. Beim Beginn der Massnahmen (50 Jahre nach Abschluss der Deponie) im Jahre 2020 beträgt C_{bio} noch 3.7 kg/t TM und nimmt infolge der Aerobisierung innerhalb von 10 Jahren auf ca.0.9 kg/t TM ab. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die Deponiegasproduktion 9.6 m³/h bzw. 4.8 m³CH₄/h

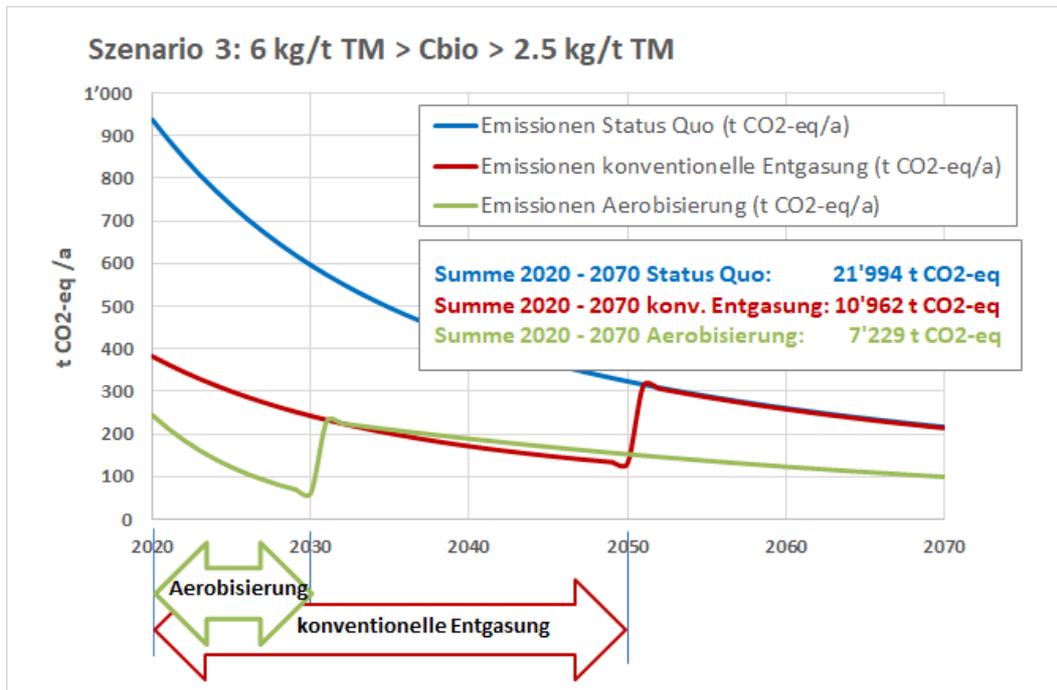


Abbildung 5-6 - Langfristige Wirkung der Massnahmen bezüglich der Freisetzung von CO₂-eq. Gegenüber der Variante 1 emittieren bei Variante 3 (Aerobisierung) kumuliert über 50 Jahre nach Beginn der Massnahmen 14'265 t CO₂-eq weniger in die Atmosphäre. Bei Variante 4 (Aktive Entgasung und Abfackelung ohne Aerobisierung) beträgt die Emissionsverminderung 11'032 t CO₂-eq. Da nach Abschluss der Aerobisierung keine Abfackelung vorgesehen ist sind auch hier die CO₂-eq-Emissionen bei der Variante 3 nach bis ca. 2050 leicht höher als bei Variante 4.

6. Kostenschätzungen zu den Sanierungsvarianten und Szenarien

6.1. Resultate Kostenschätzung

In Tabelle 6-1 ist die Kostenzusammenstellung für die definierten Sanierungsvarianten ersichtlich. Die detaillierte Kostenermittlung ist in Anhang A3 dokumentiert. Ebenso sind die Annahmen zu den Kostenschätzungen im Anhang A3 detailliert für jede Sanierungsvariante und ihre Szenarien erläutert. Bei allen Sanierungsvarianten wurden die anfallenden Kosten über einen gleichbleibenden Zeithorizont von 50 Jahren ab Beginn der Massnahmen ermittelt.

Zusammenstellung



Tabelle 6-1 – Übersicht Kostenschätzung für die 4 Varianten (gemäss Anhang A3 in CHF gerundet)

	Variante 1 Status Quo	Variante 2 Total- dekontamination	Variante 3 Aerobisierung	Variante 4 herkömmliche Gaserfassung
Bau- und Unterhaltskosten gemäss detaillierter Zusammenstellung	CHF 2'903'250	CHF 91'608'550	CHF 5'889'560	CHF 7'577'000
Unvorhergesehenes 10 %	CHF 290'325	CHF 9'160'855	CHF 588'956	CHF 757'700
Gesamtsumme (netto)	CHF 3'193'575	CHF 100'769'405	CHF 6'478'516	CHF 8'334'700
Gesamtsumme (inkl. MWSt.)	CHF 3'439'480	CHF 108'528'649	CHF 6'977'362	CHF 8'976'472
Gesamtsumme (ca. gerundet)	CHF 3'500'000	CHF 108'600'000	CHF 7'000'000	CHF 9'000'000
Bemerkungen zu den Varianten: - Szenario 1: $C_{bio} > 12\text{kg/t TM}$ - Szenario 2: $12\text{ kg/t TM} > C_{bio} > 6\text{ kg/t TM}$ - Szenario 3: $6\text{ kg/t TM} > C_{bio} > 2.5\text{ kg/t TM}$	Kosten unabhängig der Szenarien 1, 2 und 3	Kosten unabhängig der Szenarien 1, 2 und 3	variiert zwischen CHF 7.0.-- Mio. (Sz. 1), CHF 6.7.-- Mio (Sz. 2) und CHF 6.3.-- Mio (Sz. 3)	variiert zwischen CHF 9.0.-- Mio. (Sz. 1), CHF 8.3.-- Mio (Sz. 2) und CHF 7.3.-- Mio (Sz. 3)

Erwartungsgemäss resultieren bei der Variante 1 (Status Quo), wo zusätzlich zur normalen Nachsorge keinerlei technische Massnahmen vorgesehen sind, die geringsten Kosten (ca. CHF 3.5 Mio.). Beim Status Quo gilt es allerdings darauf hinzuweisen, dass die Unterhaltsarbeiten den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren überdauern können und deswegen auch höhere Kosten möglich sind.

Interpretation

Die Sanierungsvarianten 3 (Aerobisierung) und 4 (herkömmliche Gaserfassung) mit geschätzt ca. CHF 7.0 bzw. 9.0 Mio. kommen etwa doppelt so teuer zu stehen wie der herkömmliche Deponieunterhalt mit Status Quo.

Die Aerobisierung ist annähernd gleich bzw. etwas kostengünstiger als eine herkömmliche Gaserfassung, da bei der herkömmlichen Gaserfassung aufgrund der langen Betriebsdauer auch umfangreiche Erneuerungskosten zu berücksichtigen sind.

Für die Sanierungsvariante 2 (Totalsanierung durch Ausräumen) muss mit ca. CHF 108.6 Mio. gerechnet werden.

Bei den Varianten 3 (Aerobisierung) und 4 (herkömmliche Gaserfassung) unterscheiden sich die Kosten bezüglich der definierten Szenarien, bedingt im Wesentlichen durch die Unterschiede im Gehalt an C_{bio} und damit verbunden unterschiedlicher Betriebsdauer und Energiebedarf. Die Kostenabweichung beträgt jeweils vom teuersten Szenario mit höchstem zum günstigsten Szenario 3 mit dem geringsten biologisch verfügbaren Kohlenstoff C_{bio} um ca. 15% bis 20%.

Unterscheide Szenarien

Für die Szenarien 1 (Status Quo) und 2 (Totaldekontamination) resultieren keine Kostenunterschiede für die unterschiedlichen Szenarien.

6.2.

Hinweise und Interpretation

Die überschlägige Kostenermittlung weist auf Folgendes hin:

- Die Investitionskosten für beide Gaserfassung resp. Aerobisierungs-Varianten unterscheiden sich nicht wesentlich, da der technische Mehraufwand zur Deponiebelüftung (u.a. Belüftungsverdichter in Gasverdichterstation, Temperaturüberwachung, Zweikreissystem bei Gasleitungen) relativ gering ist.
- Die Betriebs- und Unterhaltungskosten sowie der Energiebedarf pro Betriebsjahr sind bei der Deponiebelüftung zwar höher, dafür ist der Betriebszeitraum deutlich kürzer, um den gleichen Kohlenstoffumsatz zu erreichen wie bei der herkömmlichen Gaserfassung und -behandlung.
- Diese zeitliche Verkürzung der Sanierungsmaßnahme führt dazu, dass die Aerobisierung nicht kostenintensiver als die herkömmliche Gaserfassung und -behandlung ist, sondern aller Voraussicht nach sogar Einsparpotenziale eröffnet. Diese Kostenreduzierung fällt über den Behandlungszeitraum noch deutlicher aus, wenn bei der herkömmlichen Gaserfassung und -behandlung alterungs- und verschleissbedingte größere Erneuerungsinvestitionen berücksichtigt werden.
- Im Hinblick auf den Klimaschutz können durch die Deponiebelüftung noch nennenswerte Emissionsvermeidungspotenziale realisiert werden. Theoretisch sind diese Emissionsvermeidungspotenziale auch bei der herkömmlichen Gaserfassung und -behandlung möglich, einschränkend sind hier jedoch sowohl der lange Behandlungszeitraum als auch der i.d.R. geringere Gasfassungsgrad als bei der Deponiebelüftung zu berücksichtigen.
- Die Sekundäremissionen infolge des Stromverbrauchs sind vergleichsweise gering und eher im Bereich von < 2% des Emissionsvermeidungspotenzials anzusiedeln.
- Im Verhältnis zum Deponierückbau als Totaldekontamination, wofür mit Kosten im Bereich von rund CHF 100.—Mio. gerechnet werden muss, sind die Sanierungsvarianten mit der Deponiebelüftung und der herkömmlichen Gaserfassung und -behandlung wesentlich kostengünstiger.

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich um eine grobe Kostenschätzung handelt und sämtliche Kostenansätze je nach Deponierahmenbedingungen und konkreter Umsetzung von Sanierungsmaßnahmen angepasst werden müssen. Gleichwohl gibt diese Kostenabschätzung eine Orientierung über die Kostenentwicklung über einen längeren Betrachtungszeitraum, der bei Deponien im Sinne der Nachsorge und Überwachung gewählt werden sollte.

6.3.

Sensitivitätsüberlegungen Kostenschätzung

Sämtliche Kostenangaben sind mit erheblichen Unsicherheiten behaftet:

- Jede Altdeponie weist spezifische Besonderheiten auf, die von den gewählten Randbedingungen der Modelldeponie deutlich abweichen können.
- Marktpreise sind größeren Schwankungen unterworfen, was insbesondere hier bei den langen Betrachtungszeiträumen relevant ist.

Daher wird nochmals auf die Sinnhaftigkeit von Voruntersuchungen und der einzelfallbezogenen Planung und Dimensionierung bei den Sanierungsvarianten insbesondere bei den Aerobisierungsmassnahmen verwiesen.

Interpretation
Kosten



carbotech
Innovations- und Beratung

Grobe Schätzung

Sensitivitätsüberlegungen

7. Auswirkungen auf die Umwelt

Im Rahmen dieses Projekts wurden die Umweltauswirkungen der verschiedenen Sanierungsvarianten mit der Methode der Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) modelliert. Die Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanz ist heute anerkanntermaßen die umfassendste und aussagekräftigste Methode, um die Umweltauswirkungen von Prozessen, Produkten, Dienstleistungen oder ganzen Organisationen zu beurteilen. Bei der Ökobilanzierung werden die Emissionen in Boden, Wasser und Luft sowie der Ressourcenbedarf über den gesamten Lebenszyklus erfasst, siehe Abbildung 7-1. Danach werden die Auswirkungen auf die Umwelt berechnet und können anschliessend durch eine Gewichtung der verschiedenen Auswirkungen zu einer Kennzahl zusammengefasst werden, siehe Abbildung 7-2.

Lebenszyklus-
analyse

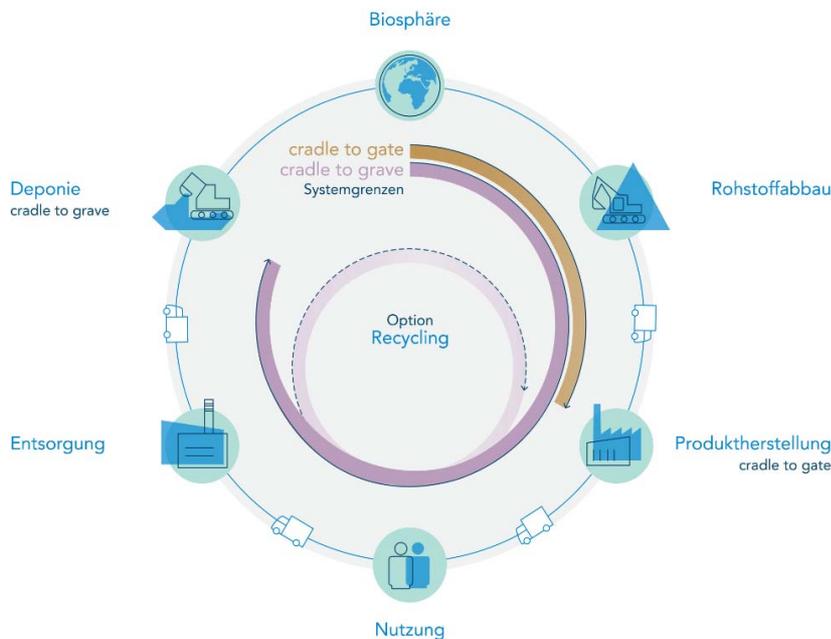


Abbildung 7-1 - Die Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse betrachtet den gesamten Lebensweg des untersuchten Systems.

7.1. Vorgehen

Das Vorgehen richtete sich im Wesentlichen nach der Norm ISO 14'040/44⁴ und umfasst die folgenden Schritte, siehe auch Abbildung 7-2:

ISO 14'040

1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens (Rahmenbedingungen)
2. Erfassen der relevanten Stoff- und Energieströme sowie des Ressourcenbedarfs (Sachbilanz oder Inventar)
3. Bestimmen der Auswirkungen auf die Umwelt (Wirkungsabschätzung)
4. Interpretation der Umweltauswirkungen aufgrund der Zielsetzungen (Auswertung)

⁴ ISO 14040. (2006). Environmental management–Life cycle assessment–Requirements and guidelines. Geneva. ISO 14044. (2006). Environmental management–Life cycle assessment–Principles and framework. Geneva.

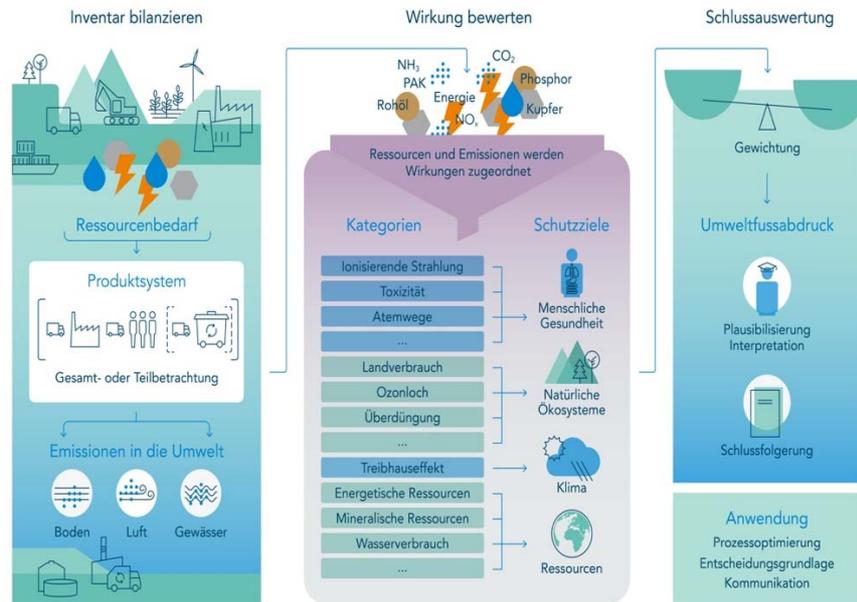


Abbildung 7-2 - Schematische Funktionsweise der Ökobilanz.



7.2. Zielsetzung und Rahmenbedingungen

Die Definition der zu untersuchenden und vergleichenden Systeme wurde an zwei Workshops im Beisein des Auftraggebers, verschiedener Kantone und des Planerteams festgelegt. Sie entsprechen den in Kapitel 4.4 aufgeführten Szenarien und Varianten. Die Vergleichsbasis (Funktionelle Einheit) der Ökobilanz ist eine exemplarische Siedlungsabfalldeponie über einen Zeitraum von 50 Jahren ab Sanierungsbeginn. Die Systemgrenzen umfassen alle relevanten direkten und indirekten Prozesse, welche für die Sanierung notwendig sind sowie deren vor- und nachgelagerten Prozesse. D.h. es werden z.B. nicht nur die Emissionen der Baumaschinen oder Transporte betrachtet, sondern auch die Bereitstellung der Treibstoffe, die Herstellung der Maschinen und der Infrastruktur, wie z.B. Strassen sowie die Bereitstellung und ggf. Entsorgung der benötigten Materialien.

Vergleichsbasis

7.2.1. Sachbilanz oder Inventar

In der Sachbilanz wird ein Modell für das zu bilanzierende System entworfen und es werden die Energie- und Stoffflüsse der damit verbundenen Prozesse erfasst. Diese umfassen:

Energie- und Stoffflüsse

- Die Beziehungen eines Prozesses mit anderen Prozessen der Technosphäre, wie z. B. Menge an benötigten Rohmaterialien und Hilfsstoffen, Energiebedarf, Transporte und Verwertungs- beziehungsweise Entsorgungssysteme
- Die Beziehungen eines Prozesses mit seiner natürlichen Umwelt der Ökosphäre, wie z. B. Bedarf an Ressourcen (fossile Energieträger, Landressourcen etc.) und Emissionen. (CO₂, VOC, Methan, Stickoxide u. a.)

Um die Material- und Energieflüsse der vorgelagerten Prozesse, wie z. B. Herstellung von Werkstoffen oder Bereitstellung von Energieträgern, zu berechnen, werden die Systemgrößen wie Mengenströme sowie die Energieaufwände, der Hilfsmaterialbedarf und die Transporte sämtlicher Aktivitäten etc. mit Daten aus Ökobilanzdatenbanken verknüpft. Die Systemgrößen werden als Vordergrund-

Vorgelagerte Prozesse

daten bezeichnet. Diese wurden durch den Projektpartner Sieber Cassina + Partner AG bereitgestellt, siehe auch Kapitel 6 und Anhang A4 (Grundlagen CO₂ Bilanz).

Die Daten aus den Ökobilanzdatenbanken werden mit Hintergrunddaten bezeichnet. Dabei wurde die Hintergrunddatenbank UVEK:2018 verwendet, da diese vom BAFU unterstützt und empfohlen wird.

Die Sachbilanz sowie die Umweltauswirkungen und deren Bewertung wurde mit der Ökobilanz-Software SimaPro V9⁵ berechnet.

Hintergrunddaten

Software



7.2.2.

Auswirkungen auf die Umwelt (Wirkbilanz) und Bewertung

Die verschiedenen Auswirkungen auf die Umwelt, wie Schäden an der menschlichen Gesundheit oder an Ökosystemen, Auswirkungen auf das Klima, Ressourcenentnahmen etc., wurden berechnet, jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit und Verständlichkeit nicht im Bericht ausgewiesen. Einzig die Auswirkungen auf das Klima wurden auf Grund deren Relevanz separat ausgewiesen:

*Klimabilanz
IPCC 2021*



Klimabilanz nach IPCC 2021.

Die Klimabilanz nach IPCC (2021) bewertet nur die klimarelevanten Emissionen. Diese werden anhand ihres Treibhausgaspotentials in CO₂-Äquivalente umgerechnet. Diese Methode ist der Standard für Klimabilanzen.

*Klimabilanz
nach IPCC*

Zur Bewertung der Vielzahl von Umweltauswirkungen wurde folgende Methode verwendet:

Methoden

Methode der ökologischen Knappheit (UBP 2021),

Die Methode der ökologischen Knappheit (vgl. [34] 2021) wurde mit dem Ziel entwickelt, die verschiedenen Umweltauswirkungen (u.a. Treibhausgasemissionen, weitere Luftschadstoffe, Versauerungs-Emissionen, Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen, Emissionen ins Wasser und Boden etc.) zu einer einzigen Kenngrösse (Umweltbelastungspunkte [UBP]) zusammenzufassen. Je grösser die Umweltbelastung des untersuchten Systems ist, desto mehr Umweltbelastungspunkte erzeugt seine Bewertung. Diese Methode wurde seit den 1980er-Jahren mit Unterstützung des Bundesamts für Umwelt laufend weiterentwickelt und hat sich in der Zwischenzeit in der Schweiz etabliert. Diese Methode wurde einerseits gewählt, weil sie für die Bewertung die aktuelle Umweltsituation an den Umweltziele der schweizerischen Umweltpolitik misst und somit bezüglich Werthaltung breit abgestützt ist. Ein weiterer Grund war, dass diese Methode sehr umfassend ist – deckt eine breite Palette von Umweltwirkungen ab - und alle in dieser Ökobilanz wichtigen Umweltaspekte wie Emissionen in Luft, Wasser und Boden sowie den Verbrauch von energetischen und stofflichen Ressourcen bewertet.

*Methode der
ökologischen
Knappheit*

Zu beachten ist, dass bezüglich der Verwendung von gesamtaggrierenden Bewertungsmethoden, wie die Methode der ökologischen Knappheit eine ist, die Studie nicht vollumfänglich in Übereinstimmung mit der Norm ISO 14'040ff ist, sondern darüber hinausgeht. Diese Norm untersagt die Verwendung von gesamtaggrierenden Methoden für vergleichende Studien, welche für die Öffentlichkeit bestimmt sind. Jedoch entspricht die Verwendung solcher Methoden den Empfehlungen des BAFU⁶. Zudem wird auch von internationalen Experten vermehrt die Notwendigkeit erkannt, solche Methoden zu verwenden, um zu aussagekräftigen Resultaten zu kommen, welche nicht subjektiv geprägt

⁵ PRé Consultants. (2021). SimaPro 9 (Version 9.3.0). PRé Consultants.

⁶ Vgl in der Studie [Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit](#) die Antworten auf die FAQ 2.1.17, 2.1.18, 2.2.2 und 2.2.3

sind (vgl. [33]). Aus diesen Gründen wurden solche Methoden in dieser Studie verwendet.

7.3.

Projektspezifische Rahmenbedingungen

Die wichtigsten Projektparameter wurden vom Projektpartner vorgegeben (vgl. Anhang A4). Dies sind insbesondere die direkten Gasemissionen je Variante und Szenario, die Aufwände für die Installation und Abbau der Entgasungsanlage, inkl. aller Vor- und Nacharbeiten, sowie die Aufwände für den Betrieb.

Da die Deponie in Variante 2 (Totaldekontamination) aufgehoben wird, fallen für diese Variante keine weiteren deponiespezifischen Umweltbelastungen für die verbleibenden 50 Jahre an. Aus diesem Grund wurden für die Varianten 1, 3 und 4 die Deponieemissionen über die verbleibenden Jahre berücksichtigt. Dazu wurde das entsprechende Hintergrundinventar über Deponien angepasst. In diesem wurden die klimarelevanten Luftemissionen gelöscht, da diese bereits anderweitig berücksichtigt werden. Des Weiteren wurde berücksichtigt, dass je nach Szenario ein Teil der wassergebundenen Emissionen bereits stattgefunden hat. Konkret wird im UVEK-Inventar davon ausgegangen, dass es innerhalb von 100 Jahren zu Emissionen via Abwasserreinigungsanlage kommt. Diese wurden linear über diese 100 Jahre angepasst. Dies bedeutet beispielsweise für das Szenario 1, dass bis zum Sanierungszeitpunkt erst 20 % der gewässerrelevanten Emissionen stattgefunden haben – es also in den Varianten 1, 3 und 4 noch zur Emission der restlichen 80 % kommt, während bei Variante 2 (Totaldekontamination) keine weiteren Emissionen mehr stattfinden. In der Realität ist eher eine exponentielle Abnahme der Sickerwasseremissionen zu erwarten. Somit sind die Sickerwasseremissionen tendenziell überschätzt.

Für die Entsorgung des Deponats in externen Deponien wurde mit den entsprechenden Hintergrundinventaren über Deponien abgebildet. Für die Entsorgung des Deponats in der KVA wurde die Energierückgewinnung berücksichtigt. D.h. es wurde berücksichtigt, dass durch die Verbrennung des Deponiematerials Energie (Strom und Wärme) produziert werden kann, welche dadurch anderweitig produzierte Energie ersetzt. Dieses Vorgehen wird damit begründet, dass in den anderen Varianten keine thermische Verwertung der im Deponat enthaltenen Energie stattfindet, bzw. diese nicht genutzt werden kann. Dabei wurde berücksichtigt, dass durch die bisher erfolgten Zersetzungsprozesse der Anteil an DOC reduziert ist und entsprechend weniger Energie aus dem Deponat gewonnen werden kann, als wenn frischer Siedlungsabfall verbrannt wird. Dieser Faktor wurde aus dem Verhältnis des ursprünglichen DOC-Anteils mit dem DOC-Anteil je Variante berechnet. Konkret betragen diese Faktoren für Szenario 1: 54 %, für Szenario 2: 52.3 % und für Szenario 3: 51.1 %.

Die Bohrung der Gasbrunnen für die Varianten 3 und 4 wurde mit einem Inventar für die Bohrung von Geothermie-Wärmepumpen angenähert. Dazu wurden sämtliche Aufwände linear anhand des Aushubvolumens extrapoliert (das Kältemittel wurde vernachlässigt).

Schliesslich wurde angenommen, dass die ursprüngliche Deponieinfrastruktur für alle Szenarien gleich ist und entsprechend für den Vergleich ausgeklammert werden kann.

Gasemissionen
je Variante und
Szenario

Inventar Sa-
nitary Landfill

Energierückge-
winnung be-
rücksichtigt

Bohrungen
Gasbrunnen

Deponieinfra-
struktur ausge-
klammert



7.4. Resultate Umweltauswirkungen

7.4.1. Umweltbelastung der Varianten je Szenario

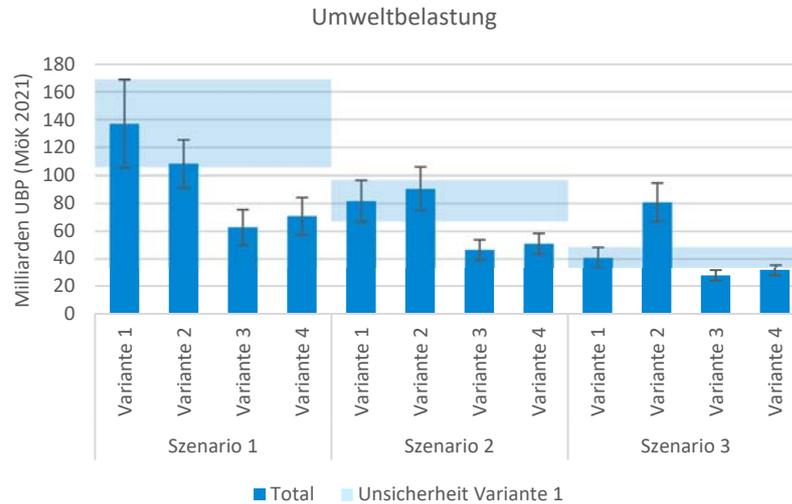


Abbildung 7-3 - Umweltbelastung der untersuchten Szenarien und Varianten nach der Methode der ökologischen Knappheit (MöK) 2021

Die Resultate bezüglich Gesamtumweltbelastung mit der Methode der ökologischen Knappheit 2021 variieren stark je nach Szenario. Grundsätzlich sinkt die noch anfallende Umweltbelastung mit zunehmendem Alter der Deponie aufgrund des geringeren noch vorhandenen C_{bio} -Gehalts. Am deutlichsten wird dieser Zusammenhang bei Variante 1 (Status Quo). Den kleinsten Unterschied macht das Alter der Deponie bei Variante 2 (Totaldekontamination). Dies liegt daran, dass der biogene Kohlenstoffgehalt für die Verbrennung in der KVA nicht relevant ist, im Gegensatz zum fossilen Kohlenstoff im Deponat, der mit dem Alter der Deponie nicht variiert.

Bezüglich der Umweltbelastung ist denn auch Variante 2 (Totaldekontamination) in allen Szenarien vergleichbar oder schlechter als Variante 1 (Status Quo).

Variante 3 (Aerobisierung) und Variante 4 (aktive Entgasung) weisen innerhalb desselben Szenarios die geringsten Umweltbelastungen auf, wobei Variante 3 tendenziell besser abschneidet als Variante 4. Bei Szenario 3 weist jedoch nur noch die Aerobisierung eine deutlich bessere Umweltbelastung als der Status Quo auf, während die aktive Entgasung innerhalb des Unsicherheitsbereichs liegt. Im Umkehrschluss kann gesagt werden, dass Variante 3 und Variante 4 in allen Varianten ganz sicher nicht schlechter abschneiden als Variante 1 oder Variante 2.

Umweltbelastung sinkt mit Alter der Deponie

Variante 2 schlechteste Option

Variante 3 am besten

7.4.2.

Prozessbeiträge zur Umweltbelastung

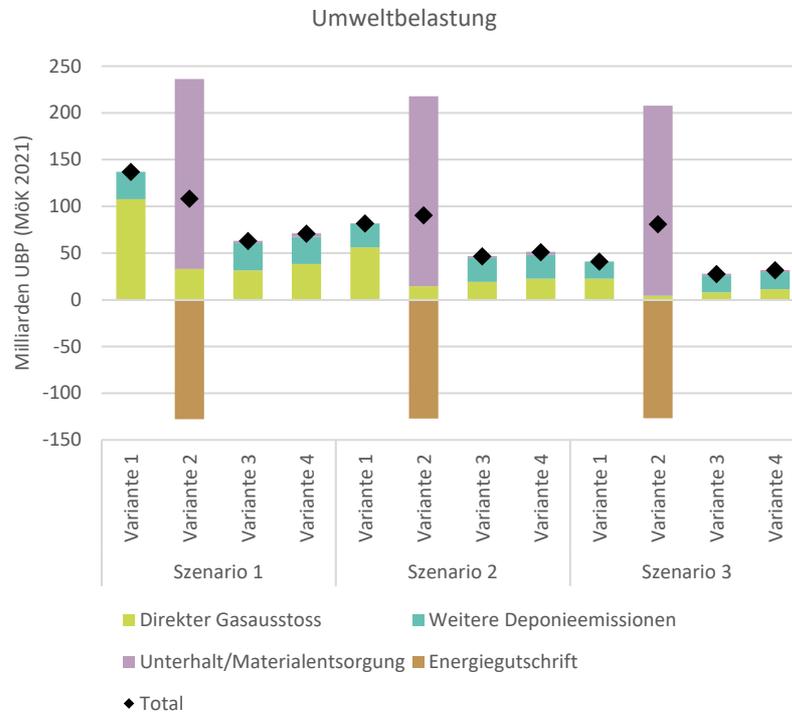


Abbildung 7-4 - Beiträge der Prozesse zur Umweltbelastung nach der Methode der ökologischen Knappheit 2021

Für die meisten Szenarien und Varianten stellt der direkte Gasausstoss den grössten Beitrag zur Umweltbelastung dar. Dies ist insbesondere der Fall für Variante 1 (Status Quo), da hier der grösste Anteil des biogenen Kohlenstoffs als Methan entweicht, während der Aufwand für den Unterhalt minimal ist.

Bei den Varianten, die eine Nachsorge der Deponie voraussetzen, tragen zudem die weiteren Deponieemissionen zur Umweltbelastung bei. Dies sind vor allem Nitrat- und Ammonium-Emissionen in Gewässer.

Im Vergleich dazu spielt der Unterhalt der Deponien eine untergeordnete Rolle. Selbst bei Szenario 3, Variante 4 trägt der direkte Gasausstoss der Deponie mehr als doppelt so stark zur Umweltbelastung bei als die ganzen Aufwendungen für die technischen Massnahmen (Installation, Betrieb und Entsorgung der Gasfassungen). Die grosse Ausnahme davon ist Variante 2, wo die Materialentsorgung massgebend zur Umweltbelastung beiträgt:

Alleine der Transport des Deponats in die KVA und Deponien (Annahme 50 km) verursacht eine Umweltbelastung in der gleichen Grössenordnung wie die Entgasungsanlage in den Varianten 3 und 4. Der allergrösste Anteil der Umweltbelastung in Variante 2 geht jedoch auf die anschliessende Verbrennung des Deponats in der KVA zurück (siehe auch Abbildung 7-5) trotz der Tatsache, dass ein grosser Teil dieser Umweltbelastung durch die Energiegutschrift wieder kompensiert wird.

Direkter Gasausstoss relevant

Unterhalt/Materialentsorgung Sanierungsmassnahmen wenig relevant

Variante 2 Transport in KVA massgebend



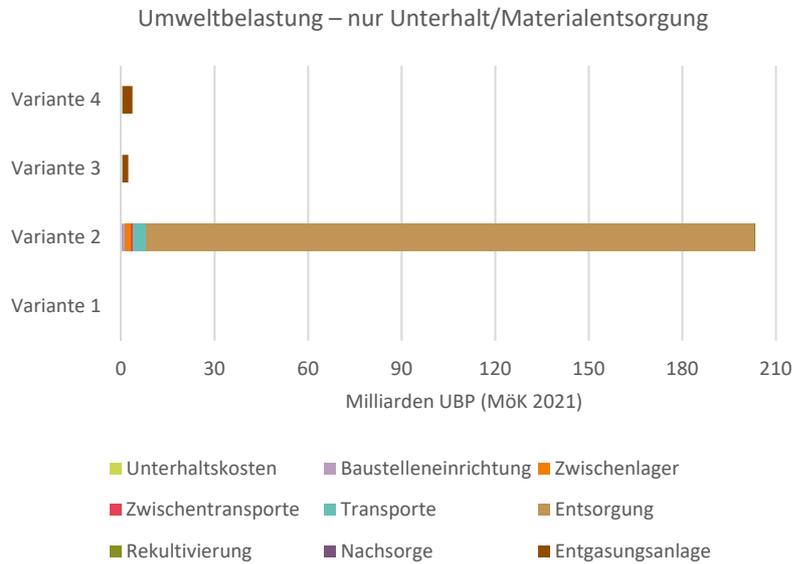


Abbildung 7-5 - Aufteilung der Unterhalts-Beiträge (inkl. Materialentsorgung) für Szenario 1 nach der Methode der ökologischen Knappheit 2021, ohne Energiegutschrift

Bei den Varianten 3 und 4 trägt die Entgasungsanlage am stärksten zur Umweltbelastung bei. Den grössten Anteil hat dabei das Material und das Bohren der Gasbrunnen, gefolgt vom Stromverbrauch für den Betrieb der Gassammelstation. Beim Zwischenlager (orange dargestellt) in Variante 2 ist die Bitumenschicht für den Hauptteil der Umweltbelastung verantwortlich.

Umweltbelastung Entgasungsanlage

In Abbildung 7-5 ist nur Szenario 1 dargestellt. Die Unterschiede bezüglich Unterhaltsaufwände (grün dargestellt) unterscheiden sich zwischen den Szenarien nur bezüglich des Strombedarfs für die Entgasungsanlage.

7.4.3. Klimabelastung der Varianten je Szenario

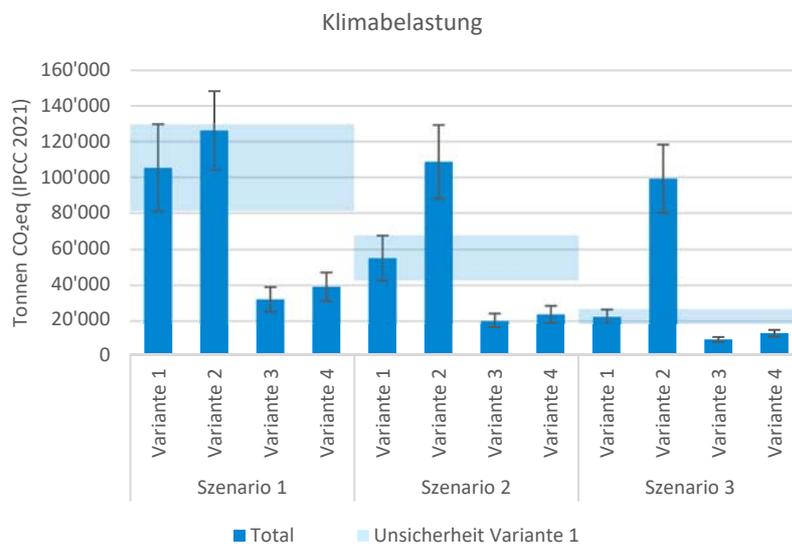


Abbildung 7-6 - Klimabelastung der untersuchten Szenarien und Varianten nach der Methode IPCC 2021



Die Analyse der Klimabelastung nach IPCC 2021 zeigt ähnliche Resultate wie die vorangehende Analyse mit der Methode der ökologischen Knappheit. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien und Varianten fallen nun allerdings noch deutlicher aus.

Aus Sicht der Klimabelastung ist die Totaldekontamination nun für die meisten Szenarien eine signifikant schlechtere Lösung als der Status Quo (bei Szenario 1 liegt die Totaldekontamination noch im Unsicherheitsbereich). Dies liegt vor allem daran, dass durch die Verbrennung in der KVA auch die fossilen Bestandteile der Deponie in die Luft gelangen, während dies bei der Verrottung in der Deponie vorwiegend nur für den biogenen Teil der Fall ist.

Für Szenario 1 – Deponie 20 Jahre nach Ende der Deponierung – weisen die Varianten 3 und 4 deutliche Einsparungen auf. So können gegenüber dem Status Quo mit der Aerobisierung ca. 73'200 Tonnen CO₂ eingespart werden. Mit der Aktiven Entgasung sind es ebenfalls ca. 66'100 Tonnen CO₂.

Bei Szenario 2 fallen diese Einsparungen bereits wesentlich tiefer aus. Bei der Aerobisierung sind es noch 35'200 Tonnen CO₂, bei der Aktiven Entgasung 31'500 Tonnen CO₂. Bei Szenario 3 betragen diese Einsparungen nur noch 13'600 Tonnen CO₂ bei der Aerobisierung, bzw. 10'000 Tonnen CO₂ bei der Aktiven Entgasung.

Analyse Klima-
belastung nach
IPCC

Ähnliche Re-
sultate

IPCC Szenario
1

IPCC Szenario
2



7.4.4. Prozessbeiträge zur Klimabelastung

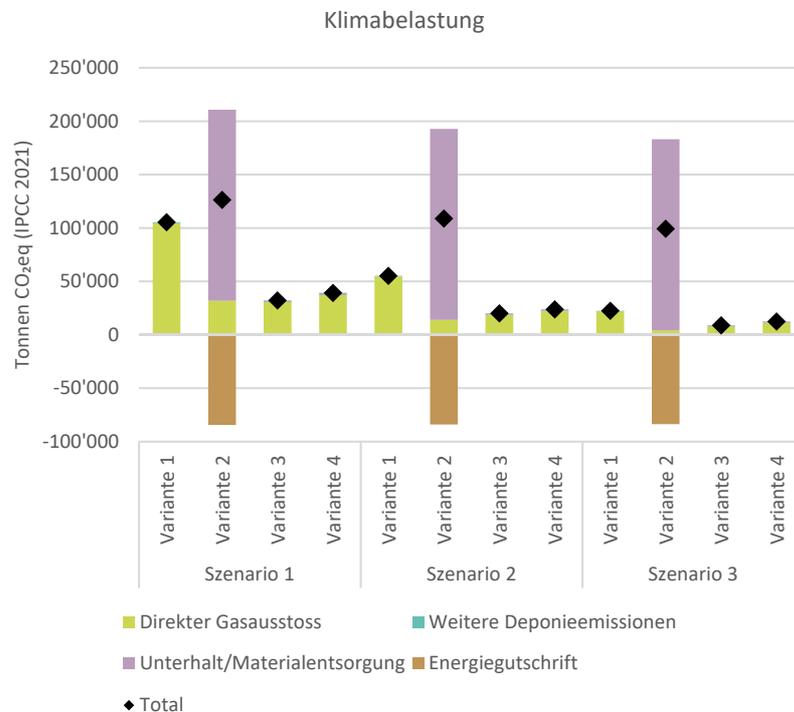


Abbildung 7-7 - Beiträge der Prozesse zur Klimabelastung nach der Methode IPCC 2021

Bei den meisten Szenarien und Varianten ist der direkte Gasausstoss aus der Deponie für den Grossteil der Klimabelastung verantwortlich (4'100 bis 104'500 t CO₂eq). Die weiteren Deponieemissionen spielen keine Rolle, da es sich hierbei vorwiegend um Emissionen in Gewässer handelt, welche dementsprechend wenig klimarelevant sind (450 bis 730 t CO₂eq). Die technischen

Gasausstoss
der Deponie
massgebend

Massnahmen spielen bei den Varianten 1, 3 und 4 nur eine untergeordnete Rolle (120 bis 1'500 t CO₂eq).

Bei Variante 2 hingegen sind die technischen Massnahmen (Hauptanteil Entsorgung) für den weitaus grössten Anteil an der Klimabelastung verantwortlich.

Anteil bei Variante 2

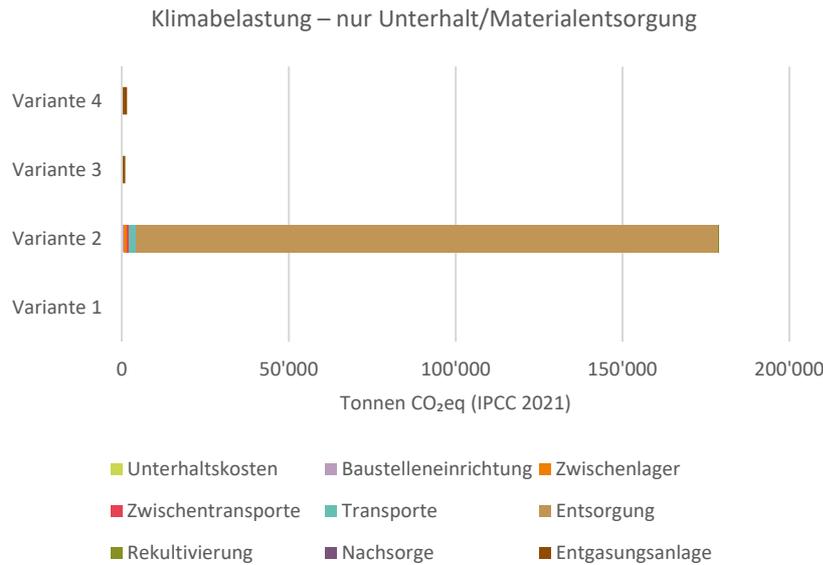


Abbildung 7-8- Aufteilung der Unterhalts-Beiträge (inkl. Materialentsorgung) für Szenario 1 nach der Methode IPCC 2021, ohne Energiegutschrift

Mit 174'600 Tonnen CO₂eq trägt in Variante 2 die Entsorgung den grössten Beitrag zur Klimabelastung bei. Davon entfällt praktisch der ganze Anteil auf die 20 % Verbrennung in der KVA, während die Entsorgung der restlichen 80 % in die thermische Desorption bzw. in die Deponien Typ B und E kaum klimarelevant ist. Auch hier vermag die Energiegutschrift (-83'800 bis -84'500 t CO₂eq) nur knapp die Hälfte der Emissionen aus der Verbrennung des Deponats in der KVA zu kompensieren. Die Transporte in die KVA und Deponien sind zusammen für ca. 2'100 Tonnen CO₂eq verantwortlich.

Entsorgung wesentlicher Anteil zur Klimabelastung

Bei den Varianten 3 und 4 trägt die Entgasungsanlage mit 720 bzw. 1'300 t CO₂eq zur Klimaerwärmung bei. Die restlichen Prozesse der technischen Massnahmen, wie Unterhalt, Baustelleneinrichtung, Nachsorge etc. verursachen jeweils weniger als 230 t CO₂eq Treibhausgasemissionen.

Anteil Entgasungsanlage bei Varianten 3 und 4

7.4.5.

Unsicherheitsanalyse

Die Modellierung eines so umfangreichen und komplexen Systems, wie dies bei Ökobilanzen in der Regel der Fall ist, ist immer mit Unsicherheiten verbunden. Um die Aussagekraft der Analyse zu verifizieren, wurde die Unsicherheit der Resultate mit einer Fehlerrechnung bestimmt. Dazu wurde die Methode der Monte-Carlo-Analysen verwendet. Dabei werden die Resultate bis zu 10'000-mal mit unterschiedlichen Ausgangswerten berechnet. Die Ausgangswerte werden dabei anhand der Wahrscheinlichkeitsverteilungen, welche die Ungenauigkeit der Daten angibt, zufällig festgelegt.

Fehlerrechnung

Die daraus abgeleitete Unsicherheit der verschiedenen Varianten liegt – je nach Bewertungsmethode und Variante – im Bereich von ± 20 %. Basierend auf

Grössenordnung Unsicherheit



diesen Analysen haben wir den blauen Unsicherheitsbalken in den Grafiken eingeführt, der die Quintessenz dieser Unsicherheitsanalysen veranschaulichen soll.

Variante 3 schneidet in allen Szenarien signifikant besser ab als die Referenzvariante Status Quo. Variante 4 schneidet in Szenario 1 und 2 besser ab als die Referenzvariante, in Szenario 3 ist dieser Unterschied nicht mehr signifikant. Zwischen Variante 3 und 4 ist der Unterschied nicht signifikant ausser in Szenario 3, in der Tendenz schneidet die Variante 3 schlechter ab als Variante 4.

Vergleich Varianten 3 und 4

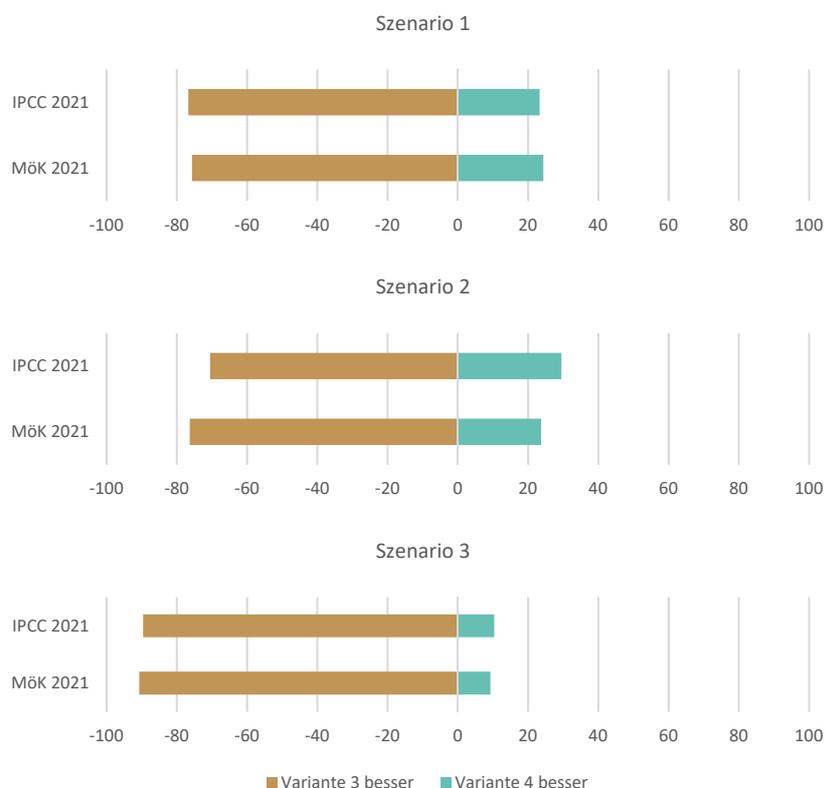


Abbildung 7-9 - Wahrscheinlichkeitsverteilung der Monte-Carlo-Analyse mit je 10'000 Durchläufen. Der braune Balken zeigt die Wahrscheinlichkeit, dass Variante 3 eine tiefere Umweltbelastung aufweist, der grüne Balken, dass Variante 4 eine tiefere Umweltbelastung aufweist

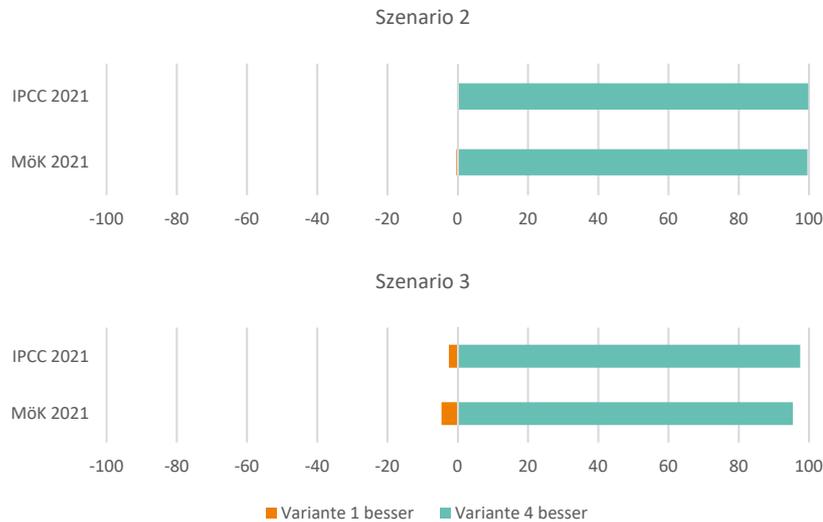


Abbildung 7-10 - Wahrscheinlichkeitsverteilung der Monte-Carlo-Analyse mit je 10'000 Durchläufen. Der braune Balken zeigt die Wahrscheinlichkeit, dass Variante 1 eine geringere Klima- bzw. Umweltbelastung aufweist, der grüne Balken, dass Variante 4 eine tiefere Umweltbelastung aufweist

7.5.

Fazit aus Umweltsicht

Die Umweltanalysen zeigen, dass in allen Fällen mit einer Aerobisierung der Deponie die Umweltbelastung gesenkt werden kann im Vergleich zum Status quo. Auch mit einer aktiven Entgasung kann die Situation verbessert werden. Dabei ist die Umweltbelastungsreduktion umso grösser, je jünger die Deponie ist.

Möglichst bald Aerobisieren

Keine sinnvolle Alternative ist die Totaldekontamination, da hierbei die Umweltbelastung mindestens gleich hoch oder höher ist im Vergleich zum Variante 1: Status quo.

Im aus Klimasicht besten Fall (Aerobisierung einer 20 Jahre alten Deponie, Szenario 1, Variante 3) können pro Sanierung 73'200 Tonnen CO₂eq eingespart werden. Dies ist eine beachtliche Menge, welche einer Autofahrt von mehr als 224 Millionen Kilometern entspricht. Dies entspräche der Erdumrundung von mehr als 5'600 Benzinautos. Dies ist auch die gleiche Menge, wie sie 13'500 Menschen in der Schweiz im Jahr 2019 verursachten.⁷

Besten Fall Aerobisierung einer wenig alten Deponie

7.6.

Grenzen der Ökobilanz

Obwohl die Ökobilanzierung heute als die umfassendste Methode gilt, um Umweltauswirkungen zu beurteilen, so hat sie auch ihre Grenzen. Im Zusammenhang mit dieser Studie sind folgende Grenzen zu erwähnen:

Erläuterung Grenzen Ökobilanzierung

- Die Ökobilanzierung verfolgt, mit dem Anspruch den gesamten Lebensweg zu berücksichtigen, einen globalen Ansatz. Dies ist in unserer globalen Wirtschaft durchaus notwendig, um eine Gesamtsicht zu erhalten. Dies kann jedoch dazu führen, dass lokale Auswirkungen in den gesamten Umweltauswirkungen nicht erkannt werden, weil sie in dieser Gesamtsicht nicht sehr relevant sind, obwohl sie unter Umständen lokal ein Problem darstellen können.

⁷ Nur direkt in der Schweiz verursachte klimarelevante Emissionen. D.h. ohne Importgüter und Flugreisen. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klima--daten--indikatoren-und-karten/klima--indikatoren/indikator-klima.pt.html>



- Die Ökobilanzierung betrachtet die Nutzung von Ressourcen sowie Energie- und Stoffflüsse, jedoch nicht die Konzentrationen der Emissionen, welche typischerweise die Basis für gesetzliche Grenzwerte sind. Entsprechend sagt die Ökobilanzierung nichts über die Gesetzeskonformität aus.

7.7.

Berechnung der Emissionsverminderung infolge der Sanierungsvarianten 3 und 4

Die Voraussetzungen für die Beantragung von Beiträgen aus KLIK (Stiftung Klimaschutz und CO₂-Kompensation) sind die nachstehend in der Richtlinie des BAFU «Standardmethode für den Nachweis von Emissionsminderungen bei Deponieprojekten» [32] aufgeführten Kriterien:

*KLIK – Stiftung
Klimaschutz
und CO₂ Kom-
pensation*



3.3 Anwendungsbereiche und Vorgaben der Standardmethode

Grundsätzlich müssen Emissionsverminderungsprojekte, die die vorliegende Standardmethode anwenden, den Vorgaben der CO₂-Verordnung entsprechen und die entsprechende Vollzugsmitteilung berücksichtigen.

Die Standardmethode ist nur anwendbar, wenn folgende Kriterien erfüllt sind:

Allgemeine Anforderungen für alle Projekte/Massnahmen

1. Die Deponie befindet sich auf Schweizer Boden.
2. Die Deponie und die geplanten Massnahmen¹⁴ zur Emissionsverminderungen halten die Ausführungsvorschriften der Umweltschutzgesetzgebung ein, insbesondere die Luftreinhalte Verordnung (LRV) und die Technische Verordnung über Abfälle (TVA).
3. Die Deponie oder Altablagerung verursacht ohne die geplante Massnahme (d.h. in der Referenzentwicklung) Methanemissionen. Dazu muss ein ausreichend hoher Anteil an organischen Abfällen (z.B. Kehricht) vorhanden sein.
4. Die geplanten Massnahmen sind nicht bereits gesetzlich oder per Verfügung vorgeschrieben¹⁵.
5. Die geplanten Massnahmen müssen mindestens dem Stand der Technik entsprechen. Das System der Schwachgasbehandlung muss also auf die derzeitige und zukünftige Deponiegaszusammensetzung optimiert sein.
6. Der Beginn der Umsetzung (=Umsetzungsbeginn) des Projektes darf bei der Einreichung des Gesuchs bei der Vollzugsbehörde nicht länger als 3 Monate zurück liegen. Der Beginn der Umsetzung entspricht in der Regel dem Zeitpunkt, zu dem sich der Gesuchsteller gegenüber Dritten massgeblich finanziell verpflichtet hat. Das Durchführen von Absaugversuchen im Zusammenhang mit der Erarbeitung eines Gesuchs für ein Deponiegasprojekt kann nötig sein.

¹³ First Order Decay Model. Siehe CDM Methodological Tool „Emissions from solid waste disposal sites“

¹⁴ Als Massnahmen gelten Technologien und Prozesse, welche zur Verminderung von Treibhausgasemissionen führen. Biofilter gelten nicht als solche Massnahmen, da sie hauptsächlich der Geruchsverminderung dienen.

¹⁵ Wurde zum Beispiel von zuständigen Behörden der Einsatz einer Fackel verfügt, so können entsprechende Emissionsverminderungen nicht geltend gemacht werden, da der Einsatz der Fackel per Verfügung der Referenzentwicklung entspricht.

Abbildung 7-11 - Auszug aus Richtlinie BAFU [32]

Die Ermittlung der aus dem Abbau von C_{bio} aus den Abfällen resultierenden Produktion von Deponiegas CH₄ erfolgt auch hier mit den in Anhang A2 zusammengefassten Berechnungsannahmen. Gemäss der Standardmethode für den Nachweis von Emissionsminderungen bei Deponieprojekten [32] werden verschiedene Berechnungsparameter jedoch anders vorgegeben, als sie vorangehend als Grundlage für die Umweltbilanzierung verwendet wurden. Für die Ermittlung der CO₂-eq-Emissionen, bzw. der Emissionsminderungen wurden bei den Sanierungsvarianten 1, 3 und 4 für GWPCH₄ und die Methanoxidation (Oxidationsfaktor OX) die in [32] vorgegebenen Werte in Anhang A2 verwendet. Ein zentraler Wert für die Berechnungen ist der Oxidationsfaktor OX, der vorgibt, welcher Anteil des in der Deponie produzierten Methans bereits im Bereich der

*Vorgegebene
Berechnungs-
annahmen*

Deponieoberfläche bzw. der Deckschicht oxidiert wurde. Für dessen Festlegung gilt gemäss [32] folgender Entscheidungsbaum:

Ein zentraler Wert für die Berechnungen ist der Oxidationsfaktor OX. Die Wahl des Wertes ergibt sich aus dem folgenden Entscheidungsbaum:

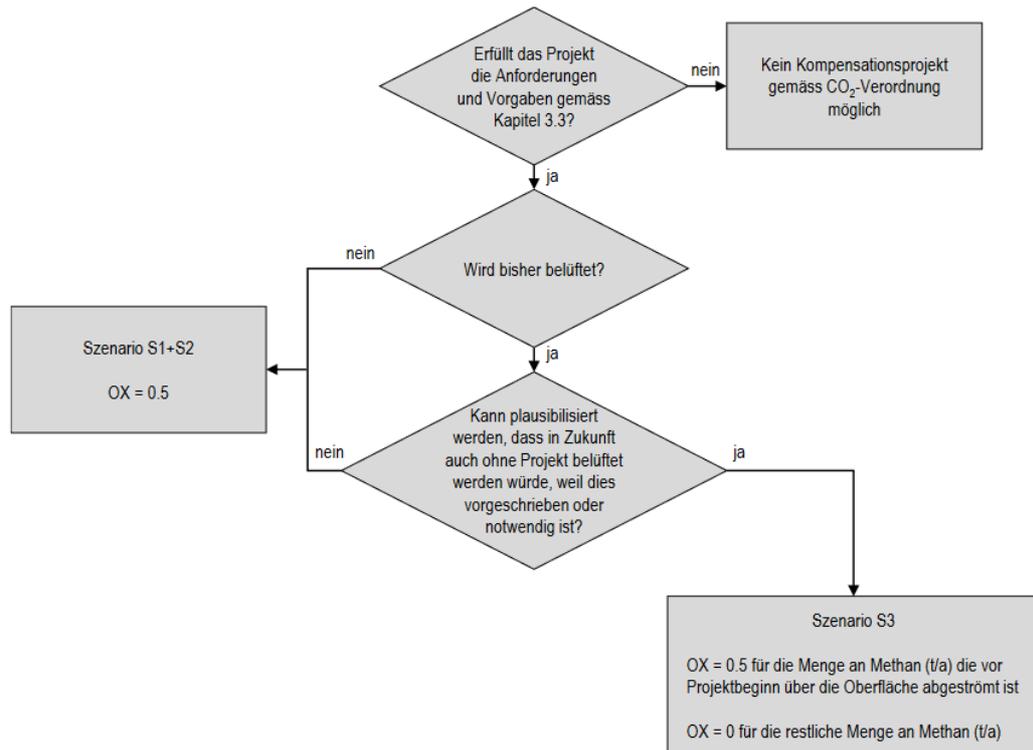


Abbildung 7-12 - Entscheidungsbaum zur Bestimmung des Parameters OX

Tabelle 7-1- Berechnungsannahmen für die technischen Wirkungsgrade der Fassungs- und Abfackelungseinrichtungen sowie Stromverbrauch, Oxidationsfaktor OX und GWPCH₄

Berechnungsvorgaben:

		Variante 1	Variante 3	Variante 4
		Status Quo	Aerobisierung	Abfackelung
Erfassungsgrad		0%	100%	80%
Abfackelungseffizienz		0%	90%	90%
Stromverbrauch V1 (KW/h) bei Std/a	8'760		20	10
Stromverbrauch V2 (KW/h) bei Std/a	8'760		20	10
Stromverbrauch V3 (KW/h) bei Std/a	8'760		15	7
Methanoxidation Deckschicht (OX)		50%	50%	50%
GWP _{CH4} CO ₂ -Äquivalenz von CH ₄ (25 - 2.75)		22.25	22.25	22.25

Bei den in der Gasprognose IPCC berechneten Emissionen wurden die CO₂-Emissionen aus dem Stromverbrauch und die Methanoxidation (OX) nicht berücksichtigt. Die Emissionen werden über 50 Jahre kumuliert. Die Ermittlung der CO₂-eq-Emissionen und darauf basierend der Emissionsminderungen der Sanierungsvarianten 3 (Aerobisierung) und 4 (herkömmliche Gaserfassung) gegenüber der Variante 1 (Status Quo), erfolgte mit den in Anhang A2 erläuterten Berechnungsansätzen unter Verwendung der in Tabelle 7-1 angegebenen Werte.

Weitere Rahmenbedingungen für die Ermittlung der KLIK Beiträge



Tabelle 7-2 - Ermittlung der Emissionsminderungen der Sanierungsvarianten 3 und 4 gegenüber Variante 1 (Status Quo) unter Berücksichtigung der in Anhang A3 angegebenen Berechnungsvorgaben

	Sanierungsvariante 1 (Status Quo)			Sanierungsvariante 3 (Aerobisierung)			Sanierungsvariante 4 (konventionelle Entgasung)		
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Summe Emissionen aus CH ₄ (IPCC) für OX% = 0 (t CO ₂ -eq)	76'311	39'677	15'914	22'803	13'484	5'388	28'158	16'299	8'246
Abzüglich Methanoxidation (OX% = 50%) (t CO ₂ -eq)	38'156	19'838	7'957	11'402	6'742	2'694	14'079	8'149	4'123
Betriebsdauer der Massnahme (Jahre)	50	50	50	15	12	10	50	40	30
Zuzüglich t CO ₂ -eq aus Stromverbrauch	2.42E-05	0	0	64	51	32	106	85	45
Für KLIK bereinigte totale CO₂-eq auf 50 Jahre	38'156	19'838	7'957	11'465	6'793	2'726	14'185	8'234	4'168
Verminderung gegenüber Szenario 1 (t CO ₂ -eq)	0	0	0	26'690	13'046	5'231	23'971	11'604	3'789
Kostenbeiträge von KLIK (CHF/t CO ₂)	120	0	0	3'202'847	1'565'462	627'743	2'876'468	1'392'485	454'731
Bei Überschreitung Baukosten um 150%	70								
Total Baukosten Kostenschätzung_v2.1	3'500'000	3'500'000	3'500'000	7'000'000	6'700'000	6'300'000	9'000'000	8'300'000	7'300'000
Netto Baukosten nach Abzug der KLIK-Beiträge	3'500'000	3'500'000	3'500'000	3'797'153	5'134'538	5'672'257	6'123'532	6'907'515	6'845'269

Für die aus Szenario 2 (Totalsanierung durch Ausräumen) zu erwartenden Emissionsminderungen sieht KLIK keine Beiträge vor.

*Totalsanierung
keine KLIK
Beiträge*



8. Schlussfolgerungen

8.1. Gegenüberstellung der Resultate

	Szenario 1: Cbio > 12 kg/t TM				Szenario 2: 12 kg/t TM > Cbio < 6 kg/t TM				Szenario 3: 6 kg/t TM > Cbio < 2.5 kg/t TM			
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Emissionen total (CO₂-eq)	105'299	126'220	32'128	39'176	55'160	108'732	19'973	23'694	22'338	99'261	8'768	12'330
Anteil Gasemissionen	104'448	31'878	30'464	36'992	54'400	13'926	18'496	21'760	21'760	4'134	7'616	10'880
Anteil aus Massnahmen - Gutschrift	851	94'341	1'664	2'184	760	94'805	1'477	1'934	578	95'126	1'152	1'450
Umweltbelastung (Mia.UBP)	137	108	63	71	82	90	47	51	41	81	28	32
Anteil Gasemissionen	108	33	31	38	56	14	19	22	22	4	8	11
Anteil aus Massnahmen - Gutschrift	29	75	31	33	26	76	28	29	18	77	20	20
Kosten (Mio.CHF)	3.5	108.6	7	9	3.5	108.6	6.7	8.3	3.5	108.6	6.3	7.3
Kosteneffizienz der Einsparungen gegenüber Var.1 (CHF/CO₂-eq)	0.0	-5'024	48	83	0	-1'962	91	153	0	-1'366	206	380

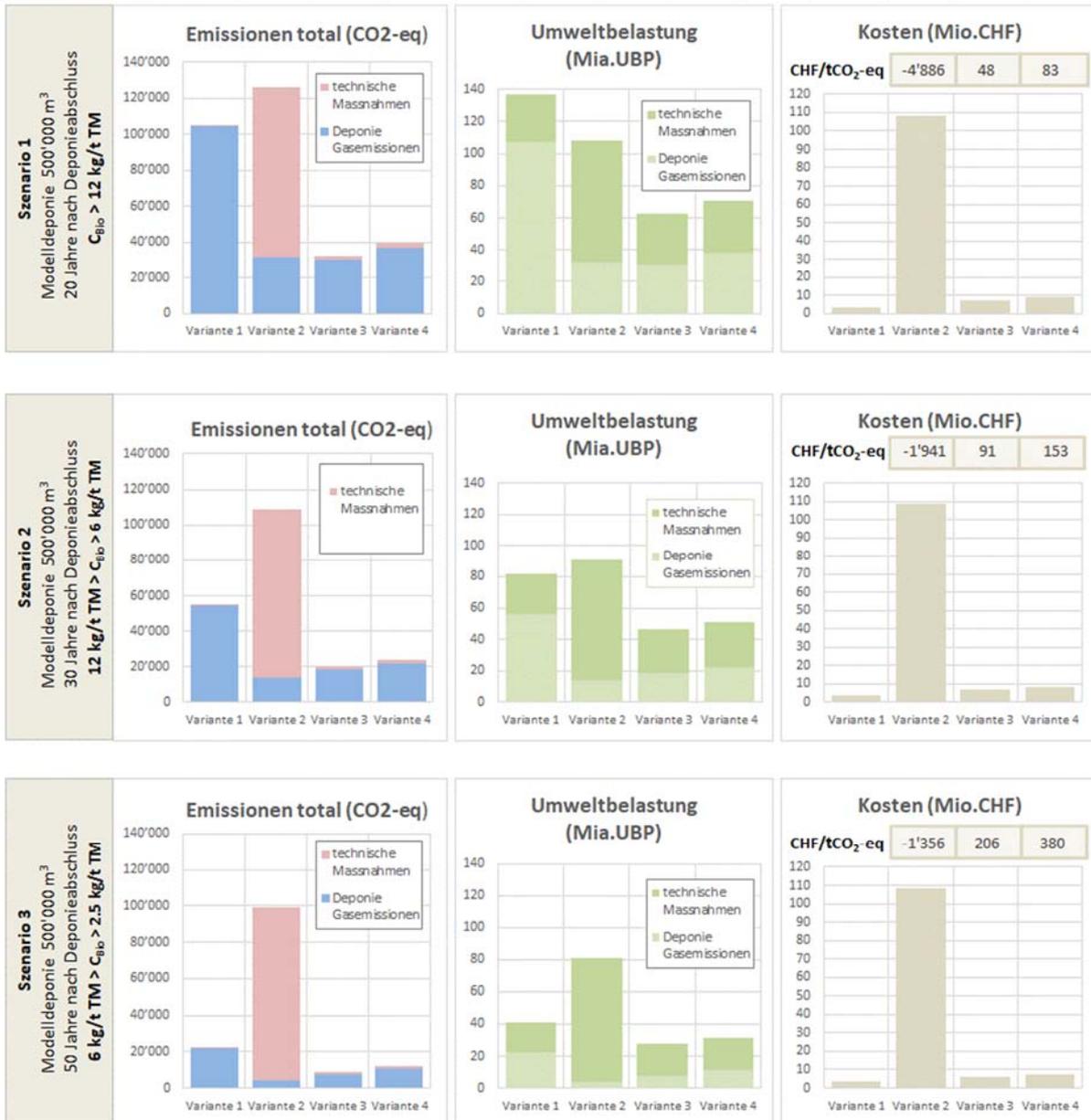


Abbildung 8-1 - Zusammenfassende Gegenüberstellung der Resultate



Die Erkenntnisse aus den Modellberechnungen für die 4 untersuchten Sanierungsvarianten sind für die 3 verschiedenen Deponieszenarien bezüglich Gasemissionen, Umweltbelastung und Kosten in der Abbildung 8-1 zusammengefasst. Die Auswirkungen auf die Sickerwasseremissionen sind dabei nur qualitativ abgehandelt, während für die Deponiegasemissionen, die Umweltbelastung und die Kosten numerische Werte berechnet wurden.

Resultate Modellberechnungen



Gemäss den Projektvorgaben wurden folgende Sanierungsvarianten untersucht:

Projektvorgaben Sanierungsvarianten



Variante 1: **Status Quo**: Die Deponie wird sich selbst überlassen und die Verrottungsprozesse klingen über die nächsten 50 Jahre allmählich ab.

Variante 2: **Totaldekontamination**: Die Deponie wird ausgehoben, die Abfälle Triagiert, transportiert, behandelt und extern entsorgt. Die brennbaren Anteile werden in einer KVA thermisch verwertet, was verwertbar ist wird verwertet und die restlichen Abfälle gelangen in Schweizer Oberflächendeponien (Typ B und Typ E).



carbotech
Smartwaste and Biogas

Variante 3: **Aerobisierung**: Der Deponiekörper wird aktiv belüftet und die Deponiegase gefasst und behandelt (mittels Gasmotors oder Gasfackel, soweit brennbar und mittels katalytischer Oxidation, wenn nicht mehr selbst brennbar).

Variante 4: **Aktive Entgasung ohne Aerobisierung**: Der Deponiekörper wird aktiv entgast und die Deponiegase gefasst und behandelt (mittels Gasmotors oder Gasfackel, soweit brennbar und mittels katalytischer Oxidation, wenn nicht mehr selbst brennbar).

Die Modellannahmen für die Deponie sind im Kapitel 4.3 sowie im Anhang A2 detailliert erläutert.

8.2. Diskussion der Ergebnisse

8.2.1. Auswirkung der Sanierungsvarianten auf die Emissionen von CO₂-eq

Aus Sicht der Klimabelastung verursacht die Totaldekontamination bei allen untersuchten Szenarien eindeutig die höchsten CO₂-eq Emissionen. Dies vor allem deshalb, weil bei der Verbrennung in der Kehrichtverbrennungsanlage auch die fossilen organischen Anteile der Abfälle CO₂ freisetzen, wogegen bei der anaeroben Verrottung und aeroben in situ Stabilisierung nur ein Abbau des biogenen Anteils stattfindet.

Totaldekontamination hat die höchsten CO₂-eq Emissionen

Sowohl die Aerobisierung (Variante 3) wie auch die aktive Entgasung ohne Aerobisierung (Variante 4) führen gegenüber dem Status Quo (Variante 1) bei den gewählten Annahmen zu einer Reduktion der CO₂-eq Emissionen in der Grössenordnung von mindestens 45% - 70%. Der Sanierungseffekt ist umso grösser je höher der noch vorhandene abbaubare organische Anteil in der Deponie ist (siehe Tabelle 8-1). Die CO₂-eq Emissionen aus den technischen und betrieblichen Massnahmen fallen bei den Varianten 3 und 4 nur geringfügig ins Gewicht.

Varianten 3 und 4 deutlich besser als Status Quo

Tabelle 8-1 - Reduktion der CO_{2-eq} Emissionen der Variante 3 und 4 gegenüber Status Quo (Variante 1)

Szenario 1 C _{bio} > 12 kg/t TM		Szenario 2 12 kg/t TM > C _{bio} < 6 kg/t TM		Szenario 3 6 kg/t TM > C _{bio} < 2.5 kg/t TM	
Variante 3	Variante 4	Variante 3	Variante 4	Variante 3	Variante 4
69%	63%	64%	57%	61%	45%

Aus Klimasicht können im Szenario 1/Variante 3 (Aerobisierung einer 20 Jahre alten Deponie) mit der Aerobisierung ca. 73'200 Tonnen CO_{2-eq} eingespart werden (ohne Berücksichtigung einer Methanoxidation in der Deckschicht). Das entspricht ca. den jährlichen CO_{2-eq} Emissionen von 13'500 Menschen in der Schweiz.⁸

8.2.2.

Auswirkung der Sanierungsvarianten auf die Umweltbelastung

Die nach der Methode der ökologischen Knappheit berücksichtigten Prozesse sind im Kapitel 7 erläutert. In Abbildung 8-1 ist die gesamte Umweltbelastung (Mia. UBP) und der Anteil UBP aus den direkten Deponiegasemissionen dargestellt.

Die Grafik zeigt den bedeutenden Anteil der Deponiegasemissionen an der Umweltbelastung, besonders beim Status Quo (Variante 1), wo das Deponiegas einen hohen Anteil an Methan aufweist. Mit abnehmendem Anteil C_{bio} im Abfall reduziert sich der Beitrag zur Umweltbelastung aus den Gasemissionen im Verhältnis zu den übrigen Prozessen.

Zwar ist die Umweltbelastung bei einer Totaldekontamination (Variante 2) im Szenario 1 noch ca. 20% geringer als beim Status Quo (Variante 1), dies vor allem dank der hohen Energiegutschrift aus der Kehrlichtverbrennung. Bei den Szenarien 2 und 3, mit deutlich geringerem Anteil C_{bio} im Deponiekörper schneiden die Totaldekontamination bereits schlechter ab.

Gegenüber dem Status Quo (Variante 1) kann mit der Aerobisierung, wie auch mit einer aktiven Entgasung ohne Aerobisierung die Umweltbelastung je nach noch vorhandenem Anteil C_{bio} in der Deponie um 20% - 60% reduziert werden (siehe Tabelle 8-2).

Methode der ökologischen Knappheit 2021
Dominantes Gewicht der Gasemissionen
Totaldekontamination schneidet schlecht ab
Varianten 3 und 4 deutlich besser als Status Quo

Tabelle 8-2 - Reduktion der Umweltbelastung der Varianten 3 und 4 gegenüber dem Status Quo (Variante 1), ermittelt als Reduktion der UBP nach der Methode der ökologischen Knappheit 2021.

Szenario 1 C _{bio} > 12 kg/t TM		Szenario 2 12 kg/t TM > C _{bio} < 6 kg/t TM		Szenario 3 6 kg/t TM > C _{bio} < 2.5 kg/t TM	
Variante 3	Variante 4	Variante 3	Variante 4	Variante 3	Variante 4
54%	48%	43%	38%	32%	23%

⁸ Nur direkt in der Schweiz verursachte Klimarelevante Emissionen. D.h. ohne Importgüter und Flugreisen



8.2.3.
Auswirkung der Sanierungsvarianten auf die Sanierungskosten und die Kosteneffizienz

Mit Kosten von ca. CHF 108.6 Mio. bei gleichzeitig durchwegs höheren CO₂-eq Emissionen als der Status Quo (Kosten ca. CHF 3.5 Mio.) ist eine Totaldekontamination nur vertretbar, wenn andere Beweggründe dazukommen.

Die Kosten für die Aerobisierung liegen bei allen Varianten im Rahmen von CHF 6 – 7 Mio. Die Kosten für eine aktive Entgasung ohne Aerobisierung sind mit CHF 7 – 9 Mio. leicht höher als die Aerobisierung. Dies deshalb, weil die aktive Entgasung bis zum Erreichen der Sanierungsziele wesentlich länger betrieben werden muss und während dieser Zeit ein Ersatz der Entgasungseinrichtungen erforderlich würde.

Als Kosteneffizienz wurden die zusätzlichen Kosten einer Sanierungsvariante gegenüber dem Status Quo im Verhältnis zur entsprechenden Emissionsminderung definiert, was den Kosten für die Reduktion pro Tonne CO₂-eq entspricht. Die entsprechenden Werte für die Kosteneffizienz sind in Abbildung 8-1 dargestellt.

Für die Totaldekontamination resultieren negative Werte, da bei dieser Sanierungsvariante bei allen Szenarien höhere CO₂-eq Emissionen entstehen als im Status Quo.

Je geringer der Anteil C_{bio} in der Deponie umso geringer ist die Kosteneffizienz, bzw. umso mehr kostet die Reduktion pro Tonne CO₂-eq. Bei der Aerobisierung (Variante 3) liegen die Kosten je nach Szenario bei 48 CHF/tCO₂-eq, bzw. 91 CHF/tCO₂-eq bzw. 206 CHF/tCO₂-eq (Szenario 1 bis 3).

Bei der aktiven Entgasung ohne Aerobisierung (Variante 4) liegen die Kosten je nach Szenario bei 83 CHF/tCO₂-eq, bzw. 153 CHF/tCO₂-eq, bzw. 380 CHF/tCO₂-eq (Szenario 1 bis 3). Die gegenüber der Aerobisierung (Variante 3) höheren Kosten pro CO₂-eq der Variante 4 sind einerseits durch die etwas geringere Emissionsminderung und die höheren Kosten der Sanierungsmassnahmen begründet.

Zur Einordnung der Grössenordnung der Kosten pro Tonne CO₂-eq der Sanierungsmassnahmen ist nachstehend die Entwicklung der Preise von CO₂-Zertifikaten dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass die Kosten pro Tonne CO₂-eq bei der Aerobisierung von Deponien mit einem C_{bio} > 6 kg/t TM durchaus im Rahmen gängiger Preise für CO₂-Zertifikate liegen.

Für die aktive Entgasung ohne Aerobisierung muss der Anteil C_{bio} in der Deponie mindestens ca. 10 kg/t TM betragen, um aktuell in einem vergleichbaren Kostenrahmen zu CO₂-Zertifikaten zu bleiben.

Totaldekontamination kostet CHF 108 Mio.

Variante 3:
CHF 6 – 7 Mio

Variante 4:
CHF 7 – 9 Mio

Variante 3,
Szenario 1:
48 CHF/t CO₂

Variante 4,
Szenario 1:
83 CHF/t CO₂

Vergleich mit
den Kosten
von CO₂-Zerti-
fikaten



carbotech
Innovative and Reliable

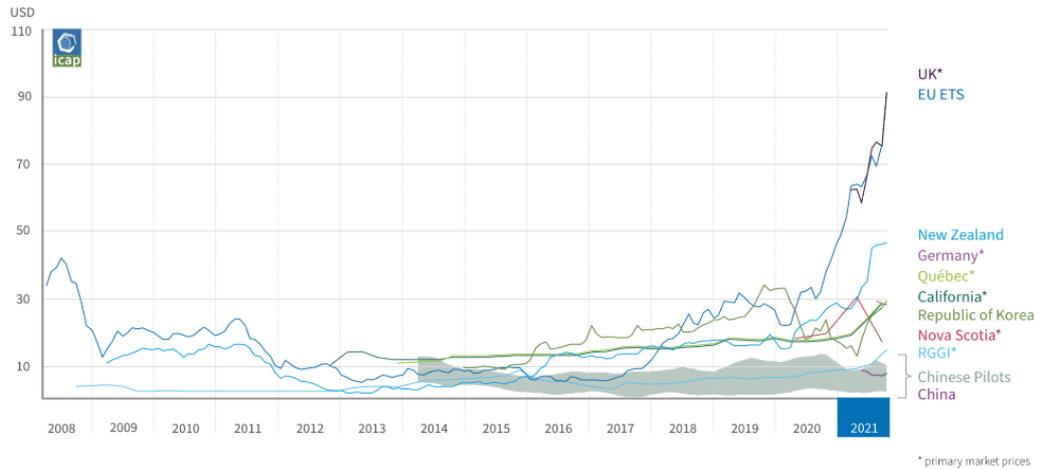


Abbildung 8-2 - Preisentwicklung von CO₂-Zertifikaten. Quelle: International Carbon Action Partnership, Emission Trading Worldwide, Status Report 2022. Gemäss dem erwähnten Statusbericht beträgt die Strafe für die Nichtabgabe ausreichender Zertifikate in der Schweiz CHF 125/t CO₂



8.2.4.

Auswirkung der Sanierungsvarianten auf die Qualität des Deponiesickerwassers

Grundsätzlich führen Aerobisierungsmassnahmen zu einem beschleunigten Abbau der organischen Bestandteile in der Deponie. Bei einer sehr intensiven, mehrere Jahre andauernden Belüftung kann erwartet werden, dass auch die Belastung im Sickerwasser allmählich abnimmt.

Vor dem Erreichen dieses Zustandes ist jedoch aufgrund der intensivierten Umsetzung bzw. Stoffmobilisierung in den Wasserpfad mit z.T. höheren Konzentrationen im Sickerwasser zu rechnen. Die Dauer dieser Phase mit erhöhten Konzentrationen hängt von den Deponiebelüftungsraten und der damit verbundenen Wärmeentwicklung ab und wird darüber hinaus durch weitere, deponiespezifische Bedingungen (z.B. Wassereinstau in den tieferen Schichten) beeinflusst (siehe Erläuterungen im Kapitel 3.7).

Aufgrund des heutigen Kenntnisstandes ist eine Prognose der zeitlichen Entwicklung und des Ausmasses einer Reduktion der Belastungen im Deponiesickerwasser als Folge von Aerobisierungsmassnahmen nicht möglich. Sofern eine wesentliche Verbesserung der Sickerwasserbeschaffenheit belüfteter Altdeponien in überschaubaren Zeiträumen erreicht werden soll, wird empfohlen, eine angepasste Belüftungstechnik hinsichtlich erhöhter Belüftungsvolumina zur intensiven Sauerstoffversorgung insbesondere auch der tieferen ggf. porenwasserergänzten Deponiebereiche zu wählen.

Erste Massnahmen in diese Richtung sollten als Pilotvorhaben mit einer qualifizierten wissenschaftlichen Begleitung durchgeführt werden.

Belastungsabnahme im Sickerwasser zu erwarten

Anfangsphase mit erhöhten Belastungswerten

Prognosen zum Einfluss auf den Sickerwasserhaushalt sind nicht möglich

Pilotprojekte definieren

8.3.

Vorschlag zum Vorgehen bei der Planung von Aerobisierungsmassnahmen

Ausgangslage für die Prüfung von Aerobisierungsmassnahmen dürfte in den meisten Fällen die Tatsache sein, dass es sich um eine alte Siedlungsabfalldeponie handelt und Erkenntnisse aus der Altlastenuntersuchung bezüglich dem Sickerwasser- oder Gashaushalt einen Sanierungsbedarf signalisieren.

Ausgangslage

Das nachstehende Vorgehensschema erläutert vereinfacht den Planungsablauf und die zu berücksichtigenden Kriterien bei der Beurteilung der Frage, ob bei der untersuchten Deponie Aerobisierungsmassnahmen zielführend sind.
 Detaillierte Angaben zum Planungsablauf siehe Kapitel 3.3.

Schema Planungsablauf

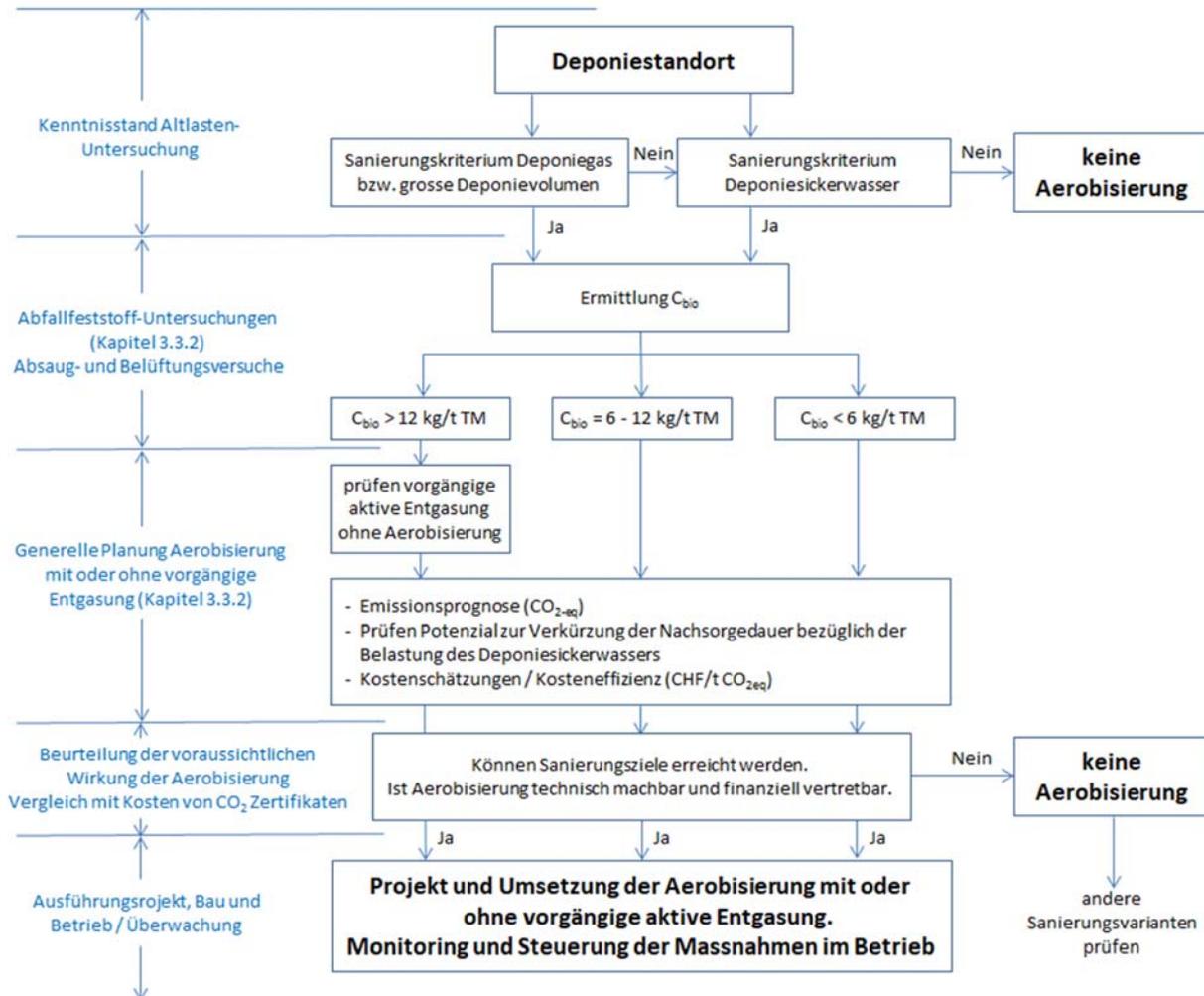


Abbildung 8-3 - Planungsablauf und Entscheidungsbaum für Aerobisierungsmassnahmen

Bern, 12.10.2022
 SC+P SIEBER CASSINA + PARTNER AG
 Sachbearbeitung:
 Marco Ritzkowski (HiCCE), Kai Uwe Heyer (IFAS), Thomas Kägi (carbotech),
 Enrico Cassina, Rafael Schuler (SC+P)

Projektleitung: Rafael Schuler

Rafael Schuler
 Dipl. Bauingenieur ETH / SIA

Enrico Cassina
 Dipl. Bauingenieur HTL

Grundlagen

- [1] Pflichtenheft für einen Expertenbericht zum Thema: «Aerobisierung von Siedlungsabfalldeponien», BAFU Ittingen, 12. März 2021
- [2] Anforderungen an die Einleitung von Deponiesickerwasser, BAFU 2012
- [3] Berechnungsansatz für die Prognose der Schadstoffbelastungen im Deponiesickerwasser (ohne Einfluss der Aerobisierung)
- [4] Berechnungsansatz für die Gasprognose (ohne Einfluss der Aerobisierung)
- [5] IPCC (2006): Guidelines for National Greenhouse Gas inventories, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- [6] IPCC (1996): Guidelines for National Greenhouse Gas inventories, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>
- [7] Abfallerhebung, Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 27, Herausgegeben vom Bundesamt für Umweltschutz, Bern Juli 1984, ergänzt März 1987
- [8] Frischknecht R. & Busser Knopf S. (2013). Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der Ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz (No. 1330) (S. 256). Bern: Bundesamt für Umwelt. – Publikation 2021 noch ausstehend
- [9] Ecoinvent Datenbank SIMAPRO 2018 (noch Präzisieren)

Gesetze und Verordnungen

Jeweils zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes geltende Version:

- [10] Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) vom 4. Dezember 2015 (Stand am 1. April 2020), SR 814.600
- [11] Technische Verordnung über Abfälle (TVA) vom 10. Dezember 1990 (Stand am 1. Juli 2011), SR 814.600 [dieser Text ist nicht mehr in Kraft]
- [12] Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV) vom 26. August 1998 (Stand am 1. Mai 2017), SR 814.680
- [13] Gewässerschutzverordnung vom 28. Oktober, SR 814.201, Art. 29 Abs 1

Literatur

- [14] BAFU, 2012: Anforderungen an die Einleitung von Deponiesickerwasser. Empfehlungen für die Beurteilung, Behandlung und Einleitung von Deponiesickerwasser“ Herausgeber: Bundesamts für Umwelt (BAFU), Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute (VSA), Verband der Betreiber Schweizerischer Abfallverwertungsanlagen
- [15] BAFU, 2015: Standardmethode für den Nachweis von Emissionsverminderungen bei Deponiegasprojekten. Anhang G zur Mitteilung „Projekte und Programme zur Emissionsverminderung im Inland“. Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Klima (April 2015 (Version 2)
- [16] LANUV, 2018: Beschaffenheit von Deponiesickerwasser in Nordrhein-Westfalen. LANUV-Fachbericht 24. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Recklinghausen 2010, Neufassung Februar 2018
- [17] VDI-Richtlinie 3790 Blatt 2, 2017: Umweltmeteorologie. Emissionen von Gasen, Gerüchen und Stäuben aus diffusen Quellen. Deponien Emissionsminderung. Deponiegas. Systeme zur Deponiegaserfassung und Belüftung. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b: Umweltmeteorologie. Beuth Verlag, Berlin. Juni 2017



- [18] VDI-Richtlinie 3899 Blatt 2, 2020: Emissionsminderung. Deponiegas. Systeme zur Deponiegaserfassung und Belüftung. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 2: Emissionsminderung. Beuth Verlag, Berlin. November 2020
- [19] Ritzkowski, M., Stegmann, R., 2008: Ergebnisse des Monitoringprogramms und der wissenschaftlichen Begleitung im BMBF-Verbundvorhaben „Beschleunigte aerobe in situ Stabilisierung der Altdeponie Kuhstedt zur Minderung des Kosten- und Nachsorgeaufwandes“, Förderkennzahl: 0330241 (A+B), Abschlussbericht der TU Hamburg-Harburg, Institut für AbfallRessourcenWirtschaft
- [20] Stegmann, R., Heyer, K.-U., Hupe, K., Willand, A., 2006: Deponienachsorge – Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Abfallwirtschaft, Förderkennzeichen (UFOPLAN) 204 34 327, im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2006.
- [21] Hrad, M., Gamperling, O., Huber-Humer, M., 2013: Comparison between lab- and full-scale applications of in situ aeration of an old landfill and assessment of long-term emission development after completion. Waste Management Volume 33, Issue 10, October 2013, Pages 2061-2073.
- [22] Brandstätter, Ch., Laner, D., Fellner, J., 2015: Carbon pools and flows during lab-scale degradation of old landfilled waste under different oxygen and water regimes. Waste Management Volume 40, June 2015, Pages 100-111.
- [23] AbwV, 2004. Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer, AbwV -Abwasserverordnung. In: BGBl. I Nr. 28 vom 22.6.2004, p. 1108.
- [24] Ritzkowski, M., Stegmann, R. (2008): In situ Belüftung der Altdeponie Kuhstedt – Ergebnisse eines 8-jährigen BMBF-Vorhabens. In: Deponietechnik 2008, Hamburger Berichte 31. Stegmann/Rettenberger/Bidlingmaier/Bilitewski/Fricke/Heyer (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, 31-54, ISBN 3-9810064-6-1.
- [25] Dr.-Ing. Kai-Uwe Heyer, Dr.-Ing. Karsten Hupe, Dipl.-Ing. Astrid Koop, Prof. Dr.-Ing. Rainer Stegmann, Dr. Achim Willand: Wann können Deponien aus der Nachsorge entlassen werden? Ergebnisse eines BMU UFOPLAN-Vorhabens, IFAS - Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft, Prof. R. Stegmann und Partner, Rechtsanwälte Gaßner, Groth, Siederer & Coll., Berlin
- [26] IFAS - Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft Prof. R. Stegmann und Partner, Fachgutachten: „Methanemissionen aus der Ablagerung von mechanischbiologisch behandelten Abfällen“ Vorhaben Z 6 – 30533/3 FKZ 360 16 036, Hamburg 27. April 2012
- [27] Brandstätter, Ch., Prantl, R., Fellner, J. (2018): Stoffbilanzen der Deponiebelüftung im Labor und Erfahrungen im Feld - Deponie "Heferlbach". In: Deponietechnik 2018, Hamburger Berichte 47, Stegmann/Rettenberger/Ritzkowski/Kuchta/Siechau/Fricke/ Heyer (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, ISBN 978-3-9817572-7-9.
- [28] Kim, D.J., Lee, D.I., Keller, J. (2006): Effect of temperature and free ammonia in nitrification and nitrite accumulation in landfill leachate and analysis of its nitrifying bacterial community by FISH. In: Bioresource Technology, 97, pp. 459-468.
- [29] Ritzkowski, M., Stegmann, R. (2013): Landfill aeration within the scope of post-closure care and its completion. In: Waste Management 33 (10), 2074-2082.
- [30] Ritzkowski, M., Walker, B., Kuchta, K., Raga, R., Stegmann, R. (2016): Aeration of the Teuftal landfill: Field scale concept and lab scale simulation. In: Waste Management 55, 99-107.



- [31] Ritzkowski, M., Kuchta, K. (2018): Untersuchungen zu Umsetzungsprozessen im Zuge der Deponiebelüftung. In: Deponietechnik 2018, Hamburger Berichte 47. Stegmann/Rettenberger/Ritzkowski/Kuchta/Siechau/Fricke/Heyer (Hrsg.), Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, 201-218, ISBN 978-3-9817572-7-9.
- [32] Standardmethode für den Nachweis von Emissionsminderungen bei Deponieprojekten, Bafu, April 2015 (Version 2)
- [33] Kägi, T., Dinkel, F., Frischknecht, R., Humbert, S., Lindberg, J., De Mester, S., u. a. (2016). Session "Midpoint, endpoint or single score for decision-making?"—SETAC Europe 25th Annual Meeting, May 5th, 2015. Conference Session Report. *Int J Life Cycle Assess*, 21(1), 129–132. <http://doi.org/10.1007/s11367-015-0998-0>
- [34] Frischknecht, R., Dinkel, F., Braunschweig, A., Ahmadi, M., Kägi, T., Krebs, L., u. a. (2021). *Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der Ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz* (S. 260). Bern: Bundesamt für Umwelt.

