

Beratung betreffend Aerobisierung von Siedlungsabfalldeponien in der Schweiz



Auswertung und Zusammenfassung von 4 Beratungsmandaten



Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Abfall und Rohstoffe
Monbijoustrasse 40
3011 Bern

Fachgebiet Aerobisierung

IFAS Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft
HiiCCE - Hamburg Institute for Innovation, Climate Protection, and Circular Economy

Datum

27.01.2025

Sachbearbeiter/-in

Rafael Schuler
Kai Uwe Heyer
Marco Ritzkowski

Projektnummer

BE 721A

Olten

Winterthur

Wollerau

Zürich

Bern Fliederweg 10
CH-3007 Bern
+41 31 382 35 35
scpbern@scpag.ch
www.scpag.ch



Hinweis

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Impressum:

Filename / Version	Verfasser	Koreferat	Versand an	Datum
BE721A_AuswertungAerobisierung_v1.3	Rsc- 19.11.24	sc – 25.11.24	1	26.11.2024
BE721A_AuswertungAerobisierung_v2.3	Rsc- 03.12.24	TL, RT – 03.12.24	1	04.12.2024 27.01.2025

Name	Firma	Empfänger
Herr Thomas Lepke und Herr Reto Tietz	Bundesamt für Umwelt BAFU, Abteilung Abfall und Rohstoffe, Ort	1

Inhalt

1. Ausgangslage	4
<hr/>	
2. Deponie «1» in Kanton «A»	6
2.1. Ausgangssituation	6
2.2. Problematik	6
2.3. Pilotversuch	6
2.4. Optimierungsvorschläge seitens externer Berater	7
2.5. Fazit und Empfehlung	7
<hr/>	
3. Deponie «2» in Kanton «B»	8
3.1. Ausgangssituation	8
3.2. Problematik	8
3.3. Optimierungsvorschläge seitens externer Berater	9
3.4. Alternative Massnahmen: Sicherung und Überwachung	9
3.5. Fazit und Empfehlung	10
<hr/>	
4. Deponie «3» in Kanton «C»	11
4.1. Ausgangssituation	11
4.2. Optimierungsvorschläge seitens externer Berater	12
4.3. Fazit und Empfehlung	12
<hr/>	
5. Deponie «4» in Kanton «D»	14
5.1. Ausgangssituation	14
5.2. Pilotversuch Entlüftungsgraben	14
5.3. Optimierungsvorschläge seitens externer Berater	15
5.4. Fazit und Empfehlung	16
<hr/>	
6. Erkenntnisse aus den Beratungen	17



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.

Altdeponien in der Schweiz



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

Abbauprodukte Stickstoffverbindungen



Neben den Kriterien der Altlastverordnung (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.

Regelung Umweltgefährdung in der VVEA

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.

Aerobisierung als Sanierungsmassnahme

Mit der Aerobisierung können kurzfristig die klimaschädigenden Deponiegasemissionen und mittel- bis langfristig die Sickerwasseremissionen reduziert werden. Damit das Verfahren in der Schweiz Fuss fassen kann, sollen in den nächsten Jahre Sanierungen mittels Aerobisierung propagiert werden.

Reduktion Deponiegase

Hierzu erarbeitete Sieber Cassina + Partner AG in Zusammenarbeit mit spezialisierten Deponieplanungsbüros aus Hamburg DE (IFAS und HiCCE) sowie mit der Firma carbotech AG als spezialisierte Firma im Bereich der Ökobilanzierung im Jahr 2022 eine Expertise (vgl. [1]). Die Resultate dieser Expertise zeigen, dass sich das Aerobisierungsverfahren als Sanierungsmassnahme bei Altdeponien lohnen kann. Aerobisierungsmassnahmen sind jedoch auch geeignet, um den Ausstoss klimarelevanter Gase Methan und CO₂ zu reduzieren. Je früher Aerobisierungsmassnahmen umgesetzt werden können, desto grösser ist der ökologische Nutzen, insbesondere für den Klimaschutz.

In einem Beratungsmandat während den Jahren 2023 und 2024, welches mit vorliegender Berichterstattung dokumentiert wird, wurden auf Anfrage der kantonalen Fachstellen aktuelle Aerobisierungs-Projekte in Zusammenarbeit hinsichtlich folgender Aspekte unterstützend untersucht:

- Beratung über den Umfang der Sanierungsuntersuchungen.
- Beratung zu allenfalls notwendigen Pilotprojekten.
- Beratung im Zusammenhang mit der Sanierungsprojektierung.
- Beratung zum Betrieb der Aerobisierungs- und Entgasungsanlagen.

Im Rahmen dieses Beratungsmandats wurden 4 Projekte begleitet und beurteilt. Die Projekte sind nachfolgend anonymisiert.

- Deponie «1» in Kanton «A» - Fragen zur Realisierbarkeit und Umsetzung der Sanierungsmethode «Aerobisierung» in Fall einer ehemaligen Siedlungsdeponie «1» im Januar 2023
- Deponie «2» in Kanton «B», Fragen zur Realisierbarkeit und Umsetzung der Sanierungsmethode «Aerobisierung» im Fall der Deponie «2» in Kanton «B» - Evaluation von Sanierungsvarianten bezüglich PFAS im März 2023
- Deponie «3» in Kanton «C», Fragen zur Realisierbarkeit und Umsetzung der Sanierungsmethode «Aerobisierung» in Fall der Deponie «3» in Kanton «C» im Juni 2023
- Deponie «4» in Kanton «D», Zweitmeinung zur Situation und zur Sanierung der Siedlungsabfalldeponie «4» im Juli 2024

Beratungsmandat



2. Deponie «1» in Kanton «A»

2.1. Ausgangssituation

Die Altdeponie «1» in einer kleinen Gemeinde des Kantons «A», wurde zwischen 1969 und 1975 als Deponie für Bauschutt und Siedlungsabfälle genutzt. Sie liegt in einer aufgefüllten Geländemulde und wird heute landwirtschaftlich genutzt. Schadstoffuntersuchungen haben eine Belastung des Grundwassers mit Vinylchlorid und Freonen nachgewiesen, die aus der Deponie stammen. Methanemissionen aus dem Deponiekörper sind ebenfalls ein Problem. Diese Befunde machen eine Sanierung erforderlich, insbesondere zum Schutz des Grundwassers. Die Aerobisierung, als Methode zur biologischen Stabilisierung von Abfällen durch Sauerstoffzufuhr, wurde als potenzielle Sanierungsmethode vorgeschlagen (vgl. [2]).

*Altdeponie
Bauschutt und
Siedlungsabfälle*



2.2. Problematik

Folgende zentrale Herausforderungen und Fragestellungen haben sich seitens der kantonalen Fachstelle bei diesem Projekt gestellt:

- **Schadstoffquellen und Abbauprozesse:** Die Hauptbelastung im Grundwasser resultiert aus CKW (insbesondere Vinylchlorid) und FCKW (Freonen). Während der Pilotphase der Aerobisierung muss geprüft werden, inwieweit die Schadstoffbelastungen im Deponiekörper und im Grundwasser effektiv reduziert werden können. Dabei wird insbesondere der Abbau von Freon 11 im Deponiekörper als kritischer Faktor betrachtet, da dieser Schadstoff massgeblich den Sanierungsbedarf bestimmt.
- **Die Deponie ist verhältnismässig klein und die Schütmächtigkeit ist mit ca. 1.5 m bis 3.5 m gering.** Ebenso ist die Überdeckung mit 0.3 m Bodenaufbau gering. Es stellt sich die Frage, ob die hoch belasteten Bereiche mittels Aerobisierung überhaupt erreicht werden können und ob sich das Verfahren für eine solch geringmächtige Deponie lohnt. Ebenso besteht die Gefahr, dass Oberflächeneinflüsse das Verfahren beeinflussen können.
- **Repräsentativität der bisherigen Daten:** Eine detaillierte Prüfung früherer Schadstoffmessungen ist anhand von zusätzlichen Abfallfeststoffproben erforderlich, um sicherzustellen, dass die Datenbasis die aktuelle Belastungssituation genau widerspiegelt. Es muss geklärt werden, ob die Belastungen im Grundwasser flächendeckend oder punktuell auftreten.

Zentrale Herausforderungen und Fragestellungen

2.3. Pilotversuch

Für das Projekt war ein Pilotversuch zur Aerobisierung vorgeschlagen worden. Im Pilotversuch sollen folgende Aspekte untersucht werden:

- Die Gaswegigkeit und die Gaszusammensetzung im Deponiekörper, um die technische Machbarkeit der Belüftung und Absaugung zu bewerten.
- Der biologische Abbau der organischen Substanz und die damit verbundene Schadstoffreduzierung im Gas- und Wasserpfad.
- Die Effizienz von Absaug- und Belüftungssystemen sowie die mögliche Notwendigkeit ergänzender Gasbrunnen.
- **Erweiterung der bestehenden Infrastruktur:** Vorhandene Bohrungen und Brunnen sollten auf ihre Eignung für Belüftungs- und Absaugmassnahmen geprüft und ggf. angepasst werden.

Zu untersuchende Aspekte im Pilotversuch

2.4.

Optimierungsvorschläge seitens externer Berater

Um eine flächendeckende Belüftung des Deponiekörpers zu gewährleisten, könnten weitere Gasbrunnen erforderlich sein. Diese müssen strategisch platziert werden, um auch schwer erreichbare Bereiche zu belüften. Auch horizontale Drainagen könnten im vorliegenden Fall zielgerichtet funktionieren. Auch Belüftungsmassnahmen über den Deponieuntergrund könnten sich in diesem Fall ziel führend auswirken.

Zusätzliche Gasbrunnen:



Als flankierende Massnahme zur Aerobisierung kommt das Oberflächenmanagement in Frage. Insbesondere die Einschränkung der landwirtschaftlichen Nutzung und die Reduktion von Güllen-Eintrag, könnten notwendig sein, um die aeroben Abbauprozesse zu unterstützen.

Oberflächenmanagement



- **Sanierungsziele definieren:** Klare Kriterien für den Sanierungserfolg müssen festgelegt werden, z. B. die Reduzierung der CKW- und FCKW-Konzentrationen im Grundwasser oder die Verringerung des Methanbildungspotentials.
- **Monitoring-Programme:** Regelmässige Messungen der Gaszusammensetzung, der Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser und des biologischen Abbaus im Deponiekörper sind erforderlich, um den Fortschritt der Sanierung zu bewerten.

Überwachung und Erfolgskontrolle

Die Machbarkeit, die Sanierungsdauer und eine detaillierte Kostenschätzung können nach Auswertung des Pilotversuchs erstellt werden. Im Vorfeld des Pilotversuchs ist dies anhand der verfügbaren Daten erschwert und ungenau. Es wurden von Sanierungskosten von rund CHF 1 Mio. und einer Sanierungsdauer von 4 bis 10 Jahren ausgegangen, welche ohne Pilotversuch im Rahmen des Beratungsmandats so nicht detaillierter abgeschätzt werden konnten.

Kosten und Dauer ohne Pilotversuch schwer abschätzbar

Neben der Aerobisierung wurden auch alternative Sanierungsmethoden wie der Deponierückbau in früheren Studien geprüft, jedoch als weniger geeignet bewertet. Die geringe Bodenabdeckung der Deponie (ca. 30 cm) trägt zur hohen Sickerwasserbildung bei, was den Schadstoffaustrag ins Grundwasser verstärken könnte. Dementsprechend ist auch eine wasserundurchlässige Oberflächenabdichtung zu prüfen, entweder während oder nach der Belüftung, um diesen Effekt zu minimieren.

Alternative Szenarien und offene Fragen

2.5.

Fazit und Empfehlung

Die Umsetzung eines gut geplanten Pilotversuchs ist der entscheidende nächste Schritt, um die Eignung der Aerobisierung für die Deponie «1» zu validieren. Eine erfolgreiche Sanierung könnte die Grundwasserbelastung langfristig verringern und das Gebiet ökologisch stabilisieren. Allerdings sind Investitionen in technische Infrastruktur und ein umfangreiches Monitoring unerlässlich, um den Sanierungserfolg sicherzustellen. Der Sanierungserfolg könnte nebst klassischen Porenluftmessungen anhand einer Kohlenstoffbilanzierung nachgewiesen werden. Die Befürchtung, dass eine Aerobisierung bei so geringmächtigen Altdeponien nicht machbar ist, konnte anhand von erfolgreichen Referenzbeispielen verworfen werden.

Einschätzung

3. Deponie «2» in Kanton «B»

3.1. Ausgangssituation

Die Deponie «2», gelegen im Kanton «B», ist altlastenrechtlich sanierungsbedürftig klassifiziert. Ursprünglich vorgeschlagen als Sanierungsmethode war die Aerobisierung, kombiniert mit Grundwasserüberwachung, um Schadstoffbelastungen zu reduzieren. Für den Fall, dass die Sanierung durch Aerobisierung oder andere Einflüsse der Deponieentwicklung unerwartet zu einer verstärkten Mobilisierung von Schadstoffen ins Grundwasser führen, wurde gemäss Vorgabe der kantonalen Fachstelle zudem als Rückfallebene eine Fassung und Ableitung des belasteten Deponiesickerwassers mittels Dichtwand konzeptioniert. Im Rahmen laufender Grundwasserüberwachungen betreffend PFAS seit 2020 stuft die kantonale Fachstelle aufgrund der Untersuchungsergebnisse zu den PFAS-Verbindungen im Abstrombereich die Deponie «2» als sanierungsbedürftig auch bezüglich PFAS (per- und polyfluorierte Alkylverbindungen) ein (vgl. [3]). Es stellte sich die Frage, ob die Aerobisierungsmethode hinsichtlich PFAS ebenso eine signifikante Wirkung erzielen kann.

Siedlungsabfälle, Klärschlamm und Industrieabfälle



3.2. Problematik

Die Deponie, die zwischen 1949 und 1978 betrieben wurde, enthält verschiedene Abfallarten wie Siedlungsabfälle, Klärschlamm und Industrieabfälle. Eine qualifizierte Basisabdichtung oder Oberflächenabdichtung fehlt. Die Untersuchungen zeigen, dass im unteren Deponiekörper eine Porenwassersättigung mit etwa 10 bis 12 m Einstauhöhe vorliegt. Die Konzentrationen von PFAS wie PFBA (Perfluorbutansäure) und PFOA (Perfluoroktansäure) überschreiten an einigen Messstellen die zulässigen Grenzwerte, insbesondere im unmittelbaren Abstrombereich der Deponie.

Charakteristik Deponie

PFAS sind hoch stabile Verbindungen mit einer starken Kohlenstoff-Fluor-Bindung, die sie resistent gegen chemischen und biologischen Abbau machen. Langkettige PFAS wie PFOA sind besonders persistent und bioakkumulierbar, während kurzkettige Verbindungen wie PFBA geringere Umweltwirkungen haben. Aerobe Bedingungen fördern die Transformation von PFAS-Precursoren zu stabilen, nicht abbaubaren Endprodukten. Daher wird erwartet, dass die Aerobisierung keinen signifikanten Abbau von PFAS bewirkt. Aufgrund der durchgeführten Evaluation gibt es für die Deponie «2» gemäss heutigem Wissensstand somit (noch) keine technisch machbaren, wirksamen und finanziell tragbaren aktiven Sanierungsverfahren für PFAS.

PFAS-Eigenschaften und Einfluss der Aerobisierung

Die früheren und aktuellen Untersuchungen zeigen, dass die Deponie «2» seit vielen Jahren in etwa gleichbleibende oder abnehmende Schadstoffemissionen aufweist. Es wird angenommen, dass dieses Verhalten auch für PFAS zutrifft. Die Dringlichkeit einer Sanierung wird zum heutigen Zeitpunkt deshalb als «tief bis mittel» eingeschätzt. PFAS-Belastungen würden beim Übertritt in den Limmattal-Grundwasserstrom aufgrund von Verdünnung, Adsorption und biologischem Abbau rasch auf unproblematische Gehalte abnehmen oder ganz verschwinden. Insgesamt ist das Freisetzungspotential bezüglich PFAS als gering zu beurteilen.

Bisherige Schadstoffentwicklung

Es wurden verschiedene Sanierungsansätze evaluiert:

Sanierungsoptionen

1. **Dekontamination:** Verfahren wie Aushub und In-situ-Methoden wurden aufgrund technischer und finanzieller Hürden ausgeschlossen.

2. **Sicherung:** Die Errichtung einer Oberflächenabdichtung oder Dichtwand wurde als mögliche Rückfallebene vorgeschlagen, um den weiteren Austrag von Schadstoffen zu verhindern.
3. **Monitored Natural Attenuation (MNA):** Das Sanierungsziel wird in der geforderten Frist ohne aktive Sanierungsmassnahmen durch natürliche Abbau- und Rückhalteprozesse erreicht.
4. **Enhanced Natural Attenuation (ENA):** Die Aerobisierung wurde als Pilotprojekt vorgeschlagen, um die Machbarkeit und Auswirkungen auf die PFAS-Situation zu testen.

Das Pilotprojekt zur Aerobisierung soll klären, ob eine gezielte Belüftung des Deponiekörpers Schadstoffmobilisierung oder -fixierung bewirken kann. Für den Pilotversuch war das Übersaugungsverfahren vorgesehen.

Pilotprojekt



3.3.

Optimierungsvorschläge seitens externer Berater

Das geplante Pilotprojekt umfasst zwei Drittel der Deponieoberfläche, was die zuständige Behörde des Kantons «B» als fast vollständige Sanierung beurteilt. Die externen Berater IFAS, HiCCE und SC+P unterstützen das Konzept grundsätzlich, machen jedoch auf folgende Herausforderungen aufmerksam:

Umfang und Herausforderungen

- Unzureichende Datenlage: Es fehlen genaue Kenntnisse über die Schadstoffverteilung und die Materialzusammensetzung des Deponiekörpers. Zusätzliche Bohrungen sind erforderlich.
- Aufgrund der Erfahrungen von IFAS, HiCCE und SC+P ist ergänzend zum vorgeschlagenen Konzept zur Absaugung und Übersaugung eine aktive Sauerstoffzugabe erforderlich. Diese Forderung wird mit der grossen Kubatur der Deponie, der bestehenden Oberflächenabdeckung und der Porenwassersättigung als weiterer limitierender Faktor begründet.
- Langfristiger Zeithorizont: Die Umsetzungsdauer von zehn Jahren für den Pilotversuch wird als Maximalvariante erachtet. Mit einem iterativen Vorgehen und einer Flexibilität zur Anpassung des Untersuchungsprogramms kann der Pilotversuch optimiert und allenfalls verkürzt werden.
- Zwischenschritte: Es wird vorgeschlagen Voruntersuchungen mit Abfallfeststoffanalysen und orientierenden Laboruntersuchungen zum Abbauverhalten bei einer Belüftungsmassnahme und zum Freisetzungverhalten von Schadstoffen wie PFAS vorzunehmen. Anschliessend folgen Absaug- und Belüftungsversuche und Pumpversuche über einen kürzeren Zeitraum.

3.4.

Alternative Massnahmen: Sicherung und Überwachung

Eine Oberflächenabdichtung kann das Eindringen von Niederschlagswasser reduzieren und damit die Mobilisierung von Schadstoffen minimieren. Im Vergleich zu einer Dichtwand wird diese Methode als einfacher zu implementieren und kostengünstiger angesehen. Sie könnte auch mit einem Pump-and-Treat-Ansatz kombiniert werden, um Schadstoffe am Austritt aus der Deponie zu erfassen.

Sicherung durch Oberflächenabdichtung

Die externen Berater IFAS, HiCCE und SC+P schlagen vor, Pumpbrunnen im Deponiekörper zu installieren, um belastetes Sickerwasser zu erfassen. Diese Methode könnte effektiv Schadstofffrachten reduzieren, bevor sie ins Grundwasser gelangen. Zur Reinigung des Wassers empfehlen sie Aktivkohleadsorption oder Umkehrosmose, wobei eine thermische Entsorgung der konzentrierten Schadstoffe notwendig wäre.

Pump-and-Treat-Verfahren

Die kontinuierliche Überwachung von PFAS-Konzentrationen und Fraktionen im Grundwasser bleibt zentral. Es müssen Messstellen im weiteren

Langfristige Überwachung

Abstrombereich der Deponie eingerichtet werden, um die tatsächlichen Belastungen zu quantifizieren und frühzeitig auf Änderungen reagieren zu können.

3.5.

Fazit und Empfehlung

Die Einschätzungen von IFAS, HiCCe und SC+P decken sich weitgehend mit den Erkenntnissen des Gutachtens:

- Das Pilotprojekt wird als notwendig erachtet, um offene Fragen zu klären, sollte jedoch durch ergänzende Massnahmen wie zusätzliche Bohrungen und Überwachung gestützt werden. Die Ausweitung des Verfahrens mit aktiver Sauerstoffzugabe und iterativem Vorgehen mit Zwischenschritten wird jedoch empfohlen.
- Die Aerobisierung wird nicht als geeignet angesehen, PFAS signifikant abzubauen, könnte jedoch wichtige Erkenntnisse für andere Schadstoffgruppen liefern.
- Die Gefährdung durch PFAS ist aufgrund der geringen Freisetzungsraten und der Verdünnung im Grundwasserstrom als begrenzt einzustufen.
- Alternativen wie Oberflächenabdichtungen oder Pump-and-Treat-Verfahren können jedoch ergänzend geprüft werden.
- Eine Dichtwand wird für die nächsten Untersuchungsschritte und ersten Sanierungsmassnahmen im Sinne eines Pilotvorhabens für nicht erforderlich gehalten. Sie sollte erst installiert werden, wenn es zu einem erheblichen Schadstoffaustrag käme, der das Schutzgut Grundwasser massiv gefährdet und keine alternativen Lösungen in Frage kommen.

Die Dringlichkeit einer umfassenden Sanierung wird als gering eingestuft. Eine Kombination aus Monitoring, selektiven Sicherungsmassnahmen und einem iterativen Vorgehen wird als sinnvoller Ansatz empfohlen, um die Deponie langfristig zu stabilisieren und die Umweltbelastungen zu minimieren.

*Weitgehende
Übereinstimmung*

*Dringlichkeit
gering*



4. Deponie «3» in Kanton «C»

4.1. Ausgangssituation

Die Deponie «3» im Kanton «C» wurde zwischen 1975 und 2003 mit Hausmüll, Schlacke und verunreinigten Böden verfüllt und befindet sich seit 2006 in der Nachsorgephase. Die Deponie umfasst sieben Kompartimente, wobei die älteren bereits eine weitgehende biologische Stabilität erreicht haben. Der aktuelle Fokus liegt auf jüngeren Abschnitten (V bis VII), die noch ein signifikantes Gasbildungspotenzial aufweisen. Die Deponie verfügt über eine Basis- und Oberflächenabdichtung sowie Systeme zur Fassung von Sickerwasser und Deponiegas. Die Deponie hat eine Gesamtfläche von etwa 8 Hektaren, mit einer durchschnittlichen Ablagerungsmächtigkeit von 19,3 Metern. Die Abfallzusammensetzung zeigt 45 % organische Materialien (z. B. Holz, Papier), 42 % Kunststoffe und Textilien sowie 13 % mineralische und inerte Bestandteile. Untersuchungen an Bohrproben ergaben, dass die biologische Aktivität der organischen Komponenten ausreichend für eine Aerobisierung ist. Insbesondere die Abschnitte V bis VII weisen noch erhebliches Gasbildungspotenzial auf. Anhand von FID-Untersuchungen (**Flammenionisationsdetektor**) an der Oberfläche wurde insbesondere im Bereich der vorhandenen Deponiebauwerke, so z.B. nahe von Schächten oder Kammern (Durchdringung der Oberflächenabdichtung) erhebliche Methankonzentrationen (potenziell explosive Gasgemische) gemessen wurden. Das Setzungsmonitoring bestätigt, dass in den älteren Deponieabschnitten die Setzungen praktisch abgeklungen sind, während in den jüngeren Abschnitten noch signifikante Setzungen auftreten (vgl. [4]).

Die bestehende Entgasungsanlage besteht aus einer Kombination aus vertikalen Gassonden und Gasbrunnen sowie horizontalen Gasdrainagen. Das Gasfassungssystem ist aufgrund von Setzungen und Wassereinstau sanierungsbedürftig und soll ergänzt werden, wofür Sanierungsvarianten evaluiert worden sind. In diesem Zusammenhang wurden auch Gaspumpversuche durchgeführt. Folgende Sanierungsvarianten stehen zur Diskussion:

- Variante 1 umfasst ein Langzeittest von ca. 24 Monaten (langfristiger Absaugversuch) zur Bestimmung des aktuellen Gasbildungspotenzials in drei Deponiebereichen unterschiedlichen Alters. Hierzu würden drei der neuen Bohrungen / Gasbrunnen mit neuem Leitungssystem erstellt und besaugt.
- Die Variante 2 sieht einen erweiterten Langzeittest von ca. 36 Monaten ähnlich der Variante 1 vor, jedoch unter Einbeziehung aller 9 neuen Bohrungen / Gasbrunnen, was mit einem erhöhten technischen Aufwand der Absaugversuche verbunden wäre.
- Die Variante 3 sieht die Erstellung von zusätzlichen 27 Gasbrunnen sowie die Installation eines Blockheizkraftwerk (BHKW) am Standort vor. Alle neuen Brunnen (36) sowie die bestehende Infrastruktur zur Gasfassung werden anschliessend stark besaugt (Dauer ca. 22 Monate), so dass es in der Folge zu einer schrittweisen Aerobisierung der Deponie kommt.

Die wesentlichen Ziele des Projekts sind die Untersuchung der Machbarkeit und Realisierung einer Aerobisierung, um die biologische Stabilisierung des Abfallkörpers zu beschleunigen, Gasemissionen zu reduzieren und die Qualität des Sickerwassers zu verbessern.

Einleitung und Hintergrund



Sanierungsvarianten Gasfassungssystem

Ziele der Sanierung

Die biologische Aktivität wurde als ausreichend für eine Aerobisierung eingestuft, mit einem mittleren biologisch abbaubaren Kohlenstoff (C_{bio}) von 9,8 kg/Mg TS. Der Wassergehalt von 36 % ist geeignet für biologische Abbauprozesse. Die kürzlich getätigten Abfallfeststoffuntersuchungen nahmen dabei bereits Bezug auf die vorliegende Expertise bezüglich Aerobisierungsverfahren in der Schweiz (vgl. [1]).

Abfallinventar und biologische Aktivität:



Die Basis- und Oberflächenabdichtung der Deponie sind weitgehend intakt. Austritte belasteten Sickerwassers in den Untergrund werden weitgehend vermieden, so dass auch bei der Realisierung eines Belüftungsprojekts am Standort nicht mit grösseren Belastungen des Bodens bzw. des Grundwassers gerechnet werden muss. Die Funktionsfähigkeit der Oberflächenabdichtung wurde anhand der geringen Infiltrationsmengen nachgewiesen.

Einfluss Barrieren und Abdichtungen auf Aerobisierung



4.2.

Optimierungsvorschläge seitens externer Berater

Die mineralische Oberflächenabdichtung verhindert den gleichmässigen Luftzutritt und verlangsamt den Aerobisierungsprozess bei reiner Übersaugung massgebend. Aus Sicht der externen Berater IFAS, HiiCCE und SC+P wird eine reine Absaugung resp. Übersaugung deswegen nicht als zielführend erachtet. Eine aktive Luftzufuhr über Brunnen und horizontale Drainagen wird empfohlen, um eine flächige Verteilung sicherzustellen.

Mineralische Oberflächenabdichtung

Etwa 30 % des Deponievolumens sind von einem Wassereinstau betroffen. Dieser Zustand könnte die Effizienz der Aerobisierung mindern, da die Sauerstoffversorgung in den gesättigten Bereichen eingeschränkt ist. Eine Absenkung des Wasserspiegels durch Kombibrunnen wird deswegen vorgeschlagen, damit mit der Aerobisierung auch die unteren Bereiche des Deponiekörpers erreicht werden können.

Wassereinstau:

Die Sickerwasserbelastung der Deponie wird durch erhöhte Ammoniumkonzentrationen (NH_4-N) und moderate organische Belastungen (CSB, TOC) charakterisiert. Die Auswirkungen der Belüftung im Sinne eines beschleunigten und weitgehenden Abbaus organischer Bestandteile in den Abfällen führen zu einer allmählichen Reduktion der Belastungen im Deponiesickerwasser.

Verbesserung der Sickerwasserqualität

Im Sickerwasser ist durch die Belüftung mit dem aeroben Abbau organischer Verbindungen und der Freisetzung in die Gasphase eine beschleunigte Abnahme der Parameter CSB und TOC sowie des Stickstoffs (NH_4-N) infolge von Nitrifikations- und Denitrifikationsprozessen zu erwarten. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass es durch die Veränderung der Druckverhältnisse sowie der Sickerwasserflusswege im Deponiekörper auch zur Mobilisierung von Flüssigkeiten, welche unter den statischen Bedingungen vor dem Beginn der Belüftung nicht oder nur sehr zeitverzögert ausgetragen worden wären, kommen kann.

4.3.

Fazit und Empfehlung

Die geplante Aerobisierung bietet eine vielversprechende Möglichkeit, die biologische Stabilisierung der Deponie «3» zu beschleunigen und die langfristigen Umweltbelastungen zu reduzieren. Die Deponiemächtigkeit mit ca. 19 m (maximal 26 m) wird als grundsätzlich geeignet für die Anwendung von Aerobisierungsverfahren erachtet. Erschwerend könnte sich jedoch wie erläutert die Porenwassersättigung bzw. der vorhandene Einstau oberhalb der Deponiebasis erweisen. Die externen Berater IFAS HiiCCE und SC+P sind der Meinung, dass in Verbindung mit den erläuterten ergänzenden Voruntersuchungen (über kurze Zeiträume von Wochen, wenigen Monaten) die vorliegenden Daten zur bisherigen Deponieentgasung im Zusammenspiel mit den nun vorliegenden,

Aerobisierung ist geeignet

detaillierten Informationen zum Zustand der abgelagerten Abfälle (aus den Laboranalysen der Abfallfeststoffproben) eine hinreichend qualifizierte Aussage zum weiteren Vorgehen im Rahmen der Deponienachsorge erlauben. Sie sprechen sich für eine Umsetzung der Variante 3 des Variantenstudiums aus, mit folgenden Ergänzungen:

- Kombibrunnen: Der Ausbau vertikaler Brunnen zur kombinierten Gas- und Wasserentnahme wird empfohlen, um die Effizienz der Aerobisierung zu steigern.
- Angepasste Technik: Ein kombiniertes System aus aktiver Luftzufuhr und Gasabsaugung wird bevorzugt. Dabei könnten Niederdruckbelüftung und eine parallele Sickerwasserentnahme die Stabilisierung optimieren. Auch die Nutzung des untersten horizontalen Drainagesystems kann geprüft werden.
- Gasverwertung: Aufgrund der geringen Gasbildungsraten wird von einer energetischen Verwertung abgeraten. Stattdessen wird die Nutzung moderner Schwachgasfackeln empfohlen.

Optimierungen



5. Deponie «4» in Kanton «D»

5.1. Ausgangssituation

Die ehemalige Tongrube einer Ziegelei in Kanton «D» wurde zwischen 1935 und 1960 mit rund 205'000 m³ Kehricht sowie 500'000 m³ bis 750.000 m³ Aushub, Bauschutt und Giessereisand verfüllt. Der mit Siedlungsabfällen (Kehricht) verfüllte Bereich (Teilstandort mit Fläche ca. 23.500 m²) wird heute aus altlastenrechtlicher Sicht als sanierungsbedürftiger belasteter Standort im Kataster der belasteten Standorte des Kantons «D» geführt. Im Bereich dieses Teilstandortes wurden zwischen 1947 und 1959 neben Siedlungsabfällen (Hauskehricht) auch Giessereisande und -schlacken sowie Aushub vermischt mit Bauschutt abgelagert. An der Basis der ehemaligen Tongrube finden sich natürliche, praktisch undurchlässige Lehmschichten, die das Sickerwasser im Bereich der Deponie stauen. Anfallendes Sickerwasser wird durch eine Entwässerungsleitung gefasst und in einen Vorfluter (Hornbach) eingeleitet. Die Deponie verfügt weder über eine qualifizierte Basis- und Oberflächenabdichtung noch über Systeme zur Fassung von Sickerwasser und Deponiegas (vgl. [5]).

Die Porenluft weist Konzentrationen von Deponiegasen auf, die die entsprechenden Konzentrationswerte der AltIV, Anhang 2 (u.a. 0,5 Vol.-% CO₂ und 1,0 Vol.-% CH₄) überschreiten. Im Jahr wurde eine Aerobisierung als bevorzugte Sanierungsvariante für den Standort evaluiert. Aufgrund von Bedenken, dass die Aerobisierung durch den beschleunigten mikrobiellen Abbau zu differenziellen Setzungen und Gebäudeschäden führen könnte, wurde im Jahr 2015 die Evaluation der Sanierungsvarianten mit einem Fokus auf die Betrachtung passiver Sanierungsmassnahmen ergänzt. Dabei wurde eine Kombination aus Nutzungseinschränkungen in den Gärten der anliegenden Grundstücke, Gasschutzmassnahmen in den Kellergeschossen der Wohnhäuser und Gasfenster mit Kiesfilter (Entlüftungsgraben) gegenüber der Aerobisierung bevorzugt und weiterverfolgt (vgl. [5]). Für die Entlüftungsgraben wurde von der zuständigen kantonalen Fachstelle ein Pilotversuch gefordert.

Es liegen ältere Stichtagsmessungen von Deponiesickerwasser vor, welche zeigen, dass die DOC und BSB₅ Konzentrationen zwar moderat sind. Mit sehr hohen Sickerwassermengen liegen jedoch grosse Schadstofffrachten an NH₄ und organischem Kohlenstoff (DOC) vor.

5.2. Pilotversuch Entlüftungsgraben

Der Bau des Pilot-Entlüftungsgrabens mit einer Tiefe von 5 m und einer Länge von 30 m (gefüllt mit Sickerkies 16/32) erfolgte im April 2020. Zur Beurteilung der Wirksamkeit des Entlüftungsgrabens wurden insgesamt 15 Porenluft-Messstellen in unterschiedlichen Abständen des Entlüftungsgrabens (5, 10 und 20 m) installiert. Die Ergebnisse können, differenziert nach dem Abstand der Messstellen zum Entlüftungsgraben sowie nach CO₂ und CH₄ Messwerten folgendermassen zusammengefasst werden:

- In geringer Entfernung zum Entlüftungsgraben (5 m) nahmen die Methankonzentrationen im Mittel über 3 Jahre um 49% (verglichen mit der Nullmessung) ab, während die Kohlenstoffdioxidkonzentrationen im gleichen Zeitraum um 54% anstiegen.
- Die Wirkung des Lufteintrags ist aufgrund der geringen Oberfläche des Entlüftungsgrabens zwar örtlich begrenzt, dennoch konnte in 10 m Entfernung zum Graben ein Anstieg der CO₂-Konzentrationen um 95% auf ein

Altdeponie in einer Tongrube mit Teilbereich Siedlungsabfälle

Sanierungsbedarf Schutzgut Porenluft

Sickerwasserfrachten

Entlüftungsgraben



vergleichbares Niveau zu den CO₂-Konzentrationen nahe dem Entlüftungsgraben festgestellt werden. Die dortigen Methankonzentrationen stiegen zwar um 46% an, lagen jedoch absolut noch deutlich unter denen nahe des Entlüftungsgrabens.

In geringer Entfernung zum Graben wird die Wirkung des passiven Lufteintrags über die offene Oberfläche des Entlüftungsgrabens deutlich, welche sich in einer teilweisen Oxidation des Methans durch methanotrophe Bakterien sowie hauptsächlich in einem mikrobiologischen, aeroben Abbau organischer Substanz mit jeweiliger CO₂-Produktion ausdrückt. Es wird ebenso vermutet, dass die Wirkung der passiven Belüftung (Oxidation organischer Substanz zu CO₂) zwar auch in grösserer Entfernung zum Graben stimuliert wird, jedoch dort aufgrund der geringeren Mengen an Hausmüll insgesamt weniger abbaubare Organik und damit auf ein geringeres Deponiegasbildungspotenzial vorliegt.

Nebst dem Pilotversuch wurde an den östlich anliegenden Gebäuden Abdichtungsmassnahmen an den Gebäudeuntergeschossen umgesetzt. Die Abdichtungsmassnahmen haben allerdings keine eindeutige Verbesserung der Situation (Gasmigration in die Untergeschosse der Wohnbebauung) herbeigeführt.

Interpretation



*Abdichtungs-
massnahmen*

5.3.

Optimierungsvorschläge seitens externer Berater

Die vorliegenden Ergebnisse zur Wirksamkeit des Pilotversuchs zeigen, dass die Installation von Entlüftungsgräben westlich der Wohnhäuser bei der bisherigen Vorgehensweise und aufgrund der Entfernungen keinen hinreichenden Schutz der Liegenschaften am östlichen Rand der Deponie gewährleisten kann. Der natürliche Kaminzug-Effekt wird aufgrund der geringen biologischen Aktivität der Abfälle (geringe Wärmefreisetzung beim biologischen Abbau der verbliebenen organischen Substanz) eher gering und allenfalls in den oberen Bereichen des Grabens auftreten. Aus Sicht der Experten IFAS, HiCCE und SC+P sollte demgegenüber in einem abgestuften Vorgehen untersucht werden, ob die passive Belüftung der Deponie über die modifizierten Entlüftungsgräben (Kaminzugeffekt resp. Absaugung) sowohl zu einer Reduzierung der Deponiegaskonzentrationen als auch zu einer dauerhaften Reduktion des Deponiegasbildungspotenzials beitragen kann.

*Optimierungen
am Entlüf-
tungsgraben
und Empfeh-
lung*

Eine Verbesserung der Entlüftungssituation könnte durch die Installation von ausreichend dimensionierten, perforierten Rohren an der Grabenbasis mit einer vertikalen Verbindung und Öffnung an den Grabenrändern erreicht werden, sofern die beiden bestehenden Schächte diese Funktion nicht ausfüllen können.

*Entlüftungs-
rohre an Gra-
benbasis*

Eine aktive Besaugung der tieferen Grabenbereiche könnte demgegenüber den Einflussbereich der indirekten Belüftung (Lufteintrag über die Deponieoberfläche) deutlich erweitern und in der Folge dazu führen, dass sowohl die verbleibenden Methankonzentrationen sinken als auch die noch biologisch abbaubare organische Substanz beschleunigt umgesetzt werden würde.

*Aktive Besau-
gung*

Es wird empfohlen die Sanierungsvarianten einer aktiven Gasfassung zur Gefahrenabwehr nochmals näher in Betracht zu ziehen und im Verhältnis zu den anderen Sanierungsvarianten neu zu bewerten:

*Aktive Gasfas-
sung*

- Nach Ansicht von den externen Beratern IFAS, HiCCE und SC+P ist das Restrisiko einer Gefährdung im Außenbereich der betroffenen Grundstücke höher einzustufen als in den Innenräumen der dort befindlichen Wohnbebauung.
- So kann in Tiefpunkten, Schächten, Gruben o.ä. eine Sauerstoffarmut oder Kohlenstoffdioxidanreicherung auftreten (Erstickungsgefahr).

- Ferner kann eine Aufkonzentration bzw. Migration von Methan in Hohlräumen, unter Abdeckungen und Versiegelungen zu einer explosionsfähigen Atmosphäre führen (Explosions-/Verpuffungsgefahr).

Die potenzielle Gefahr von Setzungsschäden an der vorhandenen Gebäudesubstanz kann bei der Realisierung dieser passiven Belüftungsmassnahmen als relativ gering eingeschätzt werden. Wichtig ist es dabei zu beachten, dass die Setzungen infolge der Aerobisierung zwar zeitlich verkürzt und zu einem früheren Zeitpunkt auftreten, in ihrem Umfang jedoch auch über deutlich längere Zeiträume unter den «klassischen» anaeroben Deponiebedingungen auftreten würden.

5.4.

Fazit und Empfehlung

Eine aktive Gasfassung z.B. über Gasbrunnen im Randbereich der betroffenen Grundstücke würde diese Restrisiken bzw. potenziellen Gefährdungssituationen deutlich reduzieren, indem der Methangehalt in der Bodenluft (zeitnah) deutlich reduziert wird und mit einer moderaten Übersaugung die Methan- bzw. Depo-niegasbildung nachhaltig vermindert wird. Ferner wird eine Gasbewegungsrichtung weg von den Gebäuden und der Oberfläche der Garten-/Grundstücksflächen eingestellt, die über den Absaugbetrieb weitgehend regelbar wäre. Die resultierenden Setzungen wären wie ebenfalls bereits erläutert vermutlich gering und ihr Verlauf könnte über einen angepassten Absaug- bzw. Belüftungsbetrieb ebenfalls beeinflusst werden. Die Gesamtsetzungen würden sich sowohl unter anaeroben wie aeroben Milieubedingungen kaum unterscheiden, sondern eher der Zeitpunkt, bis zu dem sie sich weitgehend ausgebildet haben.

Gefahr von Setzungen bei Aerobisierungsmassnahmen

Gasbrunnen im Randbereich der betroffenen Grundstücke



6. Erkenntnisse aus den Beratungen

Aus der externen Beratung der 4 sanierungsbedürftigen Altdeponien lassen sich folgende Erkenntnisse gewinnen, welche bei mehreren Fällen gleichzeitig geltend gemacht werden können:

- Das Sanierungsziel definiert den Rahmen der Sanierung und somit auch ob Aerobisierungsmassnahmen eine Sanierung ermöglichen. Das Sanierungsziel sollte bereits vor der Prüfung von Aerobisierungsmassnahmen klar definiert sein – hierzu ist ein vorgängiger Austausch der Planer mit den bewilligenden Behörden erforderlich.
- Als massgebender Kennwert zur Eruiierung des Gesamtpotenzials an Kohlenstoff, welches noch hauptsächlich über den Gaspfad aus dem Deponiekörper emittieren kann, gilt der biologisch abbaubare Kohlenstoffanteil (auch C_{bio} genannt). Anhand dieses Kennwerts kann präventiv das Potential von Aerobisierungsmassnahmen eruiert werden. Der Kennwert kann anhand von Abfallfeststoffuntersuchungen ermittelt werden.
- Ein Pilotversuch bringt nützliche Erkenntnisse zur generellen Machbarkeit eines Aerobisierungsprojekts und wie eine Aerobisierung umgesetzt, optimiert und wirtschaftlich betrieben werden kann. Der Pilotversuch soll dabei so ausgelegt und überwacht werden, dass Optimierungen am System vorgenommen werden können. Ebenso können anhand eines Pilotversuchs Kosten und Zeitdauer der Sanierung verlässlich abgeschätzt werden
- Reine Absaugungsmassnahmen (Aerobisierungskonzept Übersaugung, resp. Entlüftungsgraben) können zwar kostengünstig installiert werden, erreichen jedoch vielfach nicht alle zu sanierenden Deponiebereiche und die Massnahme dauert erfahrungsgemäss länger als bei einer aktiven Belüftung. Insbesondere im Zusammenhang mit einer Oberflächenabdichtung scheint eine Übersaugung nicht zielführend zu sein.
- Ein weiterer Einflussfaktor ist die auflastbedingten längeren Aufenthaltszeit des Sickerwassers in tiefen Deponiebereichen (infolge der geringeren hydraulischen Permeabilität) sowie die dort (häufig) anzutreffende vollständige Sättigung (= Wassereinstau) des Porenraums. Dies kann den Lüftungsbetrieb massgebend limitieren und eine Lösung mit Kombibrunnen - Gasbrunnen, die über eine zusätzliche Tauchpumpe zur Entwässerung des Deponiekörpers genutzt werden können – ist zu prüfen.
- Die Aerobisierung wird nicht als geeignet angesehen, PFAS signifikant abzubauen.
- Eine Aerobisierung kann oftmals in Kombination mit anderen Sanierungsmassnahmen umgesetzt werden.

Optimierungen



Sanierungsziel



Abbaubarer Kohlenstoffanteil

Pilotversuch

Aktive Belüftung prüfen

*Einstau Depo-
niebasis*

Nicht geeignet für PFAS

Kombination mit anderen Massnahmen

Bern, 27.01.2025

SC+P SIEBER CASSINA + PARTNER AG

Sachbearbeiter-/in: Rafael Schuler

Rafael Schuler

Dipl. Bauingenieur ETH / SIA

Grundlagen

(teilweise anonymisiert)

- [1] SCP, IFAS, HiiCCE, Carbotech (2022): Aerobisierung von Siedlungsabfalldeponien. Expertise im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU. Bern, 2022
- [2] Fragen zur Realisierbarkeit und Umsetzung der Sanierungsmethode «Aerobisierung» in Fall der ehemaligen Siedlungsdeponie «1» in Kanton «A», Sieber Cassina + Partner AG, IFAS, HiiCCE, Bern und Hamburg 30.01.2023
- [3] Fragen zur Realisierbarkeit und Umsetzung der Sanierungsmethode «Aerobisierung» im Fall der Deponie «2» in Kanton B - Evaluation von Sanierungsvarianten bezüglich PFAS, Sieber Cassina + Partner AG, IFAS, HiiCCE, Bern und Hamburg 06.03.2023
- [4] Fragen zur Realisierbarkeit und Umsetzung der Sanierungsmethode «Aerobisierung» in Fall der Deponie «3» in Kanton «C», Sieber Cassina + Partner AG, IFAS, HiiCCE, Bern und Hamburg 13.06.2023
- [5] Zweitmeinung zur Situation und zur Sanierung der Siedlungsabfalldeponie «4» in Kanton «D», Sieber Cassina + Partner AG, IFAS, HiiCCE, Bern und Hamburg 31.07.2024

Gesetze und Verordnungen

Jeweils zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes geltende Version:

- [6] Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA) SR 814.600

